

Осадчук Я.О.

Вінницький національний технічний університет

МІКРОЕЛЕКТРОННІ АВТОГЕНЕРАТОРНІ СЕНСОРИ КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗУ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

Запропоновано автогенераторні сенсори концентрації газу з частотним виходом на основі транзисторних напівпровідникових структур з диференційним від'ємним опором з газочутливими елементами на базі резистора і діода Шотткі, причому газочутливі елементи є активними елементами схем автогенераторних перетворювачів, що значно спрощує конструкцію сенсорів концентрації газу.

На основі розгляду фізичних процесів, які протікають у газочутливих елементах і автогенераторних перетворювачах, розроблено математичні моделі сенсорів концентрації газу, за допомогою яких отримано параметричні залежності функцій чутливості і перетворення. Доведено, що основний внесок у зміну функцій перетворення і чутливості вносить зміна концентрації газу, що в свою чергу викликає зміну еквівалентної ємності та диференційного від'ємного опору у коливальній системі автогенераторних сенсорів концентрації газу, що змінює вихідну частоту перетворювачів фізичних величин. Чутливість сенсорів концентрації газу змінюється від 1,48 кГц/ррт до 6,35 кГц/ррт при зміні концентрації газу від 0 ррт до 2000 ррт.

Отримані аналітичні вирази, які описують параметричні залежності функцій чутливості та перетворення, які дозволяють значно простіше розраховувати основні параметри сенсорів концентрації газу і показують вплив кожного параметра перетворювачів і автогенераторів на вихідну частоту сенсорів концентрації газу у порівнянні з розрахунками функцій перетворення з нелінійних еквівалентних схем пристроїв. У параметричних сенсорах концентрації газу з частотним виходом не потрібно застосовувати аналого-цифрові перетворювачі та операційні підсилювачі при подальшій обробці інформативних сигналів, що значно зменшує ціну інформаційно-вимірювальних приладів та систем, а також дозволяють передачу інформації на велику відстань при роботі автогенераторних сенсорів у НВЧ.

Ключові слова: концентрація газу, сенсор, диференційний від'ємний опір, автогенератор, газочутливий резистор, діод Шотткі.

Постановка проблеми. Подальший розвиток науки і техніки потребує конструкцій сенсорів концентрації газу на основі мікроелектронної технології, що значно покращує метрологічні показники сенсорів фізичних величин. Сенсори газу використовуються для аналізу широкого спектру газів в різноманітних галузях науки, промисловості та техніки. Їх використовують при вимірюванні атмосферного тиску, в космічних дослідженнях, в атомній енергетиці, в автомобільній техніці, у військовій техніці, побутовій техніці, для охорони оточуючого середовища [1, с. 36-43; 2; 3, с. 27-48; 4, с. 1-11; 5, с. 25-76; 6, с. 23-41; 7, с. 1-7; 8].

Основними величинами, що характеризують концентрацію газів є вагова концентрація, яка визначається відношенням маси вимірюваного газу до маси всієї суміші газів, в якій знаходиться вимірюваний газ. Молярною концентрацією вимірюваного газу називається відношення кількості молей цього газу до кількості молей всіх газів у суміші. Концентрація газів також вимірюється

у відсотках або в мільйонних частках, що характеризується величиною ррт, де $1 \text{ ррт} = 10^{-6} = 10^{-4}\%$. Вимірюється концентрація газів ґрунтується на основі парціального тиску. Під парціальним тиском вимірюваного у суміші розуміють тиск, під яким знаходився б цей газ, якби з суміші були вилучені всі інші гази, а об'єм та температура залишилися сталими [1, с. 89; 7, с. 374-379; 9, с. 267; 10, с. 197].

На деякий час майже в усіх галузях вимірювальної техніки використовуються виключно такі структури, в яких вихідною величиною є величина струму або напруги. Це призводить до виникнення значних похибок під час вимірювання, а також втрат інформаційних сигналів у каналі між виходом первинного перетворювача і входом підсилювально-перетворювальних блоків інформаційно-вимірювальних приладів та систем, малих потужностей вихідного сигналу перетворювачів, їх низькою завадостійкістю і швидкодією.

Усунути вищепераховані недоліки можливо на основі сенсорів газу з частотним виходом, які

працюють в режимі перетворення «концентрація газу-частота», що дозволяє в значній мірі покращити їхні метрологічні характеристики [11; 12].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Перспективним науковим напрямком у створенні сенсорів концентрації газу є дослідження в галузі сенсорів фізичних величин на основі напівпровідникових структур з диференційним від'ємним опором, що дозволяє створювати інформаційно-вимірвальні прилади з частотним виходом. Газові сенсори з частотним виходом поєднують простоту та універсальність, які мають вимірвальні пристрої з аналоговим вихідним сигналом, з точністю і заводськiстю, які характеризують вимірвальні пристрої з кодовим вихідним сигналом. Використання принципу перетворення «концентрація газу-частота» на основі напівпровідникових транзисторних структур з диференційним від'ємним опором суттєво знижує вартість вимірвальних пристроїв та систем, а також дозволяє значно зменшити масу та габарити сенсорів концентрації газу, підвищити чутливість та точність перетворень інформативного сигналу [13; 14; 15].

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка та дослідження сенсорів концентрації газу на основі напівпровідникових транзисторних структур, в яких газочутливі резистор і діод Шотткі виступають як первинні перетворювачі концентрації газу, так і активні елементи автогенераторних параметричних сенсорів, в яких втрати енергії в коливальних системах компенсуються енергією диференційного від'ємного опору. Для досягнення поставленої мети у даній роботі потрібно розв'язати такі задачі:

1) провести аналіз існуючих наукових джерел та обґрунтувати використання напівпровідникових транзисторних структур з диференційним від'ємним опором для побудови сенсорів концентрації газу;

2) розробити математичні моделі сенсорів концентрації газу, в яких враховано залежність газочутливих резисторів і діодів від дії концентрації газів та її вплив на вихідну частоту параметричних сенсорів;

3) отримати параметричну залежність функцій чутливості та перетворення автогенераторних сенсорів від концентрації газу;

4) зробити висновки з проведених досліджень.

Математичні моделі сенсорів газу. Сенсор концентрації газу з частотним виходом базується на основі напівпровідникової транзисторної структури з диференційним від'ємним опором, в якій газочутливим елементом є резистор (рис. 1).

