

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.382

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/17>

Осадчук О.В.

Вінницький національний технічний університет

Осадчук В.С.

Вінницький національний технічний університет

Осадчук Я.О.

Вінницький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОГЕНЕРАТОРНИХ ПАРАМЕТРИЧНИХ ОПТИЧНИХ СЕНСОРІВ

Запропоновано автогенераторні параметричні сенсори оптичного випромінювання на основі транзисторних мікроелектронних структур з від'ємним диференціальним опором з первинними фоточутливими елементами типу фоторезистора і фотодіода, причому первинні фоточутливі перетворювачі є активними елементами схем автогенераторів, що спрощує конструкцію сенсорів.

Виходячи з розгляду фізичних процесів у первинних фоточутливих елементах і автогенераторах, розроблено математичні моделі оптичних сенсорів, на основі яких отримано функції перетворення і чутливості. Показано, що основний внесок у зміну функції перетворення вносить зміна оптичної потужності. Це викликає зміну еквівалентної ємності і від'ємного диференціального опору коливальної системи автогенераторів сенсорів, що, у свою чергу, змінює вихідну частоту приладів. Чутливість оптичних сенсорів змінюється від 125,2 кГц/мкВт/см² до 134,8 кГц/мкВт/см² в діапазоні вимірюваної оптичної потужності від 0 мкВт/см² до 90 мкВт/см².

Отримані параметричні залежності функцій перетворення оптичних сенсорів показують можливість значно простіше отримувати основні характеристики сенсорів і наочно демонструють вплив кожного параметра первинних перетворювачів і елементів автогенераторів на вихідну частоту сенсорів у порівнянні з розрахунками функцій перетворення з еквівалентних схем пристроїв на основі рівнянь Кірхгофа. У фоточутливих сенсорах 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 у надвисоких частотах.

Ключові слова: оптичний сенсор, від'ємний диференціальний опір, автогенератор, фоторезистор, фотодіод.

Постановка проблеми. Вимірювання оптичного випромінювання потрібно в багатьох галузях виробництва і техніки, зокрема, у мікроелектронній технології, сонячній енергетиці, космічних дослідженнях, військовій техніці, ядерній енергетиці, дослідженні довкілля, що потребує створенню вимірювальних приладів високої точності та чутливості, стабільності і швидкодії, а також дослідження впливів всієї сукупності факторів, що супроводжують вимірювальний процес [1, с. 322-346; 2, с. 99-125; 3, с. 307-371; 4, с. 105-132; 5, с. 417-457; 6; 7; 8].

Для вимірювання інтенсивності світла на даний час використовуються напівпровідни-

кові або мікроелектронні сенсори, що виконанні у вигляді мікроелектронних схем з фоторезисторами, фотодіодами та фототранзисторами. Вони знаходять широке застосування у системах автоматики як пристрої вмикання освітлення вулиць, тунелів, приміщень, світлових вогнів аеропортів, сигналізатори вогню та диму, системами стеження за положеннями об'єкта, фотореле різних промислових автоматів, тощо [1, с. 322-346; 9; 10].

На теперішній час більшість фоточутливих сенсорів мають вихідний сигнал у вигляді струму або напруги, що приводить до значних похибок вимірювання внаслідок втрат інформації в каналі

між виходом сенсора і входом підсилювально-перетворювальної апаратури, малих потужностей вихідного сигналу сенсорів, їх низької завадостійкості і швидкодії [11; 12, с. 3-14, с. 61-77, с. 87-96].

Усунути вище перераховані недоліки можливо на основі автогенераторних параметричних сенсорів, що працюють в режимі перетворення «оптичне випромінювання – частота», що дає можливість значно покращити їх метрологічні показники [13, с. 112-182; 14].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Одним з перспективних наукових напрямків у створенні фоточутливих сенсорів є дослідження в області сенсорів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором, що дозволяє створювати прилади з частотним вихідним сигналом. Автогенераторні параметричні фоточутливі сенсори поєднують простоту і універсальність, які мають аналогові пристрої, з точністю і завадостійкістю, що характеризують прилади з кодовим виходом. Застосування принципу перетворення «оптичне випромінювання - частота» на основі автогенераторних параметричних фоточутливих сенсорів суттєво зменшує собівартість інформаційно-вимірювальних систем, дозволяє значно зменшити масогабаритні показники фоточутливих сенсорів, підвищити точність і чутливість перетворення оптичного сигналу у частоту [15, с. 35-75; 16; 17; 18; 19; 20].

Постановка завдання. Метою роботи є створення та дослідження оптичних сенсорів на основі мікроелектронних транзисторних структур, в яких фоторезистор і фотодіод виступають як первинні перетворювачі оптичного сигналу, так і як активні елементи автогенераторів в яких втрачає енергію в коливальній системі компенсуються енергією від'ємного диференціального опору, що дозволяє перетворити оптичний сигнал у частоту. 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 диференціальним опором для побудови оптичних сенсорів з частотним виходом;

2) розробити математичні моделі оптичних сенсорів, в яких враховано залежність параметрів фоточутливих елементів від дії світла та їх вплив на вихідну частоту сенсора;

3) отримати аналітичні вирази параметричної залежності вихідної частоти та чутливості сенсора від дії оптичного сигналу;

4) зробити висновки з проведених досліджень.

Математичні моделі оптичних сенсорів.

