https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-17
УДК 621.38

ОСАДЧУК Ярослав
Вінницький національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0002-5472-0797
e-mail: osadchuk.j93@gmail.com
ОСАДЧУК Олександр
Вінницький національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0001-6662-9141
e-mail: osadchuk.av69@gmail.com
ОСАДЧУК Володимир
Вінницький національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0002-3142-3642
e-mail: osadchuk.vs38@gmail.com

НАДВИСОКОЧАСТОТНІ АВТОГЕНЕРАТОРНІ МІКРОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ ГАЗУ

Запропоновано надвисокочастотні автогенераторні мікроелектронні сенсори газу на основі транзисторних структур з від'ємним диференційним опором з первинними газочутливими елементами на базі МДН-ємнісної структури і МДН-польового транзистора з ізольованим каналом, причому первинні газочутливі елементи є активними елементами схем автогенераторів сенсорів, що спрощує конструкцію приладів.

Виходячи з розгляду фізичних процесів у первинних газочутливих елементах і автогенераторах сенсорів, розроблено математичні моделі перетворювачів газу, на основі яких отримано параметричні залежності функцій перетворення і чутливості. Показано, що основний внесок у функції перетворення і чутливості вносить зміна концентрації газу. Це викликає зміну еквівалентної ємності і від'ємного диференційного опору автогенераторів сенсорів, що, у свою чергу, змінює вихідну частоту приладів. Чутливість сенсорів газу змінюється від 0,55 кГц/ppm до 1,63 кГц/ppm в діапазоні вимірюваної концентрації від 0 ppm до 2000 ppm.

Отримані параметричні залежності функцій перетворення і чутливості показують можливість значно простіше отримувати основні характеристики сенсорів і наочно демонструють вплив кожного параметра первинних перетворювачів і параметрів автогенераторів на вихідну частоту сенсорів у порівнянні з розрахунками функцій перетворення і чутливості з еквівалентних схем приладів на основі розв'язку рівнянь Кірхгофа.

У сенсорах газу з частотним виходом непотрібні аналого-цифрові перетворювачі і підсилювальні пристрої при подальшій обробці інформаційних сигналів, що здешевлює інформаційно-вимірювальну апаратуру, окрім того, можлива передача інформації на відстань при роботі сенсорів у діапазоні надвисоких частот.

Ключові слова: сенсор, газ, від'ємний диференційний опір, автогенератор, частота, газочутливі МДН-структури.

OSADCHUK Iaroslav, OSADCHUK Oleksandr, OSADCHUK Volodymyr
Vinnytsia National Technical University

HIGH-FREQUENCY AUTOGENERATOR MICROELECTRONIC GAS SENSORS

Ultra-high-frequency autogenerator microelectronic gas sensors based on transistor structures with negative differential resistance with primary gas-sensitive elements based on an MOS capacitive structure and an MOS field-effect transistor with an isolated channel are proposed, and the primary gas-sensitive elements are active elements of sensor autogenerator circuits, which simplifies the design of devices .

Based on the consideration of physical processes in the primary gas-sensitive elements and autogenerators of sensors, mathematical models of gas transducers were developed, on the basis of which parametric dependences of conversion and sensitivity functions were obtained. It is shown that the main contribution to the conversion and sensitivity functions is made by the change in gas concentration. This causes a change in the equivalent capacitance and negative differential resistance of the autogenerators of the sensors, which, in turn, changes the output frequency of the devices. The sensitivity of gas sensors varies from 0.55 kHz/ppm to 1.63 kHz/ppm in the measured concentration range from 0 ppm to 2000 ppm.

The obtained parametric dependences of the conversion and sensitivity functions show the possibility of obtaining the main characteristics of the sensors much more easily and clearly demonstrate the influence of each parameter of the primary converters and autogenerator parameters on the output frequency of the sensors in comparison with the calculations of the conversion and sensitivity functions from the equivalent circuits of the devices based on the solution of the Kirchhoff equations.

Gas sensors with frequency output do not require analog-digital converters and amplifiers for further processing of information signals, which reduces the cost of information and measurement equipment, in addition, it is possible to transmit information over a distance when the sensors work in the ultra-high frequency range.

Keywords: sensor, gas, negative differential resistance, autogenerator, frequency, gas-sensitive MOS-structures.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Вимірювання концентрацій різноманітних газів потрібно майже в усіх сферах діяльності людей. Це стосується таких галузей виробництва, як хімічна промисловість, металургія, енергетика, сільське господарство, авіаційна та космічна техніка, медицина, дослідження довкілля, що потребує створення

приладів вимірювання концентрацій газів з високими метрологічними показниками. Це можливо досягнути на основі мікроелектронної та наноелектронної технологій [1, 2, 3, 4-8].

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 міліонних частках, що характеризуються величиною ppm, де 1 ppm=10^{-6}=10^{-4}%. Вимірювання концентрації газів ґрунтується на основі парціального тиску. Під парціальним тиском вимірюваного газу 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, 9, 10].

На даний час в усіх галузях вимірювальної техніки використовуються виключно такі структури, в яких вихідною величиною є величина струму або напруги. Це приводить до значних похибок вимірювання, втрат інформації в каналі між виходом перетворювача і входом підсилювально-перетворювальної апаратури, малих потужностей вихідного сигналу перетворювачів, їх низькою завадостійкістю і швидкодією.