Автогенераторний вимірвальний пристрій складається з біполярних транзисторів VT1 і VT2 з електронним і дірковим типом провідності, що забезпечує існування диференційного від'ємного опору на спадаючій ділянці вольт-амперної характеристики автогенераторного сенсора, резисторів R1-R4, конденсатора C1 та пасивної індуктивності L1. Коливальний контур пристрою утворений еквівалентною ємністю повного опору на електродах колектор-колектор біполярних транзисторів VT1 і VT2 та пасивної індуктивності L1.

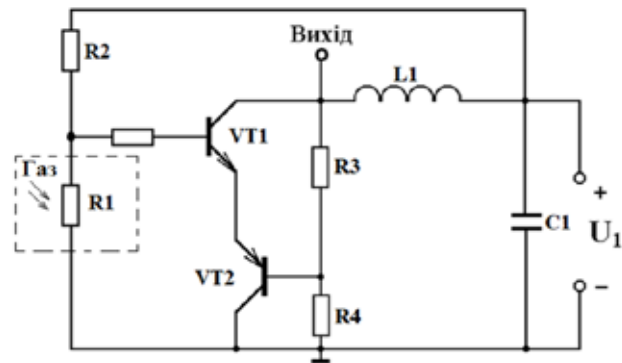


Рис. 1. Еквівалентна схема автогенераторного сенсора концентрації газу

На газочутливий резистор R1 діє концентрація газу, що приводить до зміни як еквівалентної ємності коливального контуру автогенераторного сенсора концентрації газу, так і диференційного від'ємного опору на виході вимірального пристрою, що викликає зміну резонансної частоти параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу. Втрати енергії в коливальному контурі параметричного автогенераторного сенсора компенсуються енергією диференційного від'ємного опору. Резистори R1-R4 здійснюють живлення параметричного автогенераторного сенсора за допомогою джерела постійної напруги U1. Конденсатор C1 запобігає протіканню змінного струму через блок живлення.

Перейдемо до розрахунку зміни параметрів газочутливого резистора R1 від дії на нього концентрації газу. Робота напівпровідникових сенсорів газу відбувається на основі явищ адсорбції газів поверхнею напівпровідника внаслідок дії некомпенсованого електричного поля на межі газ-тверде тіло [9, с. 211; 10, с. 125]. Процес адсорбції продовжується доти, поки між поверхнею напівпровідника і газовою фазою не встановиться рівновага.

При каталітичному окислюванні газами типу H_2 , CH_4 , C_2H_5OH , H_2S , що виступають як гази окислювачі, на поверхні напівпровідникового

матеріалу ефективно збільшується позитивна валентність адсорбційного комплексу, тому що при реакції на поверхню напівпровідника віддаються електрони. Внаслідок чого на поверхні напівпровідника збільшується концентрація електронів, що приводить до того, що в напівпровідникових матеріалах електронного типу провідності заряд виникає завдяки процесу збагачення, а в напівпровідниках діркового типу провідності завдяки збудженню [12].

В залежності від того, що зв'язують адсорбційні частинки з поверхню напівпровідникового матеріалу, має місце фізична та хімічна адсорбція. Фізична адсорбція визначається силами електростатичного походження (сили Ван-дер-Ваальса, сили електричного зображення) і енергія зв'язку в цьому випадку складає 0,01-0,1 еВ. Хімічна адсорбція виникає, коли адсорбовані молекули зв'язані з напівпровідниковим матеріалом силами обмінного характеру. У даному випадку енергія зв'язку у напівпровідниковому матеріалі при хемосорбції є значною та досягає 1 еВ. Таким чином, внаслідок адсорбції газу в напівпровідниковому матеріалі виникають додаткові поверхневі стани. Енергетичні рівні поверхневих станів в напівпровідниковому матеріалі розташовуються в забороненій зоні значно нижче дна зони провідності або вище валентної зони [20]. Поверхневий заряд в напівпровідниковому матеріалі притягує носії заряду з об'єму напівпровідника в приповерхневу область, що приводить до виникнення подвійного зарядженого шару. Наявність у напівпровідниковому матеріалі поверхневого заряду змінює його енергетичну схему у приповерхневій області.

На основі розгляду фізичних процесів у приповерхневій області напівпровідників при дії на них зовнішніх факторів, що приводить до появи надлишкових носіїв заряду, з розв'язку рівняння Пуассона отримана величина приповерхневого опору напівпровідникового матеріалу, яка описується формулою для напівпровідників n-типу провідності [10]

$$R_{sn} = \left[\frac{1}{2} q n_i \mu_{ns} L_D (\gamma^{-1} + \alpha)^{1/2} e^{-\frac{\varphi_{sn}(W)}{2}} \right]^{-1}, \quad (1)$$

а для напівпровідників p-типу провідності [19]

$$R_{sp} = \left[\frac{1}{2} q n_i \mu_{ps} L_D (\gamma + \alpha)^{1/2} e^{-\frac{\varphi_{sp}(W)}{2}} \right]^{-1}, \quad (2)$$

де μ_{ns}, μ_{ps} – рухливість електронів і дірок в об'ємі напівпровідникового матеріалу, q – заряд електрона, n_i – власна концентрація електронів в напівпровідниковому матеріалі,

$\alpha = \Delta n / n_i = \Delta p / n_i$ – безрозмірний коефіцієнт рівня інжекції носіїв заряду, L_D – довжина проникнення електричного поля заряду в поверхневий шар напівпровідника, $\gamma = (p_0 / n_0)^{1/2} = p_0 / n_i = n_i / n_0$ – безрозмірний коефіцієнт, що характеризує об'ємні властивості напівпровідникового матеріалу, $\varphi_{sp}(W) = q(E_{fp} - \psi_s) / kT$, $\varphi_{sn}(W) = q(\psi_s - E_{fn}) / kT$ – безрозмірний електростатичний поверхневий потенціал для діркового і електронного напівпровідників W – концентрація газу, E_{fp}, E_{fn} – рівень Фермі в дірковому і електронному напівпровідниках, ψ_s – поверхневий потенціал, k – стала Больцмана, T – абсолютна температура. Слід підкреслити, що формули (1) і (2) справедливі для значних величин поверхневих електростатичних потенціалів, тобто для надлишкових носіїв заряду на поверхні напівпровідників [10].