Оптичний сенсор з частотним вихідним сигналом будується на основі мікроелектронної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, в якій фоточутливим елементом є фоторезистор. На рис. 1 представлена схема мікроелектронного оптичного сенсора. Вона складається з біполярного транзистора VT1 і арсенід галієвого польового транзистора VT2. На електродах колектор–стік існує від'ємний диференціальний опір, що відповідає спадній ділянці вольт-амперної характеристики сенсора. Оптичний сенсор живиться від джерела постійної напруги U1. Ланцюг R1C1 створює додатковий зворотний додатний зв'язок виходу пристрою з входом. Через фоточутливий опір R1 здійснюється живлення бази біполярного транзистора VT2. Ємність C2 здійснює блокувальну роль, тобто захищає джерело постійної напруги U1 від змінних струмів.

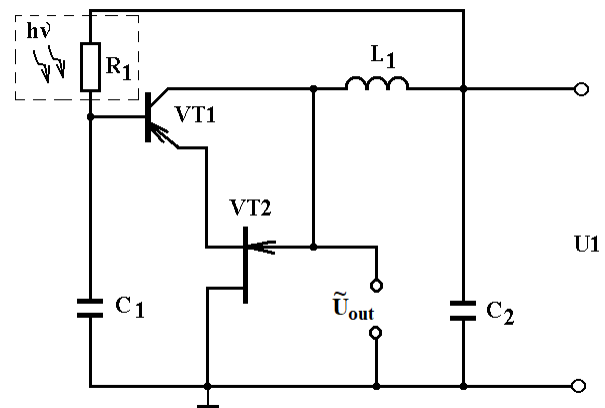


Рис. 1. Електрична схема мікроелектронного оптичного сенсора

Коливальний контур утворений пасивною індуктивністю L1 і ємністю повного опору, який існує на електродах колектора біполярного транзистора і стоку польового транзистора. Ділянка від'ємного опору лежить в області від 2В до 4В, що дає можливість регулювання його величиною за рахунок зміни джерела напруги U1. Під час дії світла на фоторезистор R1 здійснюється зміна активної та реактивної складової повного опору на електродах колектор – стік пристрою, що викликає зміну вихідної частоти оптичного сенсора. Фоточутливим елементом сенсора був фоторезистор типу PGM5516 [21, с. 37-44].

Перейдемо до розгляду залежності параметрів фоторезистора від дії на нього світла. Принцип дії фоторезистора ґрунтується на внутрішньому фотоелефекті. Світло, що падає на напівпровідник фоторезистора, частково поглинається в його об'ємі,

взаємодіючи з атомами кристалічної ґратки або домішок. Поглинання фоторезистором фотонів викликає збільшення провідності напівпровідника, приріст якої називають фотопровідністю. Існує два механізми поглинання фотонів – власний і домішковий. При власному механізмі поглинання фотонів відбувається перехід електронів з валентної зони у зону провідності, коли енергія фотонів дорівнює або більше ширини забороненої зони ($h\nu \geq E_g$). Домішковий механізм поглинання характеризується іонізацією донорного або акцепторного рівня, коли $h\nu > E_i$, де E_i – енергія іонізації домішкових рівнів. Найбільше поширення отримали фоторезистори на основі напівпровідників з власним поглинанням фотонів. Конструкція фоторезисторів складається з півки фоточутливого напівпровідникового матеріалу, який має два омичних контакти для включення їх у електричне коло. Фоторезистори не випрямні прилади, тому їх можна живити як постійним, так і змінним струмом.

Величина фотоструму через напівпровідник фоторезистора визначається формулою [22, с.56].

$$I_F = q \left[\eta_p \frac{\tau_p^f}{t_p} + \eta_n \frac{\tau_n^f}{t_n} \right] a \frac{\Phi}{h\nu} V, \quad (1)$$

де q – заряд електрона; η_p, η_n – квантовий вихід фотоіонізації дірок і електронів, відповідно; τ_p^f, τ_n^f – час життя фотодірок і фотоелектронів, відповідно; t_p, t_n – час дрейфу фотодірок і фотоелектронів під дією електричного поля до омичних контактів, відповідно; a – коефіцієнт поглинання фотонів, Φ – інтенсивність світла, $h\nu$ – енергія фотонів, V – об'єм фоторезистора. За умови, коли $n = p$, $\eta_p = \eta_n = \eta_i$, $\tau_p^f = \tau_n^f = \tau$, при введенні позначення

$$A = \tau \left[\frac{1}{t_p} + \frac{1}{t_n} \right], \quad (2)$$

де параметр A визначає коефіцієнт підсилення фоторезистора [22, с.56]. З врахуванням виразу (2), формула (1) приймає вигляд

$$I_F = q\eta_i A \frac{\Phi}{h\nu} aV, \quad (3)$$

На основі виразу (3), опір фоторезистора, який залежить від дії світла, описується формулою

$$R(\Phi) = \frac{U_\Phi h\nu}{q\eta_i A\Phi aV}, \quad (4)$$

де U_Φ – напруга на фоторезисторі. Згідно формули (4) зміна опору $R(\Phi)$ при дії світла описується виразами

$$\Delta R(\Phi) = \frac{\partial R}{\partial A} \Delta A(\Phi) + \frac{\partial R}{\partial a} \Delta a(\Phi) + \frac{\partial R}{\partial \eta_i} \Delta \eta_i(\Phi) + \frac{\partial R}{\partial \Phi} \Delta \Phi, \quad (5)$$