Усунути вищеперераховані недоліки можливо на основі сенсорів газу з частотним вихідним сигналом, які працюють у режимі перетворення «концентрація газу-частота», що дає можливість значно покращити їх метрологічні показники [11,12].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Перспективним науковим напрямком у створенні сенсорів газу є дослідження в області сенсорів на основі мікроелектронних структур з від'ємним диференційним опором, що дозволяє створювати прилади з частотним вихідним сигналом. Газові сенсори з частотним виходом поєднують простоту і універсальність, які мають аналогові прилади, з точністю і завадостійкістю, що характеризують сенсори з кодовим виходом. Застосування принципу перетворення «концентрація газу-частота» на основі мікроелектронних транзисторних структур з від'ємним диференційним опором суттєво знижують собівартість інформаційно-вимірювальних систем, дозволяють значно зменшити масогабаритні показники сенсорів газу, підвищити точність і чутливість перетворення інформаційного сигналу [13-15].

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Метою роботи є створення сенсорів газу на основі мікроелектронних транзисторних структур, в яких газочутливі МДН (метал-діелектрик-напівпровідник) – ємність і МДН-транзистор виступають як первинні перетворювачі концентрації газу, так і як активні елементи автогенераторів, в яких втрати енергії в коливальних системах компенсуються енергією від'ємного диференційного опору. Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі задачі:

1) провести аналіз існуючих наукових джерел та обґрунтувати використання мікроелектронних транзисторних структур з від'ємним диференційним опором для побудови сенсорів газу;
2) розробити математичні моделі сенсорів газу, в яких враховано залежності газочутливих МДН-ємностей і МДН-транзисторів від дії концентрації газів та їх вплив на вихідну частоту сенсорів;
3) отримати параметричну залежність функцій перетворення та чутливості сенсорів від концентрації газу;
4) зробити висновки з проведених досліджень.

Математичні моделі сенсорів газу

Сенсор газу з частотним вихідним сигналом будується на основі мікроелектронної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором, в якій газочутливим елементом є МДН-ємність (рис.1)

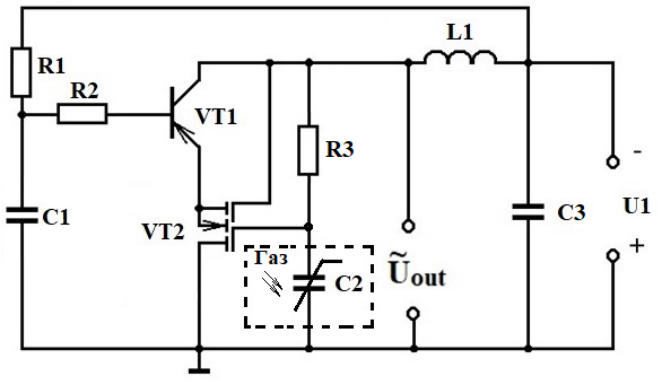

Рис. 1. Електрична схема сенсора газу

Автогенераторний пристрій складається з двозатворного польового транзистора з ізольованим каналом VT2 і біполярного транзистора VT1 з електронним і дірковим типами провідності, що забезпечує існування від'ємного диференційного опору на спадній ділянці вольт-амперної характеристики сенсора, опорів R1-R3. Ємностей C1-C3 та індуктивності L1. Коливальний контур пристрою утворений еквівалентною ємністю повного опору на електродах стік-колектор транзисторів VT2 і VT1, від'ємного диференційного опору та індуктивності L1. На газочутливу МДН-ємність C2 діє концентрація газу, що приводить до зміни як еквівалентної ємності коливального контуру, такі від'ємного диференційного опору на виході пристрою, що викликає зміну резонансної частоти автогенератора сенсора. Втрати енергії в коливальному контурі компенсуються енергією від'ємного диференційного опору. Опори R1-R3 здійснюють живлення сенсора за допомогою джерела постійної напруги U1. Ємність C3 запобігає проходженню змінного високочастотного струму через джерело напруги U1.

Перейдемо до розрахунку зміни параметрів газочутливої МДН-ємності від дії на неї концентрації газу. Принцип її дії оснований на залежності ємності напівпровідника від дії концентрації газу на металічний контакт, що приводить до зміни заряду на межі розділу S_iO_2 і ємності C_D напівпровідника, яка залежить від дії концентрації газу W. Таким чином, загальна ємність C_0 описується формулою [2, 16]

$$C_0 = \frac{C_D(W)C_i}{C_D(W)+C_i} \ . \tag{1}$$

Ємність C_i шару ізолятора S_iO_2 від дії газу не залежить. З формули (1) найдемо зміну загальної ємності C_0 від дії концентрації газу, яка в загальному плані має вигляд

$$\Delta C_0(W) = \frac{dC_D}{dW}\Delta W \ . \tag{2}$$

Провівши диференціювання у формулі (2), отримуємо вираз

$$\Delta C_0(W) = \left[C_i(C_i + C_D(W))^{-1}\frac{dC_D(W)}{dW} - C_i(C_i + C_D(W))^{-2}C_D(W)\frac{dC_D(W)}{dW} \right]\Delta W \ . \tag{3}$$

Для отримання залежності (3) необхідно визначити зміну ємності напівпровідника C_D від концентрації газу. В загальному вигляді повна диференціальна ємність напівпровідника описується формулою [17]

$$C_D = \frac{\partial Q_S}{\partial \varphi_S} = \frac{\varepsilon_S}{\sqrt{2}L_D}\cdot\frac{\left[1-\frac{q\varphi_S(W)}{kT}+\frac{n_{p0}}{p_{p0}}\left(e^{\frac{q\varphi_S(W)}{kT}}-1\right)\right]}{F\left(\frac{q\varphi_S(W)}{kT},\frac{n_{p0}}{p_{n0}}\right)} \ , \tag{4}$$