Зміна опору напівпровідника n-типу, на якій діє донорний газ W , має вигляд

$$\Delta R_{sn}(W) = \frac{dR_{sn}}{d\varphi_{sn}(W)} \Delta\varphi_{sn}(W). \quad (3)$$

Провівши диференціювання у формулі (3), отримуємо вираз

$$\Delta R_{sn}(W) = - \left[\frac{1}{q n_i \mu_{ns} L_D (\gamma^{-1} + \alpha)^{1/2}} \right] e^{-\frac{\varphi_{sn}(W)}{2}} \Delta\varphi_{sn}(W). \quad (4)$$

Знаючи залежність зміни опору напівпровідника газочутливого резистора, ми можемо перейти до визначення параметричної залежності вихідної частоти автогенераторного сенсора від зміни концентрації газу. При розв'язанні цієї задачі необхідно розглянуто перетворення енергії в газочутливому напівпровідниковому резисторі при дії на нього концентрації газу в енергію змінного електричного поля на вихідних клеммах автогенераторного сенсора концентрації газу. Для цього необхідно визначити коефіцієнт корисної дії сенсора концентрації газу. На першому етапі роботи пристрою енергія концентрації частинок газу перетворюється в енергію електричного поля на омичних електродах газочутливого резистора, яка в наступному етапі перетворюється в енергію змінного електричного поля параметричного автогенераторного сенсора, що зв'язана з еквівалентною ємністю C_{ekv} коливального контуру параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу. На підставі вище сказаного, коефіцієнт корисної дії автогенераторного сенсора визначається формулою

$$\eta = \frac{C_{ekv} U^2 q n_i \mu_{ns} L_D (\gamma^{-1} + \alpha)^{1/2} e^{-\frac{\varphi_{sn}(W)}{2}}}{4 I_p^2}, \quad (5)$$

де U_- – вихідна змінна напруга пристрою, t – період коливань вихідної змінної напруги без дії газу, I_p – струм через напівпровідниковий газочутливий резистор. З формули (5) визначається еквівалентна ємність коливального контуру параметричного автогенераторного сенсора

$$C_{ekv} = \frac{4\eta t I_p^2}{U_-^2 q n_i \mu_{ns} L_D (\gamma^{-1} + \alpha)^{1/2} e^{\frac{\varphi_{sm}(W)}{2}}}, \quad (6)$$

З другого боку, еквівалентну ємність C_{ekv} можливо визначити з формули резонансної частоти автогенератора, яка має вигляд [16]

$$F_0 = \frac{1}{2\pi R_g C_{ekv}} \sqrt{\frac{R_g^2 C_{ekv}}{L} - 1}, \quad (7)$$

де R_g – диференційний від'ємний опір коливального контуру параметричного автогенераторного сенсора, L – індуктивність контуру. З формули (7) отримуємо квадратне рівняння, на підставі якого визначаємо еквівалентну ємність C_{ekv}

$$(4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L) C_{ekv}^2 - R_g^2 C_{ekv} + L = 0. \quad (8)$$

Введемо позначення

$$a_1 = 4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L, \quad (9)$$

$$a_2 = R_g^2, \quad (10)$$

$$a_3 = L, \quad (11)$$

$$a_4 = C_{ekv} = \frac{4\eta t I_p^2}{U_-^2 q n_i \mu_{ns} L_D (\gamma^{-1} + \alpha)^{1/2} e^{\frac{\varphi_{sm}(W)}{2}}}. \quad (12)$$

Розв'язок квадратного рівняння (8) має вигляд

$$C_{ekv} = \frac{a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4a_1 a_3}}{2a_1}. \quad (13)$$

Прирівнявши вирази (6) і (13), отримуємо рівняння, з якого визначимо параметричну залежність вихідної частоти параметричного автогенераторного сенсора від дії концентрації газів на газочутливий резистор

$$a_1 = \frac{a_2}{a_4} - \frac{a_3}{a_4}. \quad (14)$$

Підставивши у рівняння (14) значення ($a_1 - a_4$) на основі виразів (9) – (12) і розв'язавши його, отримуємо функцію перетворення параметричного автогенераторного сенсора

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_-^2 q n_i \mu_{ns} L_D (\gamma^{-1} + \alpha)^{1/2} e^{\frac{\varphi_{sm}(W)}{2}}}{4\eta t I_p^2} - \frac{U_-^4 q^2 n_i^2 \mu_{ns}^2 L_D^2 (\gamma^{-1} + \alpha) e^{\varphi_{sm}(W)}}{16\eta^2 t^2 I_p^4 R_g^2} \right]^{1/2}. \quad (15)$$

Отримана формула (15) дозволяє простим шляхом розраховувати функцію перетворення сенсора, ніж складним шляхом з нелінійної еквівалентної схеми параметричного автогенераторного сенсора на основі розв'язку рівнянь Кірхгофа. На рис. 2 подано графічну залежність розрахункової і експе-

риментальної кривих функції перетворення параметричного автогенераторного сенсора при зміні концентрації водню (H_2) від 0 ppm до 2000 ppm.

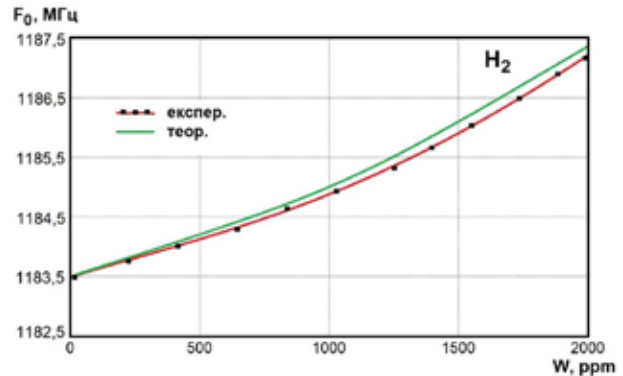


Рис. 2. Залежність функції перетворення від концентрації газу параметричного автогенераторного сенсора