Провівши диференціювання складових у формулі (5), отримаємо рівняння

$$\Delta R(\Phi) = -\frac{U_\Phi h\nu}{q\eta_i A^2 \Phi aV} \Delta A(\Phi) - \frac{U_\Phi h\nu}{q\eta_i A \Phi a^2 V} \Delta a(\Phi) - \frac{U_\Phi h\nu}{q\eta_i^2 A \Phi aV} \Delta \eta_i(\Phi) - \frac{U_\Phi h\nu}{q\eta_i A \Phi^2 aV} \Delta \Phi. \quad (6)$$

Формула (6) дозволяє аналітично визначити зміну опору фоторезистора від дії оптичного випромінювання.

Перейдемо до визначення параметричної залежності вихідної частоти оптичного сенсора від параметрів фоторезистора і параметрів автогенератора. При вирішенні цієї задачі необхідно розглянути перетворення енергії оптичного випромінювання в енергію змінного електричного поля на виході сенсора. Для цього визначимо коефіцієнт корисної дії сенсора. На першому етапі енергія оптичного випромінювання перетворюється в енергію електричного поля через зміну напруги на фоторезисторі, яка є вхідною напругою для автогенератора пристрою. В подальшому енергія електричного поля, яка визначається напругою на фоторезисторі перетворюється в енергію змінного електричного поля, яка зв'язана з еквівалентною ємністю коливального контуру автогенератора сенсора. Коефіцієнт корисної дії оптичного сенсора дорівнює

$$K = \frac{P_{out}}{P_{in}}. \quad (7)$$

Вихідна потужність описується виразом

$$P_{out} = \frac{C_{ekv} U_-^2}{2t}, \quad (8)$$

де C_{ekv} – еквівалентна ємність коливального контуру автогенератора, U_- – вихідна змінна напруга, t – період коливань змінної вихідної напруги без дії оптичного випромінювання.

Вхідна потужність описується формулою

$$P_{in} = \frac{q\eta_i A \Phi a V U_\Phi}{h\nu}. \quad (9)$$

Таким чином, коефіцієнт корисної дії пристрою приймає вид

$$K = \frac{C_{ekv} U_-^2 h\nu}{2t q \eta_i A \Phi a V U_\Phi}. \quad (10)$$

З формули (10) визначається C_{ekv} , яка описується виразом

$$C_{ekv} = \frac{2K t q \eta_i A \Phi a V U_\Phi}{U_-^2 h\nu}. \quad (11)$$

З другого боку, еквівалентну ємність C_{ekv} можна визначити з формули резонансної частоти автогенератора, яка має вигляд [21, с. 83]

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

де R_g – від'ємний диференційний опір коливального контуру, L – індуктивність контуру. З виразу

(12) отримуємо квадратне рівняння, з якого визначаємо C_{ekv}

$$(4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L) C_{ekv}^2 - R_g^2 C_{ekv} + L = 0. \quad (13)$$

Введемо позначення

$$m_1 = 4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L, \quad (14)$$

$$m_2 = R_g^2, \quad (15)$$

$$m_3 = L, \quad (16)$$

$$m_4 = C_{ekv} = \frac{2Ktq\eta_i A\Phi a V U_\Phi}{U_-^2 h\nu}. \quad (17)$$

тоді C_{ekv} з рівняння (13) дорівнює

$$C_{ekv} = \frac{m_2 \pm \sqrt{m_2^2 - 4m_1 m_3}}{2m_1}. \quad (18)$$

Прирівнявши вираз (18) до виразу (11), отримуємо рівняння для визначення F_0 , яке має вигляд

$$m_1 = \frac{m_2}{m_4} - \frac{m_3}{m_4^2}. \quad (19)$$

Підставивши значення виразів (14) – (17) у формулу (19), отримуємо рівняння

$$(4\pi^2 R_g^2 L) F_0^2 = \frac{R_g^2 U_-^2 h\nu}{2Ktq\eta_i A\Phi a V U_\Phi} - \frac{L U_-^4 (h\nu)^2}{4K^2 t^2 q^2 \eta_i^2 A^2 \Phi^2 a^2 V^2 U_\Phi^2}. \quad (20)$$

З рівняння (20) визначаємо параметричну залежність резонансної частоти сенсора від параметрів первинного перетворювача оптичного випромінювання і параметрів автогенератора, отже

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_-^2 h\nu}{2Ktq\eta_i A\Phi a L V U_\Phi} - \frac{U_-^4 (h\nu)^2}{4K^2 t^2 q^2 \eta_i^2 A^2 \Phi^2 R_g^2 a^2 V^2 U_\Phi^2} \right]^{1/2}. \quad (21)$$

Отримана формула (21) дозволяє простим шляхом розрахувати функцію перетворення сенсора, ніж складним шляхом з еквівалентної схеми сенсора на основі рівнянь Кірхгофа, які можна вирішити на комп'ютері чисельним шляхом. На рис. 2 подано графічну залежність розрахункової та експериментальної кривих функції перетворення оптичного сенсора.