Q_S – об'ємний заряд, віднесений до одиниці площі межі розділу S_iO_2-S_i, $\varphi_S(W)$ – поверхневий електростатичний потенціал, ε_S – діелектрична стала напівпровідника, $L_D = \sqrt{\frac{kT\varepsilon_S}{g^2 p_{po}}}$ – дебаєвська довжина електронів, k – стала Больцмана, T – абсолютна температура, функція $F\left(\frac{q\varphi_S(W)}{kT},\frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)$ має вигляд [17]

$$F\left(\frac{q\varphi_S(W)}{kT},\frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) = \left[\left(e^{-\frac{q\varphi_S(W)}{kT}}+\frac{q\varphi_S(W)}{kT}-1\right)+\frac{n_{p0}}{p_{p0}}\left(e^{\frac{q\varphi_S(W)}{kT}}-\frac{q\varphi_S(W)}{kT}-1\right)\right]^{1/2} \ , \tag{5}$$

де p_{p0} і n_{p0} – рівноважні щільності дірок і електронів в об'ємі напівпровідника, який в нашому розгляді є р – типу. При роботі МДН-структури в режимі акумуляції ємність напівпровідника приблизно дорівнює [17]

$$C_D(W) = -\frac{\varepsilon_S}{\sqrt{2}L_D} e^{\frac{q\varphi_S(W)}{2kT}} \ . \tag{6}$$

В цьому випадку $C_D(W)$ значно більше C_i, тому повна ємність структури дорівнює C_i. В режимі роботи плоских зон, коли $\varphi_S = 0$ ємність напівпровідника описується формулою [17]

$$C_D(W) = \frac{\varepsilon_S}{L_D} \ . \tag{7}$$

В режимі роботи збіднення МДН-структури $C_D(W)$ приблизно має вигляд [17]

$$C_D(W) = \frac{\varepsilon_S}{\sqrt{2}L_D} \left(\frac{kT}{q\varphi_s(w)}\right)^{\frac{1}{2}} \ . \tag{8}$$

В режимі сильної інверсії роботи МДН-структури ємність напівпровідника структури описується приблизним виразом [17]

$$C_D(W) = \frac{\varepsilon_S}{\sqrt{2}L_D} \left(\frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)^{\frac{1}{2}} e^{\frac{q\varphi_S(W)}{2kT}} \ . \tag{9}$$

Таким чином, підставивши вирази (6)-(9) у формулу (3), отримуємо залежність повної ємності МДН-структури від зміни концентрації газу.

Газочутлива МДН-ємність з паладієвим заслоном виготовляється за звичайною МДН-технологією. Шар паладію товщиною 10 нм наносять методом розпилення електронним пучком. Проблема дрейфу МДН-ємностей з діелектриком SiO_2 вирішується шляхом додаткового введення тонкого шару Al_2O_3 завдовжки 10 нм, між паладієм та двоокисом кремнію [2, 4].

Визначивши залежність зміни повної ємності газочутливої МДН-структури від дії газу, перейдемо до визначення параметричної залежності вихідної частоти сенсора від зміни концентрації газу. При вирішені цієї задачі необхідно розглянути перетворення енергії в газочутливій МДН-структурі при дії на неї концентрації газу в енергію змінного електричного поля на виході сенсора. Для цього визначимо коефіцієнт корисної дії приладу. На першому етапі роботи сенсора енергія концентрації частинок газу перетворюється в енергію постійного електричного поля на електродах газочутливої МДН-ємності, яка в наступному етапі перетворюється в енергію змінного електричного поля, що зв'язана з еквівалентною ємністю C_{ekv} коливального контуру автогенератора сенсора. Коефіцієнт корисної дії визначається виразом

$$\eta = \frac{P_{вих}}{P_{вх}} \ . \tag{10}$$

де $P_{вх}$ – вхідна потужність визначається формулою

$$P_{вх} = \frac{C_0 U_0^2}{2t_1} \ , \tag{11}$$

де U_0 – постійна напруга на газочутливій МДН-структурі, t_1 – час зміни цієї напруги при дії певної концентрації газу, S – площа межі заряду Si-SiO_2. Вихідна потужність приладу визначається виразом

$$P_{вих} = \frac{C_{екв} U_{\sim}^2}{2t_2} \ , \tag{12}$$

де $U_{\sim}$ – вихідна зміна напруга сенсора, t_2 – період коливань вихідної напруги. Таким чином коефіцієнт корисної дії приладу має вигляд

$$\eta = \frac{C_{екв} U_{\sim}^2 t_1}{t_2 C_0 U_0^2} \ , \tag{13}$$

З формули (13) визначимо еквівалентну ємність коливального контуру автогенератора

$$C_{екв} = \frac{\eta t_2 C_0 U_0^2}{U_{\sim}^2 t_1} \ , \tag{14}$$

З другого боку, еквівалентна ємність $C_{екв}$ можливо визначити з формули резонансної частоти автогенератора, яка описується виразом [18, 19]

$$F_0 = \frac{1}{2\pi R_g C_{екв}} \sqrt{\frac{R_g^2 C_{екв}}{L} - 1} \ , \tag{15}$$

де R_g – від'ємний диференційний опір в коливальному контурі, L – індуктивність коливального контуру. З виразу (15) отримуємо квадратне рівняння, з якого визначаємо $C_{екв}$

$$\left(4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L\right) C_{екв}^2 - R_g^2 C_{екв} + L = 0 \ . \tag{16}$$