Чутливість сенсора визначається похідною функції (15) за параметром концентрації газу W . Як показали експериментальні дослідження вихідна змінна напруга U_- параметричного автогенераторного сенсора також залежить від концентрації газу. Таким чином, функція перетворення параметричного автогенераторного сенсора з врахуванням залежності її складових від концентрації газу приймає вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[a_5 U_-^2(W) e^{\frac{\varphi_{sm}(W)}{2}} - a_6 U_-^4(W) e^{\varphi_{sm}(W)} \right]^{1/2}. \quad (16)$$

$$a_5 = \frac{q n_i \mu_{ns} L_D (\gamma^{-1} + \alpha)^{1/2}}{4\eta t I_p^2 L}. \quad (17)$$

$$a_6 = \frac{q^2 n_i^2 \mu_{ns}^2 L_D^2 (\gamma^{-1} + \alpha)}{16\eta^2 t^2 I_p^4 R_g^2}. \quad (18)$$

З врахуванням виразів (16) – (18), функція чутливості параметричного автогенераторного сенсора описується формулою

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} \left[a_5 U_-^2(W) e^{\frac{\varphi_{sm}(W)}{2}} - a_6 U_-^4(W) e^{\varphi_{sm}(W)} \right]^{1/2} \times \left[\left(2a_5 U_- (W) \frac{dU_- (W)}{dW} e^{\frac{\varphi_{sm}(W)}{2}} + \frac{1}{2} a_5 U_-^2 (W) \frac{d\varphi_{sm}(W)}{dW} e^{\frac{\varphi_{sm}(W)}{2}} \right) - \left(4a_6 U_-^3 (W) e^{\varphi_{sm}(W)} \frac{dU_- (W)}{dW} + a_6 U_-^4 (W) e^{\varphi_{sm}(W)} \frac{d\varphi_{sm}(W)}{dW} \right) \right]. \quad (19)$$

Графік розрахункової і експериментальної залежності функції чутливості параметричного автогенераторного сенсора концентрації при зміні концентрації водню (H_2) від 0 ppm до 2000 ppm подано на рис. 3.

Як видно з графіка (рис. 3) чутливість параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу змінюється від 1,48 кГц/ppm до 2,05 кГц/ppm в діапазоні частот від 1183,5 МГц до 1187,2 МГц.

Для підвищення чутливості сенсорів газу з частотним виходом в якості первинного газочутливого елемента необхідно обрати контакт метала

з напівпровідником, причому в якості метала обирається паладій, золото, платина. Такі контакти отримали назву діодів Шотткі. Їх висока чутливість до водневих сполук пояснюється тим, що зворотній струм діодів експоненціально залежить від висоти потенціального бар'єру Шотткі, який однозначно зв'язаний з концентрацією газових водневих сполук.

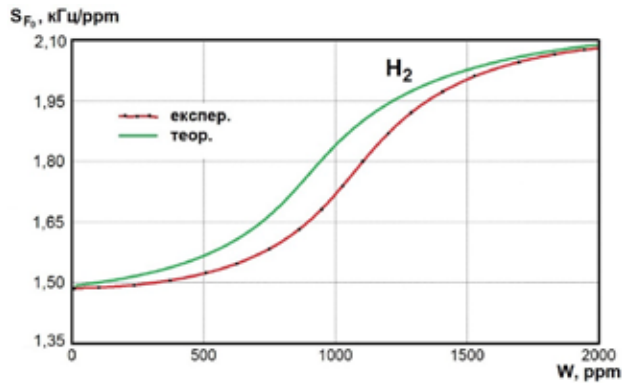


Рис. 3. Залежність функції чутливості параметричного автогенераторного сенсора від зміни концентрації газу

Електрична схема параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу з частотним виходом подано на рис. 4. Вона будується на основі мікроелектронної структури з диференціальним від'ємним опором, в якій газочутливим елементом є діод Шотткі VD1. Параметричний автогенераторний сенсор концентрації газу складається з біполярного транзистора VT1 і польового транзистора VT2, резистору R1, конденсатора C1 та пасивної індуктивності L1. Коливальний контур параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу утворений еквівалентною ємністю повного опору на електродах колектора біполярного транзистора VT1 і стоку польового транзистора VT2 та пасивної індуктивності L1 [17-19].

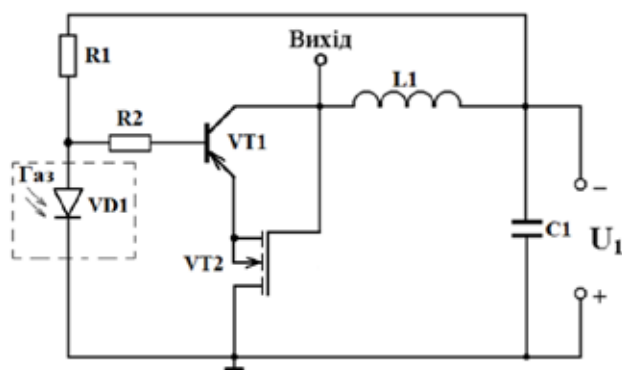


Рис. 4. Електрична схема параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу

На діод Шотткі діє концентрація газу, що приводить до зміни як еквівалентної ємності коливального контуру параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу, так і диференційного від'ємного опору на виході пристрою, що викликає зміну резонансної частоти. Втрати енергії в коливальному контурі параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу компенсуються енергією диференційного від'ємного опору. Через резистор R1 здійснюється живлення параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу за допомогою джерела постійної напруги U1. Конденсатор C1 запобігає проходженню змінного струму через блок живлення. Вольт-амперна характеристика параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу має спадну ділянку, що відповідає існуванню диференційного від'ємного опору на даному відрізку ВАХ.

Перейдемо до розрахунку зміни параметрів газочутливого діода Шотткі під дією газів донорів, таких як водень та інші. Вважається, що воднева чутливість пристроїв на основі діодів Шотткі залежить від дифузії водню через металевий контакт (паладій, платина, золото) з утворенням на межі розділу метал-напівпровідник дипольного шару, який впливає на висоту бар'єра Шотткі, а також зміна заряду поверхневих станів на межі розділу метал-напівпровідник у присутності водню [9, с. 322; 10, с. 158]. Розглянемо контакт напівпровідника р-типу з металом, коли робота виходу електронів з металу Φ_m більша роботи виходу електронів з напівпровідника Φ_s . В цьому випадку приконтактна область напівпровідника збагачується дірками, внаслідок переходу електронів з напівпровідника у метал. Це приводить до того, що метал заряджається негативними зарядами (електронами), а напівпровідник позитивними зарядами (дірками), доки ж встановиться електрична рівновага. Це означає, що енергетичні рівні Фермі у металі і напівпровіднику будуть мати однакові значення, при цьому провідність в приконтактній області напівпровідника збільшується.