Чутливість сенсора визначається похідною функції (21) за параметром інтенсивності світла Φ . Як показують експериментальні дослідження, вихідна змінна напруга U_- залежить від інтенсивності світла, що необхідно врахувати при визначенні чутливості. З врахуванням цього, функція (21) приймає вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[U_-^2(\Phi) \Phi^{-1} m_5 - U_-^4(\Phi) \Phi^{-2} m_6 \right]^{1/2}. \quad (22)$$

де

$$m_5 = \frac{h\nu}{2Ktq\eta_i A U_\Phi L a V}, \quad (23)$$

$$m_6 = \frac{(h\nu)^2}{4K^2 t^2 q^2 \eta_i^2 A^2 U_\Phi^2 R_g^2 a^2 V^2}. \quad (24)$$

Чутливість сенсора описується формулою

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} \left[U_-^2(\Phi) \Phi^{-1} m_5 - U_-^4(\Phi) \Phi^{-2} m_6 \right]^{-1/2} \times \left[\left[2U_-^2(\Phi) \frac{dU_-^2(\Phi)}{d\Phi} \Phi^{-1} m_5 - U_-^2(\Phi) \Phi^{-2} m_6 \right] - \left[4U_-^3(\Phi) \frac{dU_-^4(\Phi)}{d\Phi} \Phi^{-2} m_6 - 2U_-^4(\Phi) \Phi^{-3} m_6 \right] \right]. \quad (25)$$

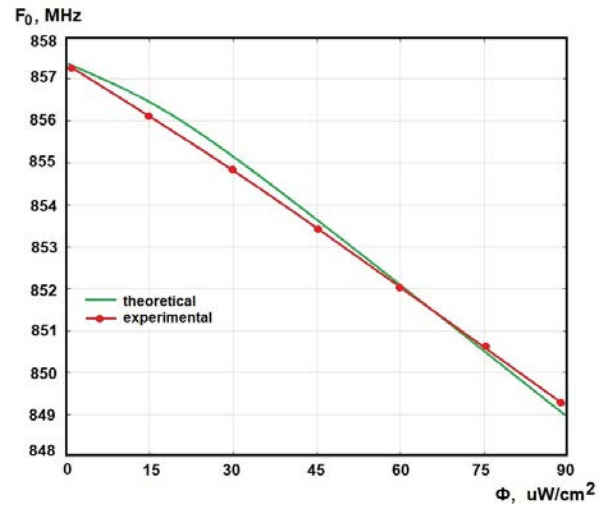


Рис. 2. Залежність розрахункової та експериментальної кривих функцій перетворення від оптичної потужності

Графік чутливості сенсора від оптичної потужності подано на рис. 3.

Як видно з графіка (рис.3), чутливість в діапазоні від 0 до 90 мкВт/см² складала від 88,1 кГц/ мкВт/см² до 93,5 кГц/ мкВт/см².

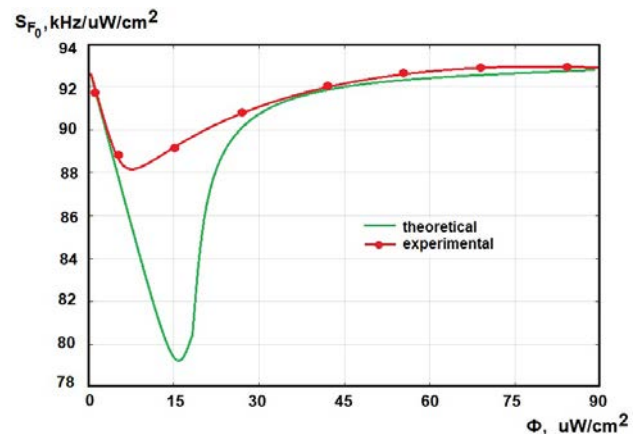


Рис. 3. Розрахункова та експериментальна залежності функції чутливості сенсора від оптичної потужності

Подальше покращення метрологічних параметрів оптичних сенсорів можливо отримати на основі автогенераторного параметричного пристрою з використанням в якості первинного перетворювача оптичної потужності фоточутливого діода.

Електрична схема оптичного сенсора подано на рис. 4. Вона уявляє собою інтегральну мікро-

електронну схему, що складається з двох біполярних транзисторів VT1 і VT2 з різними типами провідності, що приводить до появи від'ємного диференційного опору на електродах колектор-колектор транзисторів. Фоточутливий діод типу BPW20RF VD1 включено у коло зворотного позитивного зв'язку. На електродах колектор-колектор VT1 і VT2 існує повний опір, активна складова якого має від'ємне значення, а реактивна – емнісний характер. Підключення індуктивності L1 до колектора VT1 і верхнього виводу ємності C1 створює коливальний контур, втрати енергії в якому компенсуються енергією від'ємного диференційного опору. Ємність C1 запобігає проходженню змінного високочастотного струму через джерело постійної напруги U1, що живить схему пристрою. Резонансна частота коливального контуру залежить від дії світла на фоточутливий діод VD1, оскільки змінюється його струм, що приводить до зміни еквівалентної ємності і від'ємного диференційного опору у коливальній системі автогенератора сенсора.

Фоточутливий діод включено у зворотному режимі, тобто його зворотній струм складається з двох частин, одна з яких є темновим струмом, який не залежить від дії оптичного випромінювання, а друга частина є фоточутливим струмом, що визначається дією оптичного випромінювання.