Введемо наступні позначення

$$d_1 = 4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L \ , \tag{17}$$

$$d_2 = R_g^2 \ , \tag{18}$$

$$d_3 = L \ , \tag{19}$$

$$d_4 = C_{екв} = \frac{\eta t_2 C_0 U_0^2}{U_{\sim}^2 t_1} \ . \tag{20}$$

Розв'язок квадратного рівняння (16) має вигляд

$$C_{екв} = \frac{d_2 \pm \sqrt{d_2^2 - 4 d_1 d_3}}{2 d_1} . \tag{21}$$

Прирівнявши вирази (13) і (21), отримуємо рівняння, з якого визначимо параметричну залежність вихідної частоти сенсора від дії концентрації газів на газочутливу МДН-структуру

$$d_1 = \frac{d_2}{d_4} - \frac{d_3}{d_4^2} \ . \tag{22}$$

Підставивши у рівняння (22) значення ($d_1 - d_4$) на основі виразів (17) – (20) і розв'язавши його, отримуємо функцію перетворення

$$F_0 = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{U_{\sim}^2 t_1}{\eta t_2 C_0 U_0^2 L} - \frac{U_{\sim}^4 t_1^2}{\eta^2 C_0^2 U_0^4 t_2^2 R_g^2}\right]^{1/2} \ . \tag{23}$$

Отримана формула (23) дозволяє простим шляхом розрахувати функцію перетворення сенсора, ніж складним шляхом з еквівалентної схеми сенсора на основі розв'язку рівнянь Кірхгофа. На рис.2 подано графічну залежність розрахункової і експериментальної кривих функції перетворення сенсора.

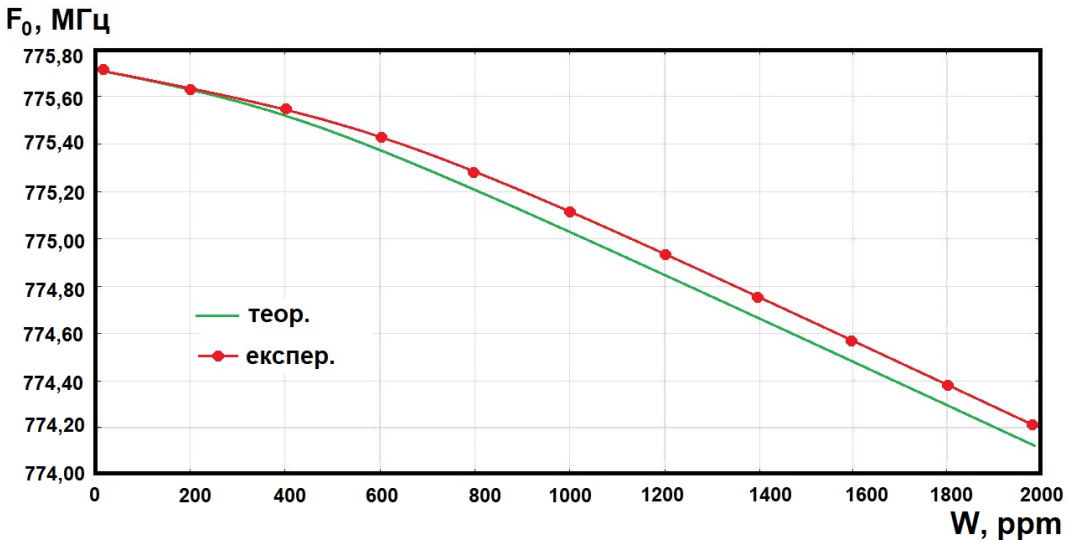

Рис. 2. Залежність функції перетворення від концентрації газу

Чутливість сенсора визначається похідною функції (23) за параметром концентрації газу W . Як показали експериментальні дослідження, вихідна змінна напруга $U_{\sim}$ також залежить від концентрації газу. Таким чином, функція перетворення з врахуванням залежності її складових від концентрації газу приймає вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi}\left[U_{\sim}^2(W) C_0^{-1}(W) U_0^{-2}(W) d_5 - U_{\sim}^4(W) C_0^{-2}(W) U_0^{-4}(W) d_6\right]^{1/2} \ . \tag{24}$$

де

$$d_5 = \frac{t_1}{\eta t_2 L} , \tag{25}$$

$$d_6 = \frac{t_1^2}{\eta^2 t_2^2 R_g^2}\ , \tag{26}$$

З врахуванням виразів (24) – (26), функція чутливості описується формулою

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi}\left[U_{\sim}^2(W)C_0^{-1}(W)U_0^{-2}(W)d_5 - U_{\sim}^4(W)C_0^{-2}(W)U_0^{-4}(W)d_6\right]^{-1/2} \times$$
$$\times\left\{\left[2U_{\sim}(W)\frac{dU_{\sim}(W)}{dW}U_0^{-2}(W) + U_{\sim}^2(W)\left(-C_0^{-2}(W)\frac{dC_0(W)}{dW}U_0^{-2}(W) - 2U_0^{-3}(W)\frac{dU_0(W)}{dW}C_0^{-1}(W)\right)\right]d_5 - \right. \tag{27}$$
$$\left. -\left[4U_{\sim}^3(W)\frac{dU_{\sim}(W)}{dW}C_0^{-2}(W)U_0^{-4}(W) + U_0^4(W)\left(-2C_0^{-3}(W)\frac{dC_0(W)}{dW}U_0^{-4}(W) - 4U_0^{-5}(W)\frac{dU_0(W)}{dW}C_0^{-2}(W)\right)\right]d_6\right\}.$$

Графік розрахункової і експериментальної залежності функції чутливості подано на рис.3.