Струм діода Шотткі описується формулою [20]

$$I = I_{zv} \left[e^{\frac{-qU}{nkT}} - 1 \right], \quad (20)$$

де I – прямий струм діода Шотткі, I_{zv} – зворотний струм насичення, U – пряма напруга, n – фактор ідеальності, k – стала Больцмана, T – абсолютна температура. Зворотний струм насичення діода має вигляд [20]

$$I_{zv} = \xi AT^2 e^{\frac{q\phi_k}{kT}}, \quad (21)$$

де ξ – імовірність тунелювання електронів через тонкий ізолюючий шар між металом і напівпровідником, якщо він технологічно існує, A – ефективна

константа Річардсона, ϕ_K – висота бар'єру Шотткі. З формули (21) видно, що зворотний струм діода експоненціально залежить від висоти бар'єру Шотткі ϕ_K , що однозначно зв'язаний з концентрацією газу, що діє на діод. В той час як струм стоку МДН-транзистора має квадратичну залежність від порогової напруги, а зсув напруги плоских зон МДН – конденсатора лінійно змінюється при зміні різниці робіт виходу електрона з металу та напівпровідника [1]. Для напівпровідників типу ZnO, SnO₂, Cu₂D, у яких концентрація основних носіїв заряду та їх рухливість, значно менше, ніж у класичних напівпровідниках Ge, Si, GaAs, тому необхідно використовувати дифузійну теорію випрямлення для діодів Шотткі, в яких зворотний струм описується виразом [20]

$$I_{zv} = (Sq\mu_p p_0 E_0) e^{\frac{q\phi_K(W)}{kT}}, \quad (22)$$

де S – площа перерізу діода, p_0 – концентрацію дірок у напівпровіднику, E_0 – напруженість електричного поля у діоді, μ_p – рухливість дірок, W – концентрація газу. В цьому випадку необхідно враховувати вплив електричного поля у напівпровіднику на рух носіїв заряду, тобто необхідно враховувати як дифузійну складову струму через діод, та і його дрейфову складову, з формули (22) витікає опір діода Шотткі при його зворотному стані роботи

$$R_{zv}(W) = \frac{U_{zv} e^{\frac{q\phi_K(W)}{kT}}}{Sq\mu_p p_0 E_0}. \quad (23)$$

Зміна опору при дії газу на діод Шотткі описується

$$\Delta R_{zv}(W) = \frac{dR_{zv}}{d\phi_K(W)} \Delta\phi_K(W). \quad (24)$$

Згідно (24), $\Delta R_{zv}(W)$ приймає вигляд

$$\Delta R_{zv}(W) = -\frac{U_{zv} q}{Sq\mu_p p_0 E_0 kT} e^{\frac{q\phi_K(W)}{kT}} \Delta\phi_K(W). \quad (25)$$

Визначивши залежність зміни опору газочутливого діода Шотткі від дії концентрації газу, перейдемо до розрахунку параметричної залежності вихідної частоти сенсора при дії газу. Ця залежність визначається аналогічним чином як і для сенсора з газочутливим резистором, яка розглянута вище. Вхідна потужність для автогенератора сенсора визначається на основі виразів (22) і (23)

$$P_{ex} = Sq\mu_p p_0 E_0 e^{\frac{q\phi_K(W)}{kT}}. \quad (26)$$

Вихідна потужність визначається формулою

$$P_{ex} = \frac{C_{ekv} U_{zv}^2}{2t}, \quad (27)$$

де t – період вихідної напруги без дії газу. Отже, виходячи з формули (26) і (27), коефіцієнт корисної дії сенсора дорівнює

$$\eta = \frac{C_{ekv} U_{zv}^2 e^{\frac{q\phi_K(W)}{kT}}}{2Stq\mu_p p_0 E_0 U_{zv}}. \quad (28)$$

З рівняння (28) визначається C_{ekv} , яка має вигляд

$$C_{ekv} = \frac{2\eta Stq\mu_p p_0 E_0 U_{zv}}{U_{zv}^2 e^{\frac{q\phi_K(W)}{kT}}}. \quad (29)$$

З другого боку, еквівалентна ємність C_{ekv} коливального контуру автогенератора зв'язана з резонансною частотою виразом (7). Підставивши у формулу (7) вираз (29) і провівши необхідні перетворення, отримуємо параметричну залежність вихідної резонансної частоти від концентрації газу, а також від параметрів газочутливого діода Шотткі і параметрів автогенератора

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_{zv}^2 e^{\frac{q\phi_K(W)}{kT}}}{2\eta Stq\mu_p p_0 E_0 U_{zv} L} - \frac{U_{zv}^4 e^{\frac{2q\phi_K(W)}{kT}}}{4\eta^2 S^2 t^2 q^2 \mu_p^2 p_0^2 E_0^2 U_{zv}^2 R_g^2} \right]^{1/2}. \quad (30)$$

Вираз (30) є функцією перетворення сенсора газу. На рис. 5 подано розрахункову і експериментальну залежності функції перетворення від дії концентрації водню (H₂) від 0 ppm до 2000 ppm на параметричний автогенераторний сенсор газу. Відносна похибка між розрахунками і експериментом складає 3,5 % при вимірюванні концентрації газу величиною 2000 ppm.

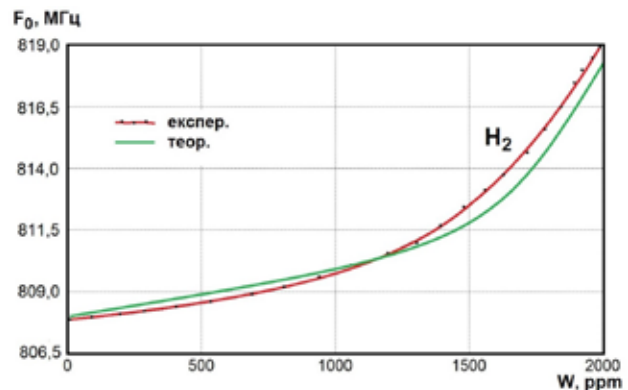


Рис. 5. Залежність функції перетворення параметричного автогенераторного сенсора від зміни концентрації газу

Як видно з графіка (рис. 5), вихідна частота параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу змінюється від 807,0 МГц до 819,0 МГц при зміні концентрації газу від 0 ppm до 2000 ppm.