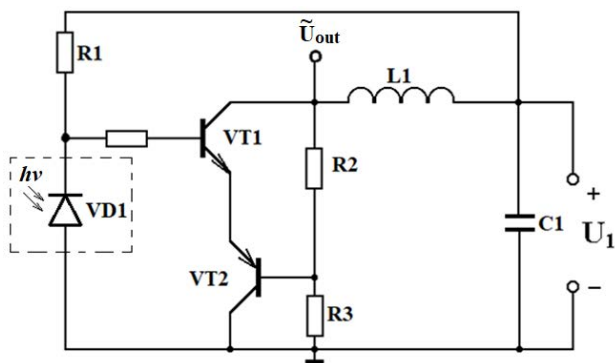


Рис. 4. Електрична схема мікроелектронного оптичного сенсора

Величина фотоструму фоточутливого діода визначається формулою [22]

$$I_F = q\eta_i a \frac{\Phi}{h\nu} V. \quad (26)$$

Формула (26) відрізняється від формули (3), яка визначає фотострум фоторезистора, тим що в ній відсутній множник A , тому що фотодіод не підсилює фотострум. Темновий опір фотодіода значно більше, ніж у фоторезистора, оскільки він визначається зворотним струмом р-п переходу, який є незначним і складає для кремнієвих

фотодіодів декілька мікроампер. Внаслідок цього відношення темнового опору до опору при дії оптичного випромінювання у фотодіода значно більше, ніж у фоторезистора. Головною перевагою фотодіодів перед фоторезисторами є їх мала інерційність. Згідно формули (26), опір діода при дії світла описується виразом

$$R(\Phi) = \frac{U_\Phi E_\Phi}{q\eta_i a \Phi V}, \quad (27)$$

де $E_\Phi = h\nu$ – енергія фотонів оптичного випромінювання. Приріст фотоопору діода має вигляд

$$\Delta R(\Phi) = \frac{\partial R}{\partial \eta_i} \Delta \eta_i(\Phi) + \frac{\partial R}{\partial a} \Delta a(\Phi) + \frac{\partial R}{\partial \Phi a} \Delta \Phi. \quad (28)$$

Виконавши диференціювання у виразі (28), отримаємо

$$\Delta R(\Phi) = -\frac{E_\Phi U_\Phi}{q a \Phi V} \eta_i^{-2} \Delta \eta_i(\Phi) - \frac{E_\Phi U_\Phi}{q \eta_i \Phi V} a^{-2} \Delta a(\Phi) - \frac{E_\Phi U_\Phi}{q \eta_i a V} \Phi^{-2} \Delta \Phi. \quad (29)$$

Визначивши залежність зміни фоточутливого опору діода від оптичної потужності, перейдемо до визначення параметричної залежності вихідної частоти сенсора від зміни оптичної потужності. Ця залежність визначається аналогічним чином як і для оптичного сенсора з фоторезистором, яка розглянута вище. Вхідна потужність для автогенератора сенсора визначається на основі виразів (26) і (27)

$$P_{in} = \frac{U_\Phi q \eta_i a \Phi V}{E_\Phi}. \quad (30)$$

Вихідна потужність визначається формулою (8). Отже, виходячи з формул (8) і (30), коефіцієнт корисної дії сенсора дорівнює

$$K = \frac{C_{ekv} U_\Phi^2 E_\Phi}{2t U_\Phi q \eta_i a \Phi V}. \quad (31)$$

З рівняння (31) визначається величина C_{ekv} , яка має вигляд

$$C_{ekv} = \frac{2K t U_\Phi q \eta_i a \Phi V}{U_\Phi^2 E_\Phi}. \quad (32)$$

З другого боку, еквівалентна ємність коливального контуру автогенератора зв'язана з резонансною частотою виразом (12). Підставивши у формулу (12) вираз (32) і провівши необхідні перетворення, отримуємо параметричну залежність вихідної резонансної частоти від оптичної потужності, а також параметрів фотодіода і параметрів автогенератора. Ця залежність описується рівнянням

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_\Phi^2 E_\Phi}{2\eta_i t U_\Phi q K L a \Phi V} - \frac{U_\Phi^4 E_\Phi^2}{4\eta_i^2 t^2 U_\Phi^2 q^2 K^2 R_g^2 a^2 \Phi^2 V^2} \right]^{1/2}. \quad (33)$$

Вираз (33) є функцією перетворення оптичного сенсора. На рис.5 подано розрахункову і експериментальну залежності функції перетворення від дії оптичної потужності на сенсор. Відносна

похибка між розрахунками і експериментом складає 5 % при вимірюванні оптичної потужності величиною 90 мкВт/см².

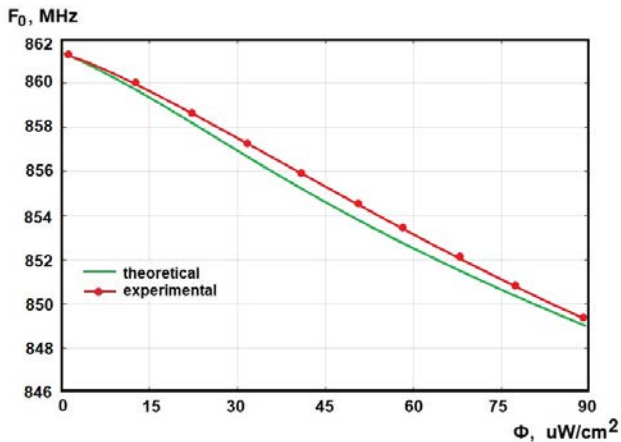


Рис. 5. Розрахункова та експериментальна залежності функції перетворення від оптичної потужності

Як видно з графіка (рис. 5), вихідна частота змінюється від 861,5 МГц до 849,5 МГц при зміні оптичної потужності від 0 мкВт/см² до 90 мкВт/см².