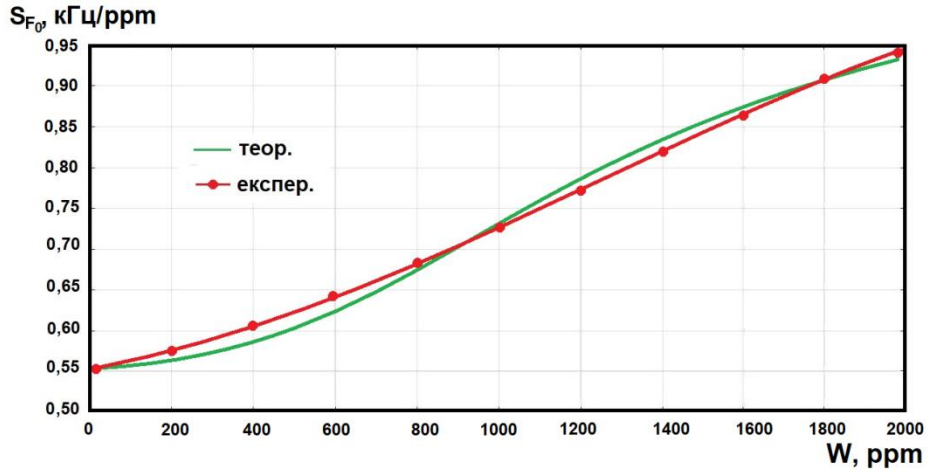

Рис. 3. Залежність функції чутливості від концентрації газу

Перейдемо до викладу досліджень характеристик мікроелектронного автогенераторного сенсору газу, в якому первинним газочутливим елементом є польовий транзистор з ізольованим каналом, причому транзистор також є активним елементом автогенератора, що значно спрощує конструкцію сенсорів газу. Електричну схему сенсора подано на рис. 4.

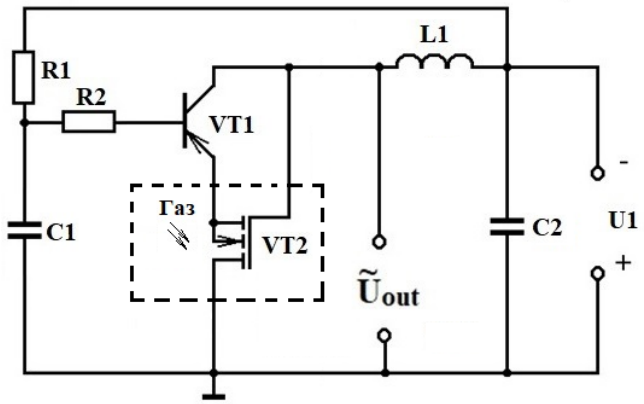

Рис. 4. Електрична схема сенсора газу

Вона представляє собою інтегральну гібридну схему, що складається з біполярного транзистора VT1 і газочутливого польового транзистора з ізольованим каналом VT2. На електродах колектор-стік транзисторів VT1 і VT2 існує повний опір, активна складова якого має вид'ємне значення, а реактивна ємнісний характер. Підключення індуктивності L1 до колектора VT1 створює коливальний контур, в якому втрати енергії компенсуються енергією від'ємного диференційного опору. За допомогою джерела постійної напруги U1 і опору R1 встановлюється робоча точка автогенератора на спадній ділянці вольт-амперної характеристики сенсора.

Електричне коло R1C1 створює додатний зворотний зв'язок виходу пристрою з входом, що забезпечує додатковий від'ємний диференційний опір у коливальній системі автогенератора. Ємність С2 запобігає проходженню змінного струму через джерело напруги U1. При дії газу на польовий транзистор VT2 відбувається зміна ємнісної складової і від'ємного диференційного опору в коливальній системі автогенератора, що викликає зміну вихідної частоти сенсора.

Перейдемо до визначення залежності опору каналу польового транзистора VT2 від дії концентрації газу, оскільки змінюється величина струму стоку через канал, завдяки зміні порогової напруги транзистора. Газ діє на металічний заслон транзистора, який створено із паладію. Величина струму стоку у лінійному режимі роботи транзистора описується виразом [16, 17]

$$I_{C_{нас}} = \frac{Z\mu_n C_0}{L_{кан}}\left[\left(U_з - U_{пор}\right)^{1/2} U_C - \frac{1}{2}U_C^2\right]^2, \tag{28}$$

де Z – ширина каналу польового транзистора, $L_{кан}$ – довжина каналу польового транзистора, C_0 – величина ємності підзаслонного діелектрика на одиницю площі, μ_n – рухливість електронів у каналі, $U_з$ – напруга на заслоні відповідно до витоку, $U_{пор}$ – порогова напруга утворення інверсного каналу, U_C – напруга на стоці відповідно до витоку. Опір каналу польового газочутливого транзистора в залежності від концентрації газу W має вигляд

$$R_{кан}(W) = \frac{U_C L_{кан}}{Z\mu_n C_0\left[\left(U_з(W) - U_{пор}(W)\right)U_C - \frac{1}{2}U_C^2\right]}, \tag{29}$$

Зміна опору каналу газочутливого польового транзистора при дії на нього газу згідно (29) описується формулою

$$\Delta R_{кан}(W) = \frac{\partial R_{кан}}{\partial U_з(W)}\Delta U_з(W) + \frac{\partial R_{кан}}{\partial U_{пор}(W)}\Delta U_{пор}(W). \tag{30}$$