Функція чутливості визначається на основі виразу (30), при цьому вважається, що вихідна напруга параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу також залежить від концентрації газу. Отже, функція чутливості описується виразом

$$S_{\epsilon} = \frac{1}{4\pi} \left[U^2(W) e^{-\frac{2\varphi_8(W)}{kT}} a_7 - U^4(W) e^{-\frac{2\varphi_8(W)}{kT}} a_8 \right]^{1/2} \times \left[\left(2U_-(W) \frac{dU_-(W)}{dW} e^{-\frac{2\varphi_8(W)}{kT}} a_7 - U^2(W) \left(\frac{q}{kT} \right) e^{-\frac{2\varphi_8(W)}{kT}} \frac{d\varphi_8(W)}{dW} a_7 \right) - \left(4U^2(W) \frac{dU_-(W)}{dW} e^{-\frac{2\varphi_8(W)}{kT}} a_8 - U^4(W) \left(\frac{2q}{kT} \right) \frac{d\varphi_8(W)}{dW} a_8 \right) \right] \quad (31)$$

де

$$a_7 = \frac{1}{2\eta S t q \mu_p p_0 E_0 U_{zv} L}, \quad (32)$$

$$a_8 = \frac{1}{4\eta^2 S^2 t^2 q^2 \mu_p^2 p_0^2 E_0^2 U_{zv}^2 R_g^2}. \quad (33)$$

На рис. 6 подано розрахункову та експериментальну залежності функції чутливості від концентрації газу параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу.

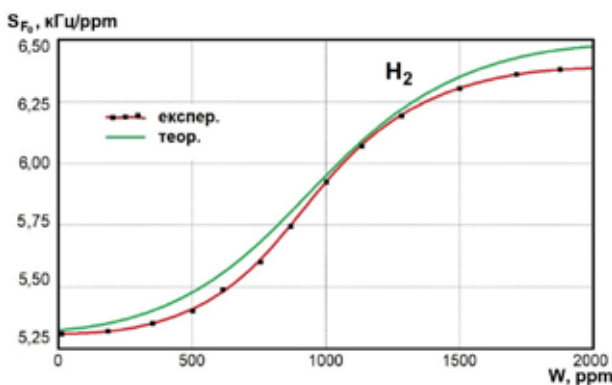


Рис. 6. Залежність функції чутливості від концентрації газу

Як видно з графіка (рис. 6), чутливість параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу змінювалась від 5,31 кГц/ppm до 6,35 кГц/ppm в діапазоні зміни концентрації газу від 0 ppm до 2000 ppm.

Частотний діапазон параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу з частотним виходом базується на основі напівпровідникової транзисторної структури з диференційним від'ємним опором, в якій газочутливим елементом є резистор вибраний 1180 МГц. Діапазон даних частот застосовується для обладнання, що працює в частотному діапазоні від 1050 МГц до 1350 МГц (бездротова аудіо та відеоапаратура, бездротове відеоспостереження) [21].

Експериментальні дослідження розроблених пристроїв проведено за допомогою аналізатора радіочастотного спектру Arinst SSA TG-LC. На рис. 7 представлено радіочастотний спектр параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу з частотним виходом, який базується на основі напівпровідникової транзисторної структури з диференційним від'ємним опором, в якому газочутливим елементом є резистор, частота передачі складає 1183,6 МГц.

Частотний діапазон параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу з частотним виходом, в якому газочутливим елементом є діод Шоттки вибраний в LTE-800 Downlink. Радіо-

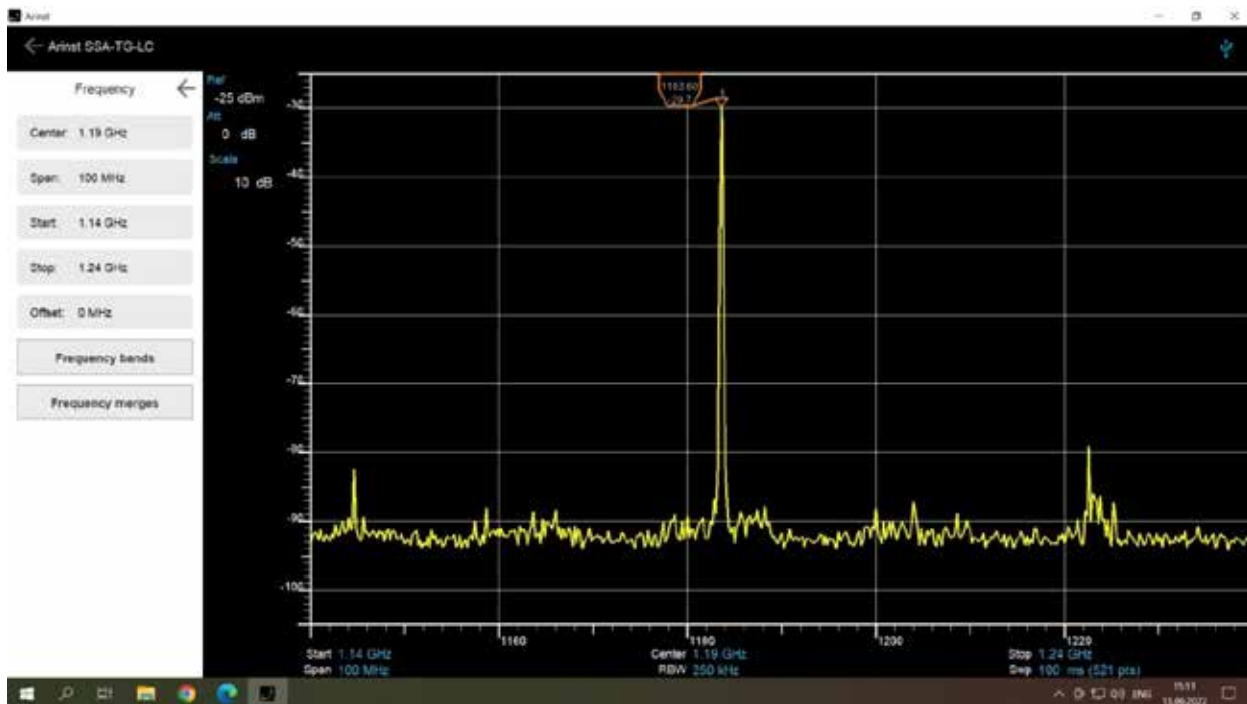


Рис. 7. Спектр параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу з частотним виходом і газочутливим резистивним елементом