Функція чутливості сенсора визначається на основі виразу (33) при цьому вважається, що вихідна напруга сенсора також залежить від оптичної потужності. Отже, функція чутливості описується виразом

$$S_{\epsilon_i} = \frac{1}{4\pi} [U^2(\Phi)\Phi^{-1}m_7 - U^4(\Phi)\Phi^{-2}m_8]^{-1/2} \times \left[\left[2U_1(\Phi) \frac{dU_1(\Phi)}{d\Phi} \Phi^{-1}m_7 - \right. \right. \quad (34)$$

$$\left. \left. - U^2(\Phi)\Phi^{-2}m_7 \right) - \left(4U^2(\Phi) \frac{dU_1(\Phi)}{d\Phi} \Phi^{-2}m_8 - 2U^4(\Phi)\Phi^{-3}m_8 \right) \right]$$

де

$$m_7 = \frac{E_{\Phi}}{2K\eta_i t U_{\Phi} q L a V} \quad (35)$$

$$m_8 = \frac{E_{\Phi}^2}{4K^2 \eta_i^2 t^2 U_{\Phi}^2 q^2 R_s^2 a^2 V^2} \quad (36)$$

На рис. 6 подано розрахункові та експериментальні залежності функції чутливості від дії оптичної потужності на сенсор.

Як видно з графіка (рис. 6), чутливість сенсора складає від 125,2 кГц/мкВт/см² до 134,8 кГц/мкВт/см² в діапазоні вимірюваної оптичної потужності від 0 мкВт/см² до 90 мкВт/см².

Частотний діапазон автогенераторних параметричних сенсорів оптичного випромінювання на основі транзисторних мікроелектронних структур з від'ємним диференціальним опором з первинними фоточутливими елементами типу фоторезистора і фотодіода вибраний в LTE-800 Downlink. Діапазон 3GPP B20 (800 МГц) LTE є другим за популярністю діапазоном, що використовується операторами

мобільного зв'язку загального користування 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) у зв'язку з переходом телемовних компаній на цифрове мовлення. Використання спектру 800 МГц допомагає операторам швидше запустити послуги LTE та задовольнити вимоги ринку. Багатьом операторам, що використовують смугу частот B20, вдалося досягти загальнонаціонального або національного покриття в найкоротші терміни [23, 24].

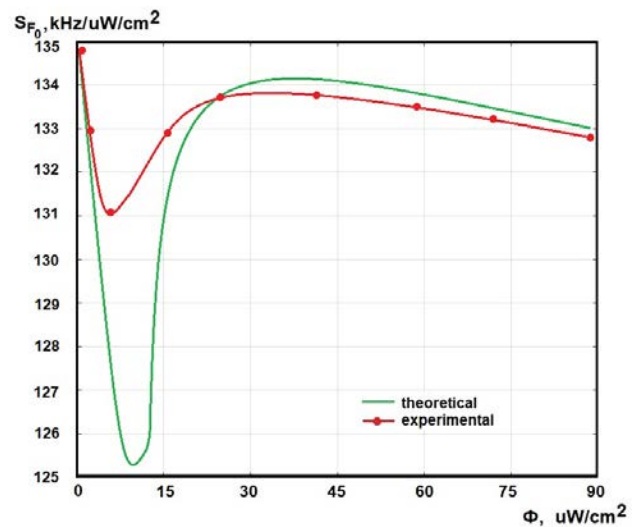


Рис. 6. Розрахункова та експериментальна залежності функції чутливості від оптичної потужності

Оператори мобільного зв'язку можуть гнучко розгорнути LTE, використовуючи смугу 20 МГц як одну смугу або як частину багатодіапазонної мережі, за повідомленнями, з більш ніж 175 комерційними мережами у 79 країнах та територіях (квітень 2018 р.). Технології LTE-A або LTE-Advanced Pro можуть бути розгорнуті з використанням агрегації несучих для об'єднання різних смуг частот 20 МГц діапазону з іншими несучими. Діапазон B20 (800 МГц) також є надзвичайно популярним вибором для eMTC (LTE Cat M1) та NB-IoT (LTE Cat NB1) через характеристики глибокого проникнення та широкого покриття [23, 24].

Експериментальні дослідження проведено за допомогою спектроаналізатора Arinst SSA TG-LC. На рис. 7 представлено спектр автогенераторного параметричного сенсора оптичного випромінювання на основі транзисторної мікроелектронної структури в діапазоні LTE-800 Downlink, частота передачі складає 849,8 МГц.