У відповідності з виразом (30), $\Delta R_{кан}(W)$ приймає вигляд

$$\begin{aligned}\Delta R_{кан}(W) = \frac{U_C L_{кан}}{Z\mu_n C_0}\Bigg\{-\left[\left(U_з(W) - U_{пор}(W)\right)U_C - \frac{1}{2}U_C^2\right]^{-2} U_C \Delta U_з(W) + \\ + \left[\left(U_з(W) - U_{пор}(W)\right)U_C - \frac{1}{2}U_C\right]^{-2} U_C \Delta U_{пор}(W)\Bigg\}.\end{aligned} \tag{31}$$

Визначивши залежність зміни опору каналу газочутливого польового транзистора 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 газочутливою МДН-ємністю, яка розглянута вище. Вхідна потужність для автогенератора визначається на основі виразів (28) і (29)

$$P_{вх} = \frac{Z\mu_n C_0 U_C}{L_{кан}}\left[\left(U_з - U_{пор}\right)U_C - \frac{1}{2}U_C^2\right]. \tag{32}$$

Вихідна потужність автогенератора визначається формулою

$$P_{вих} = \frac{C_{екв}U_{\sim}^2}{2t}. \tag{33}$$

Виходячи з формул (32) і (33), коефіцієнт корисної дії сенсора газу дорівнює

$$\eta = \frac{C_{екв}U_{\sim}^2 L_{кан}}{2tZ\mu_n C_0 U_C\left[\left(U_з - U_{пор}\right)U_C - \frac{1}{2}U_C^2\right]}. \tag{34}$$

З рівняння (34) визначається $C_{екв}$, яка має вигляд

$$C_{екв} = \frac{2\eta t Z\mu_n C_0 U_C\left[\left(U_з - U_{пор}\right)U_C - \frac{1}{2}U_C^2\right]}{U_{\sim}^2 L_{кан}}. \tag{35}$$

З другого боку, еквівалентна ємність $C_{екв}$ коливального контуру автогенератора зв'язана з резонансною частотою виразом (15). Підставивши у формулу (15) вираз (35) і провівши необхідні перетворення, отримуємо параметричну залежність вихідної резонансної частоти від концентрації газу, а також від параметрів газочутливого польового транзистора і параметрів автогенератора

$$F_0 = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{U_{\sim}^2 L_{кан}}{2\eta t Z \mu_n C_0 U_C\left[\left(U_з - U_{пор}\right)U_C - \frac{1}{2}U_C^2\right]L} - \frac{U_{\sim}^4 L_{кан}^2}{4\eta^2 t^2 Z^2 \mu_n^2 C_0^2 U_C^2\left[\left(U_з - U_{пор}\right)U_C - \frac{1}{2}U_C^2\right]^2 R_g^2}\right]^{1/2}. \quad (36)$$

Формула (36) є функцією перетворення сенсора газу. На рис.5 подано розрахункову і експериментальну залежність функції перетворення від дії концентрації газу на сенсор.

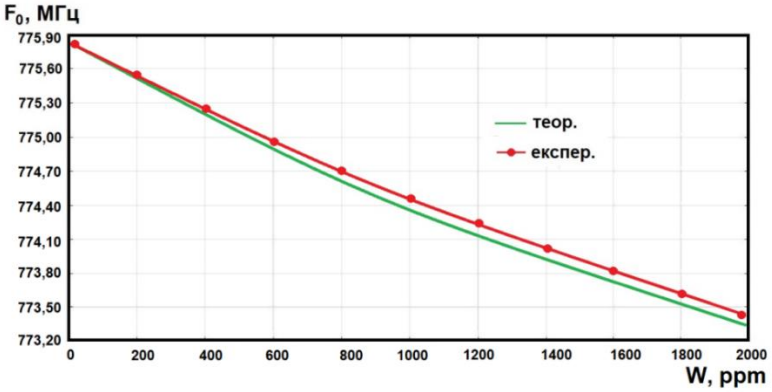

Рис. 5. Залежність функції перетворення від концентрації газу

Функція чутливості сенсора визначається на основі виразу (36), при цьому вважається, що вихідна змінна напруга приладу також залежить від концентрації газу. Таким чином, функцію перетворення (36) в залежності її складових від концентрації газу можна представити у вигляді

$$F_0 = \frac{1}{2\pi}\left[U_{\sim}^2(W)\left[\left(U_з(W) - U_{пор}(W)\right)U_C - \frac{1}{2}U_C^2\right]^{-1} d_7 - U_{\sim}^4(W)\left[\left(U_з(W) - U_{пор}(W)\right)U_C - \frac{1}{2}U_C^2\right]^{-2} d_8\right]^{1/2}, \quad (37)$$

де

$$d_7 = \frac{L_{кан}}{2\eta t U_C Z \mu_n C_0 L}, \quad (38)$$

$$d_8 = \frac{L_{кан}^2}{4\eta^2 t^2 U_C^2 Z^2 \mu_n^2 C_0^2 R_g^2}, \quad (39)$$

Виконавши диференціювання функції (37) за параметром концентрації газу W, отримаємо функцію чутливості сенсора,яка описується рівнянням:

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi}\left[U_{\sim}^2(W)\left[\left(U_з(W) - U_{пор}(W)\right)U_C - \frac{1}{2}U_C^2\right]^{-1} d_7 - U_{\sim}^4(W)\left[\left(U_з(W) - U_{пор}(W)\right)U_C - \frac{1}{2}U_C^2\right]^{-2} d_8\right]^{-1/2} \times$$
$$\times\left\{2U_{\sim}(W)\frac{dU_{\sim}(W)}{dW}\left[\left(U_з(W) - U_{пор}(W)\right)U_C - \frac{1}{2}U_C^2\right]^{-1} d_7 + U_{\sim}^2(W)\left(\left[\left(U_з(W) - U_{пор}(W)\right)U_C - \frac{1}{2}U_C^2\right]^{-2} U_C \frac{dU_з(W)}{dW} - \right.\right. \quad (40)$$
$$\left.\left. - \left[\left(U_з(W) - U_{пор}(W)\right)U_C - \frac{1}{2}U_C^2\right]^{-2} U_C \frac{dU_{пор}(W)}{dW}\right) d_8\right\}.$$

На рис. 6 подано розрахункову у експериментальну залежності функції чутливості від дії газу на сенсор.