частотний діапазон 3GPP B20 LTE (800 МГц) є другим за популярністю діапазоном, який використовують оператори мобільного зв'язку для розгортання мереж LTE, а також добре підходить для широкого охоплення в регіональних умовах для покриття всередині будівель технології Інтернет речей: NB-IoT (LTE Cat-NB1). Використання радіочастотного спектру 800 МГц допомагає операторам мобільного зв'язку швидко запуснути послуги LTE в конкретному застосуванні та задовольнити вимоги ринку [21, с.409-433; 22, с. 5-18].

На рис. 8 представлено радіочастотний спектр параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу з частотним виходом, в якому газочутливим елементом є діод Шотткі в діапазоні LTE-800 Downlink, частота передачі складає 807,0 МГц.

Висновки

1. Запропоновано параметричні автогенераторні сенсори концентрації газу на основі транзисторних напівпровідникових структур з диференціальним від'ємним опором з газочутливими елементами на базі резистора і діода Шотткі, причому газочутливі елементи є активними елементами схем автогенераторів, що спрощує конструкцію сенсорів газу.

2. На основі розгляду фізичних процесів, які протікають у газочутливих елементах і автогенераторних перетворювачах, розроблено математичні моделі сенсорів концентрації газу, за допо-

могою яких отримано параметричні залежності функцій чутливості і перетворення. Доведено, що основний внесок у зміну функцій перетворення і чутливості вносить зміна концентрації газу, що в свою чергу викликає зміну еквівалентної ємності та диференційного від'ємного опору у коливальній системі автогенераторних сенсорів концентрації газу, що змінює вихідну частоту перетворювачів фізичних величин. Чутливість сенсорів концентрації газу змінюється від 1,48 кГц/ppm до 6,35 кГц/ppm при зміні концентрації газу від 0 ppm до 2000 ppm.

3. Отримані аналітичні вирази, які описують параметричні залежності функцій чутливості та перетворення, які дозволяють значно простіше розраховувати основні параметри сенсорів концентрації газу і показують вплив кожного параметра перетворювачів і автогенераторів на вихідну частоту сенсорів концентрації газу у порівнянні з розрахунками функцій перетворення з нелінійних еквівалентних схем пристроїв. У параметричних сенсорах концентрації газу з частотним виходом не потрібно застосовувати аналого-цифрові перетворювачі та операційні підсилювачі при подальшій обробці інформативних сигналів, що значно зменшує ціну інформаційно-вимірювальних приладів та систем, а також дозволяють передачу інформації на велику відстань при роботі автогенераторних сенсорів у НВЧ.

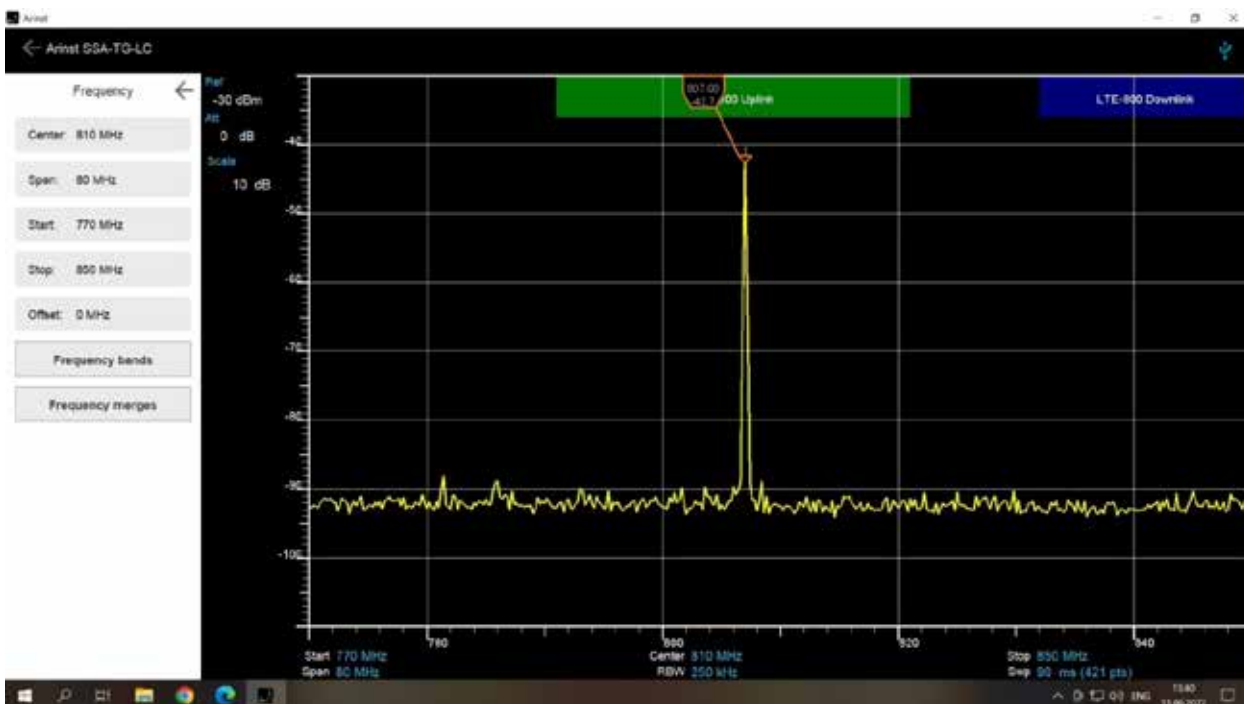


Рис. 8. Спектр параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу з частотним виходом базується на основі напівпровідникової транзисторної структури з диференціальним від'ємним опором, в якому газочутливим елементом є діод Шотткі

Список літератури:

1. Sensors and actuators : technology and applications / edited by Princeton Brown. New York: Library Press, 2017. 268 p.
2. Lei Hang, Wenquan Jin, Hyeon Sik Yoon, Yong Geun Hong and Do Hyeun Kim. Design and Implementation of a Sensor-Cloud Platform for Physical Sensor Management on CoT Environments // *Electronics* 2018, 7, 140; pp. 1–25.
3. Sabrie Soloman. *Sensors. Handbook*. New York: McGraw-Hill Companies, 2010. 1352 p.
4. Jacob Fraden. *Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications*. Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 2010. 681 p.
5. Sergey Y. Yurish. *Sensors and Applications in Measuring and Automation Control Systems*, (Book Series: *Advances in Sensors: Reviews*, Vol. 4). IFSA Publishing, S.L. (Barcelona, Spain). 2016. 507 p.
6. *Electronics for Sensors*. Edited by Giuseppe Ferri, Gianluca Barile and Alfiero Leoni E. MDPI: Basel, Switzerland, 2021. 274 p.
7. Schaumburg H. *Sensoren*. Stuttgart: Teubner, 1992. 517 p.
8. Thomas Allsop, Ronald Neal. *Application and Implementation of Optic Fibre Sensors for Gas Detection* // *Sensors* 2021, 21, 6755.
9. Волькинштейн Ф.Ф. *Физико-химия поверхности полупроводников*. М.: Наука, 1973. 400 с.
10. Ржанов А.В. *Электронные процессы на поверхности полупроводников*. М.: Наука, 1971. 480 с.
11. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Ilchuk D.R., Pastushenko G.A. Solid State Radio-Measuring Optical-Frequency Transducer of Gas Flow Rate // *Physics and chemistry of solid state*. V. 22, No. 2 (2021). P. 224–232.
12. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S. Frequency Transducers of Gas Concentration Based on Transistor Structures with Negative Differential Resistance. Chapter 12. In: Sidorenko A., Hahn H. (eds) *Functional Nanostructures and Sensors for CBRN Defence and Environmental Safety and Security*. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht. 18 March 2020, pp. 161–184.
13. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Osadchuk I.O. Modern world tendencies in the development of science. Chapters 19. Gas concentration transducers with frequency output signal based on reactive properties of semiconductor structures with negative differential resistance. Volume 2 : [coll.] monograph. Published by Science Publishing. LP22772, 20-22 Wenlock Road, London, United Kingdom, 2019. 308 p. Pp. 271–285. ISBN 978-1-9993071-4-1
14. Gassner S., Schaller R., Eberl M., Koblinski C., Essing S., et all. Anodically Bonded Photoacoustic Transducer: An Approach towards Wafer-Level Optical Gas Sensors. *Sensors* 2022, 22, 685.
15. Allsop T., Neal R. A Review: Application and Implementation of Optic Fibre Sensors for Gas Detection. *Sensors* 2021, 21, 6755.
16. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Seletskaya O.O. Frequency transducer of gas concentration in transistor structure with negative resistance // *Радиотехника. Всеукраїнський міжведомственный научно-технічний збірник. Тематический випуск «Інформаційна безпека»*. Вип. 191. 2017. С. 195–202. ISSN 0485-8972
17. Osadchuk O., Osadchuk V., Semenov A., Osadchuk I., Semenova O., Baraban S., Prytula M. Radiomeasuring Optical-Frequency Converters Based on Reactive Properties of Transistor Structures with Negative Differential Resistance. Chapter 12. In: Radivilova T., Ageyev D., Kryvinska N. (eds) *Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol. 48, Springer, Cham. 21 June 2020, pp. 229-261.
18. Osadchuk V.S., Osadchuk A.V. Reactive properties of transistors and transistor circuits. Vinnitsa: "Universum-Vinnitsa", 1999. 275 p.
19. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A. Mathematical Model of the Generator on the Basis of Transistor Structure with the Negative Differential Resistance // *Proceedings of the 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*. Lviv-Slavske, Ukraine February 20–24, 2018. ISBN (IEEE): 978-1-5386-2555-2. Paper 33.
20. Sze, S.M., Kwok, K.Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley-Interscience: Hoboken, USA, 2007. Pp. 435–455.
21. Leonhard Korowajczuk. *LTE, WIMAX and WLAN Network Design, Optimization and Performance Analysis*. John Wiley & Sons Ltd, United Kingdom. 2011. 784 p.
22. Chuzo Ninagawa. *IoT Communication Performance Analysis*. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2022. 218 p.

Osadchuk I.O. MICROELECTRONIC AUTOGENERATOR GAS CONCENTRATION SENSORS WITH FREQUENCY OUTPUT

Self-oscillating gas concentration sensors with a frequency output based on transistor semiconductor structures with differential negative resistance with gas-sensitive elements based on a resistor and a Schottky diode are proposed, moreover, gas-sensitive elements are active elements of self-oscillating transducer circuits, which greatly simplifies the design of gas concentration sensors.

Based on the consideration of the physical processes occurring in gas sensitive elements and autogenerator transducers, mathematical models of gas concentration sensors have been developed, with the help of which parametric dependences of the sensitivity and conversion functions have been obtained. It has been proven that the main contribution to the change in the conversion and sensitivity functions is made by a change in the gas concentration, which in turn causes a change in the equivalent capacitance and differential negative resistance in the oscillatory system of self-oscillating gas concentration sensors, which changes the initial frequency of the physical quantity converters. The sensitivity of the gas concentration sensors varies from 1.48 kHz/ppm to 6.35 kHz/ppm when the gas concentration changes from 0 to 2000 ppm.

Analytical expressions are obtained that describe the parametric dependences of the sensitivity and conversion functions, which make it much easier to calculate the main parameters of gas concentration sensors and show the effect of each parameter of transducers and self-oscillators on the initial frequency of gas concentration sensors in comparison with calculations of conversion functions using nonlinear equivalent circuits of devices. In parametric gas concentration sensors with a frequency output, it is not necessary to use analog-to-digital converters and operational amplifiers in the subsequent processing of informative signals, which significantly reduces the price of information-measuring instruments and systems, and also allows information to be transmitted over a long distance when self-oscillating sensors operate in microwave.

Key words: *gas concentration, sensor, differential negative resistance, self-oscillator, gas sensitive resistor, Schottky diode.*