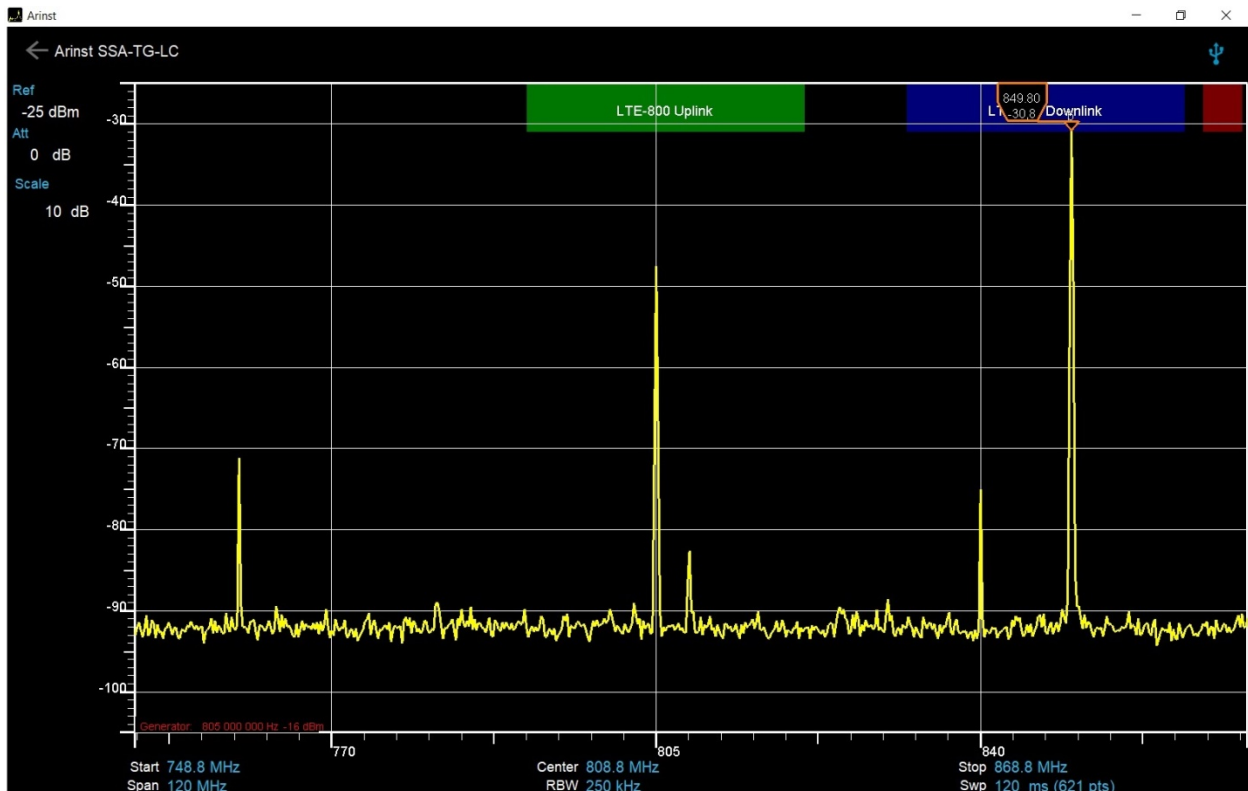


Рис. 7. Спектр автогенераторного параметричного сенсора оптичного випромінювання на основі транзисторної мікроелектронної структури

Висновки

1. Запропоновано автогенераторні параметричні сенсори оптичного випромінювання на основі транзисторних мікроелектронних структур з від'ємним диференційним опором з первинними фоточутливими елементами типу фоторезистора і фотодіода, причому первинні фоточутливі перетворювачі є активними елементами схем автогенераторів, що спрощує конструкцію сенсорів.

2. Виходячи з розгляду фізичних процесів у первинних фоточутливих елементах і автогенераторах, розроблено математичні моделі оптичних сенсорів, на основі яких отримано параметричні залежності функцій перетворення і чутливості. Показано, що основний внесок у зміну функції перетворення вносить зміна оптичної потужності. Це викликає зміну еквівалентної ємності і від'ємного диференційного опору коливальної системи автогенераторів сенсорів, що, у свою чергу, змінює вихідну частоту приладів. Чутли-

вість оптичних сенсорів змінюється від 125,2 кГц/мкВт/см² до 134,8 кГц/мкВт/см² в діапазоні вимірюваної оптичної потужності від 0 мкВт/см² до 90 мкВт/см².

3. Отримані параметричні залежності функцій перетворення оптичних сенсорів показують можливість значно простіше розрахувати основні характеристики сенсорів і наочно демонструють вплив кожного елемента первинних перетворювачів і елементів автогенераторів на вихідну частоту сенсорів у порівнянні з розрахунками функцій перетворення з еквівалентних схем пристроїв на основі рівнянь Кірхгофа. У фоточутливих сенсорах 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 у надвисоких частотах.

Список літератури:

1. Мартинес-Дуарт Дж. М. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники / Дж. М. Мартинес-Дуарт, Р. Дж. Мартин-Палма, Ф. Агулло-Руеда. – Москва: Техносфера, 2007. – 368 с.
2. Мікроелектронні сенсори фізичних величин. Том. 3, кн. 1. За редакцією З.Ю. Готри. – Львів: Ліга-Прес. 2007. – 546 с.