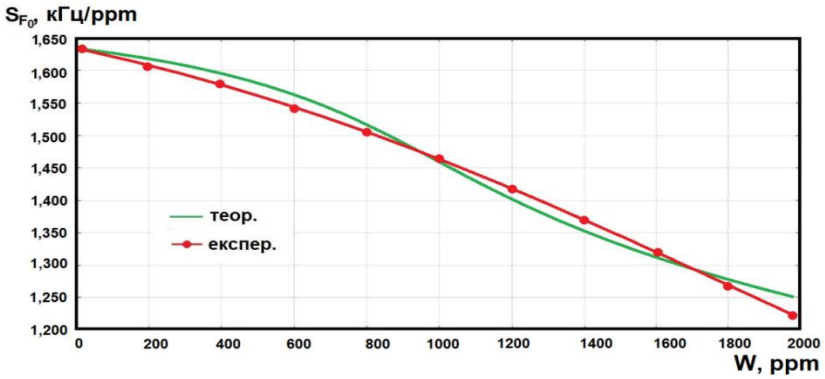

Рис. 6. Залежність функції чутливості від концентрації газу

Як видно з графіка (рис.6), чутливість сенсора складає від 1,22 кГц/ppm до 1,63 кГц/ppm в діапазоні вимірюваної концентрації від 0 ppm до 2000 ppm.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

1. Запропоновано надвисокочастотні автогенераторні мікроелектронні сенсори газу на основі транзисторних структур з від'ємним диференційним опором з первинними газочутливими елементами МДН-ємнісних структур і МДН-польових транзисторів з ізольованим каналом, причому первинні газочутливі елементи є активними елементами схем автогенераторів, що спрощує конструкцію сенсорів.

2. Виходячи з розгляду фізичних процесів у первинних газочутливих елементах і автогенераторах сенсорів, розроблено математичні моделі перетворювачів газу, на основі яких отримано параметричні залежності функцій перетворення і чутливості. Показано, що основний внесок у функції перетворення і чутливості вносить зміна концентрації газу. Це викликає зміну еквівалентної ємності і диференційного від'ємного опору автогенераторів сенсорів, що, у свою чергу, змінює вихідну частоту сенсорів газу. Чутливість сенсорів газу змінюється від 0,55 кГц/ppm до 1,63 кГц/ppm в діапазоні вимірюваної концентрації від 0 ppm до 2000 ppm.

3. Отримані параметричні залежності функцій перетворення і чутливості показують можливість значно простіше отримувати основні характеристики сенсорів і наочно демонструють вплив кожного параметра первинних перетворювачів і параметрів автогенераторів на вихідну частоту сенсорів у порівнянні з розрахунками функцій перетворення і чутливості з еквівалентних схем приладів на основі розв'язку рівнянь Кірхгофа. У сенсорах газу з частотним виходом не потрібні аналого-цифрові перетворювачі і підсилювальні пристрої при подальшій обробці інформаційних сигналів, що здешевлює інформаційно-вимірювальну апаратуру, окрім того можлива передача інформації на відстань при роботі сенсорів в діапазоні надвисоких частот.

Література

1. 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; –P.1-25. doi:10.3390/electronics7080140

2. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: в 3 т. / Вуйцік Вальдемар, Готра Зенон Юрійович, Григор'єв Віталій Вікторович, Каліта Влодзімеж, Мельник Олег Миронович, Потенцкі Єжи; за ред. З. Ю. Готри; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т "Львів. політехніка", Т.1. 2002. – 475 с.

3. Борисов О.В., Яганов П.О. Мікроелектронні сенсори на основі кремнієвих p-n переходів. - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. –174 с.

4. Giuseppe Ferri, Gianluca Barile, Alfiero Leoni. Electronics for Sensors. MDPI. Basel, Switzerland, 2021. –274 p.

5. Sensors and actuators: technology and applications / edited by Princeton Brown. New York: Library Press. 2017. –268 p.

6. Baek, J., Yin, D., Liu, N. et al. A highly sensitive chemical gas detecting transistor based on highly crystalline CVD-grown $MoSe_2$ films // Nano Res. 10, 1861–1871 (2017). https://doi.org/10.1007/s12274-016-1291-7

7. Saravanan Yuvaraja, *et al.*,"Fully Integrated Organic Field-Effect Transistor Platform to Detect and to Quantify NO2 Gas // Physica status solidi (RRL)–Rapid Research Letters, 2020, 2000086.

8. Razvan Pascu, Florea Craciunoiu, Gheorghe Pristavu, Gheorghe Brezeanu, Mihaela Kusko. Oxide trap states versus gas sensing in SiC-MOS capacitors – The effect of N- and P- based post oxidation processes // Sensors and Actuators B: Chemical, Volume 245, 2017, –P. 911-922.

9. Partha Bhattacharyya, Debanjan Acharyya, Koushik Dutta. Resistive and Capacitive Measurement of Nano-Structured Gas Sensors. Environmental Nanotechnology: Volume 2. Springer International Publishing. Cham, 2019. –P.25-62.

10. Wonjun Shin, Yujeong Jeong, Mingyu Kim, Jungsoo Lee, Ryun-Han Koo and all. Recovery of off-state stress-induced damage in FET-type gas sensor using self-curing method // Discover Nano, 2023, 18:24. –P. 1-10. https://doi.org/10.1186/s11671-023-03801-z

11. 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.

12. Осадчук Я.О. Мікроелектронні автогенераторні сенсори концентрації газу з частотним виходом // Вчені записки ТНУ імені В.І.Вернадського. Серія:Технічні науки. Том 34(73), №2 2023. –С.266-275.

13. Осадчук О.В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О. Математичне моделювання фізичного механізму утворення об'ємного приповерхневого заряду в напівпровідниках для інтелектуальних частотних сенсорів концентрації газу // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. 2019. Том 38. №2. –С.107-112.

14. 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.

15. Осадчук О.В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О. Вплив газореактивного ефекту первинних напівпровідникових сенсорів газу на вихідну частоту автогенераторних перетворювачів // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І.Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 30 (69). №3. Частина 2., 2019. –С.223-227.

16. Marius Grundmann. The Physics of Semiconductors. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. – 701 p.

17. Sze, S.M., Kwok, K.Ng. Physics of Semiconductor Devices. Wiley-Interscience: Hoboken, USA, 2007, –832 p.

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 Radioelecrtronics, Telecommunications and Computer Engineering. Lviv-Slavske, Ukraine February 20-24, 2018. ISBN (IEEE): 978-1-5386-2555-2. Paper 33.

References

1. 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; –P.1-25. doi:10.3390/electronics7080140

2. Microelectronic sensors of physical quantities: in 3 volumes / Vuytsik Valdemar, Gotra Zenon Yuriyovych, Grigoriev Vitaly Viktorovych, Kalita Vlodzimezh, Melnyk Oleg Myronovych, Potentski Yezhi; under the editorship Z. Yu. Gotry; Ministry of Education and Science of Ukraine, National Lviv Polytechnic University, T.1. 2002. – 475 p.

3. Borysov O.V., Yaganov P.O. Microelectronic sensors based on silicon p-n junctions. - Kyiv: KPI named after Igor Sikorskyi, 2017. –174 p.

4. Giuseppe Ferri, Gianluca Barile, Alfiero Leoni. Electronics for Sensors. MDPI. Basel, Switzerland, 2021. –274 p.

5. Sensors and actuators: technology and applications / edited by Princeton Brown. New York: Library Press. 2017. –268 p.

6. Baek, J., Yin, D., Liu, N. et al. A highly sensitive chemical gas detecting transistor based on highly crystalline CVD-grown $MoSe_2$ films // Nano Res. 10, 1861–1871 (2017). https://doi.org/10.1007/s12274-016-1291-7

7. Saravanan Yuvaraja, *et al.*,"Fully Integrated Organic Field-Effect Transistor Platform to Detect and to Quantify NO2 Gas // Physica status solidi (RRL)–Rapid Research Letters, 2020, 2000086.

8. Razvan Pascu, Florea Craciunoiu, Gheorghe Pristavu, Gheorghe Brezeanu, Mihaela Kusko. Oxide trap states versus gas sensing in SiC-MOS capacitors – The effect of N- and P- based post oxidation processes // Sensors and Actuators B: Chemical, Volume 245, 2017, –P. 911-922.

9. Partha Bhattacharyya, Debanjan Acharyya, Koushik Dutta. Resistive and Capacitive Measurement of Nano-Structured Gas Sensors. Environmental Nanotechnology: Volume 2. Springer International Publishing. Cham, 2019. –P.25-62.

10. Wonjun Shin, Yujeong Jeong, Mingyu Kim, Jungsoo Lee, Ryun-Han Koo and all. Recovery of off-state stress-induced damage in FET-type gas sensor using self-curing method // Discover Nano, 2023, 18:24. –P. 1-10. https://doi.org/10.1186/s11671-023-03801-z

11. 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.

12. Osadchuk Ya.O. Microelectronic autogenerator sensors of gas concentration with frequency output // Scientific notes of TNU named after VI Vernadskyi. Series: Technical sciences. Volume 34(73), No. 2 2023. – P. 266-275.

13. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Osadchuk Ya.O. Mathematical modeling of the physical mechanism of volume near-surface charge formation in semiconductors for intelligent frequency sensors of gas concentration // Optical-electronic information-energy technologies. 2019. Volume 38. No. 2. - P. 107-112.

14. 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.

15. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Osadchuk Ya.O. The influence of the gas-reactive effect of primary semiconductor gas sensors on the output frequency of autogenerator converters // Scientific Notes of the Tavri National University named after V. I. Vernadskyi. Series: Technical sciences. Volume 30 (69). No. 3. Part 2., 2019. – P.223-227.

16. Marius Grundmann. The Physics of Semiconductors. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. –701 p.

17. Sze, S.M., Kwok, K.Ng. Physics of Semiconductor Devices. Wiley-Interscience: Hoboken, USA, 2007, –832 p.

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 Radioelecrtronics, Telecommunications and Computer Engineering. Lviv-Slavske, Ukraine February 20-24, 2018. ISBN (IEEE): 978-1-5386-2555-2. Paper 33.