3. Schaumburg H. Sensoren. – Stuttgart: Teubner, 1992. – 517 p.
4. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. – Москва: Техносфера, 2007. – 384 с.
5. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. – Москва: Техносфера, 2012. – 624с.
6. Thomas Allsop, Ronald Neal. Application and Implementation of Optic Fibre Sensors for Gas Detection // Sensors 2021, 21, 6755. <https://doi.org/10.3390/s21206755>
7. Jasmine Chan, Zhou Zheng, Kevan Bell, Martin Le, Parsin Haji Reza and John T.W. Yeow. Photoacoustic Imaging with Capacitive Micromachined Ultrasound Transducers: Principles and Developments // Sensors 2019, 19, 3617; doi:10.3390/s19163617
8. Edrine Damulira, Muhammad Nur Salihin Yusoff, Ahmad Fairuz Omar and Nur Hartini Mohd Taib. A Review: Photonic Devices Used for Dosimetry in Medical Radiation // Sensors 2019, 19, 2226; doi:10.3390/s19102226
9. Dong-Geon Lee, Dooho Choi, Jungtaek Seo, Howon Kim. Reset Tree-Based Optical Fault Detection // Sensors 2013, 13, 6713-6729; doi:10.3390/s130506713
10. Ofer Levi, Thomas T. Lee, Meredith M. Lee, Stephen J Smith, and James S. Harris, "Integrated semiconductor optical sensors for cellular and neural imaging," Appl. Opt. 46, 2007. P. 1881-1889.
11. José Luis Santos, Faramarz Farahi. Optical Waveguide Sensors from: Handbook of Optical Sensors CRC Press Accessed, 2022. – 43 p. <https://www.routledgehandbooks.com/doi/10.1201/b17641-6>
12. Martellucci S., Arthur N. Chester, Anna Grazia Mignani. Optical Sensors and Microsystems. Springer, Boston, MA, 2000. – 318 p. <https://doi.org/10.1007/b115495>
13. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Вербицкий В.Г. Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі. –Вінниця:«Універсум-Вінниця», 2001.– 195 с.
14. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Maksat Kolimoldayev, Paweł Komada, Kanat Mussabekov. Optical transducers with frequency output. Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments, 2017, 104451X (2017).
15. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем. Винниця: «Универсум-Винниця», 1999. – 275 с.
16. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Seletskaya O.O., Kisała P., Nurseitova K. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors. Proceedings SPIE Volume 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, 2019; 111761I (2019).
17. 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. DOI: 10.15330/pcss.22.2.224-232
18. Osadchuk A.V., Osadchuk I.O., Semenov A.O.. The Mathematical Model of Radio-measuring Frequency Transducer of Optical Radiation Based on MOS Transistor Structures with Negative Differential Resistance // Journal of Nano- and Electronic Physics. Scientific journal. ISSN 2077-6772. Vol. 13 No 4, 04001(6 pp) (2021) DOI: 10.21272/jnep.13(4).04001
19. Vladimir S. Osadchuk, Oleksandr V. Osadchuk, Olena M. Zhahlovska, Saule Luganskaya, Andrzej Kociubiński. Development of the construction sketch of N-channel MOS-phototransistor with bilateral illumination of channel and operation card of its making // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Volume 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018; 108080R, 2018, –P. 1-16.
20. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Seletskaya O.O., Krylik L.V. Optical frequency transducer based on dual-gate mosfet with an active inductive element// Information and Telecommunication Sciences, 2017, Volume 9, Number 2., National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. P. 61-68.
21. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Селецька О.О. Радіовимірювальні оптичні перетворювачі для мікроелектронної технології. –Вінниця: ВНТУ, 2013. – 160 с.
22. Викулин В.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. –М.: Радио и связь, 1990. – 265 с.
24. <https://halberdbastion.com/technology/cellular/4g-lte/lte-frequency-bands/b20-800-mhz>
25. Mikko Valkama, Jarno Niemelä. SAINJU, PRABHAT MAN: LTE performance analysis on 800 and 1800 MHz Bands. Master of Science Thesis. Tampere university of technology, 2012. – 82 p.

Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.O. RESEARCH OF AUTOGENERATOR PARAMETRIC OPTICAL SENSORS

Self-oscillating parametric sensors for optical radiation based on transistor microelectronic structures with negative differential resistance with primary photosensitive elements such as a photoresistor and a photodiode

are proposed, moreover, primary photosensitive converters are active elements of self-oscillator circuits, which simplifies the design of sensors.

Based on the consideration of physical processes in primary photosensitive elements and self-oscillators, mathematical models of optical sensors have been developed, on the basis of which the transformation and sensitivity functions have been obtained. It is shown that the main contribution to the change in the conversion function is the change in the optical power. This causes a change in the equivalent capacitance and negative differential resistance of the oscillatory system of sensor self-oscillators, which in turn changes the output frequency of the devices. The sensitivity of optical sensors varies from 125.2 kHz/ μ W/cm² to 134.8 kHz/ μ W/cm² in the range of measured optical power from 0 to 90 μ W/cm².

The obtained parametric dependences of the conversion functions of optical sensors show that it is easier to obtain the main characteristics of the sensors and clearly demonstrate the influence of each parameter of the primary converters and self-oscillator elements on the output frequency of the sensors in comparison with the calculations of the conversion functions from equivalent device circuits based on the Kirchhoff equations. Photosensitive sensors with a frequency output do not require analog-to-digital converters and amplifying devices for further processing of information signals, which reduces the cost of information-measuring equipment, in addition, it is possible to transmit information over a distance when the sensors operate at microwave frequencies.

Key words: *optical sensor, negative differential resistance, self-oscillator, photoresistor, photodiode.*