

МІКРОЕЛЕКТРОННІ АВТОГЕНЕРАТОРНІ ОПТИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Запропоновано мікроелектронні автогенераторні перетворювачі оптичної потужності на основі мікроелектронних транзисторних структур з диференційним від'ємним опором та первинним фоточутливим елементом на базі біполярного і польового фототранзисторів, причому первинні фоточутливі елементи є також активними елементами самих автогенераторів, що значно спрощує конструкцію перетворювачів.

На основі розгляду фізичних процесів у первинному фоточутливому елементі та автогенераторі розроблено математичну модель мікроелектронного оптичного перетворювача, на основі якої отримано параметричні залежності функцій перетворення та чутливості. Основним фактором зміни функції перетворення та чутливості є зміна оптичної потужності. Це змінює еквівалентну ємність і диференціальний від'ємний опір коливальної системи мікроелектронного автогенераторного перетворювача оптичної потужності, змінюючи вихідну частоту пристрою. Оскільки оптична потужність змінюється в діапазоні $0...90$ мкВт/см², то чутливість оптичного перетворювача змінюється від 151,3 кГц/мкВт/см² до 215,2 кГц/мкВт/см².

Отримані аналітичні вирази параметричної залежності функції чутливості та перетворення, що демонструють можливість значно легшого розрахунку основних характеристик перетворювача, враховуючи вплив кожного параметра первинного фоточутливого елемента та параметрів автогенератора на вихідну частоту приладу у порівнянні з розрахунками цих параметрів з системами рівнянь Кірхгофа. Фоточутливі перетворювачі з частотним виходом не потребують аналого-цифрових перетворювачів або підсилювачів для подальшої обробки інформаційного сигналу, що значно знижує витрати на інформаційне та вимірювальне обладнання. Крім того, коли перетворювачі працюють на дуже високих частотах, можна передавати безпосередньо інформацію на відстань.

Ключові слова: оптичний перетворювач, диференційний від'ємний опір, частота, автогенератор, фоточутливий транзистор.

OSADCHUK IAROSLAV

Vinnytsia National Technical University

MICROELECTRONIC SELF-OSCILLATING OPTICAL POWER TRANSDUCERS

Microelectronic self-oscillating optical power transducers are proposed based on microelectronic transistor structures with differential negative resistance and a primary photosensitive element based on bipolar and field-effect phototransistors, and the primary photosensitive elements are also active elements of the self-oscillators themselves, which greatly simplifies the conversion design.

Based on the consideration of physical processes in the primary photosensitive element and self-oscillator, a mathematical model of a microelectronic optical transducer was developed, on the basis of which the parametric dependences of the conversion and sensitivity functions were obtained. The main factor in changing the conversion function and sensitivity is the change in optical power. This changes the equivalent capacitance and differential negative resistance of the oscillatory system of the microelectronic self-oscillating optical power transducer, changing the output frequency of the device. Since the optical power varies in the range of $0...90$ $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, the sensitivity of the optical transducer varies from 151.3 $\text{kHz}/\mu\text{W}/\text{cm}^2$ to 215.2 $\text{kHz}/\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Analytical expressions for the parametric dependence of the sensitivity and conversion functions are obtained, demonstrating the possibility of an easier calculation of the main characteristics of the transducer, taking into account the influence of each parameter of the primary photosensitive element and the parameters of the self-oscillator on the output frequency of the device in comparison with the calculations of these parameters with systems of Kirchhoff equations. Photosensitive transducers with frequency output do not need analog-to-digital transducers or amplifiers for further processing of the information signal, which significantly reduces the cost of information and measuring equipment. In addition, when the transducers operate at very high frequencies, it is possible to directly transmit information over a distance.

Key words: optical transducer, differential negative resistance, frequency, self-oscillator, photosensitive transistor.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

На сучасному етапі науково-технічного прогресу відбувається стрімкий розвиток аналітичного приладобудування на основі використання досягнень сучасної нано- і мікроелектронної технології та елементної бази. Це дає змогу за допомогою нових фізичних явищ і нових принципів реалізації розробляти та створювати оптичні прилади для різноманітних галузей виробництва. Вимірювання потужності оптичного випромінювання потрібно у мікроелектронній технології, сонячній енергетиці, військовій техніці, ядерній енергетиці, космічних дослідженнях, дослідженні довкілля, що потребує розробки інформаційно-вимірювальних приладів і систем високої чутливості та точності, швидкодії та стабільності [1–8].

На даний час для вимірювання інтенсивності світла використовуються напівпровідникові або мікроелектронні перетворювачі, що виконані у вигляді мікроелектронних схем на базі фототранзисторів, фотодіодів та фоторезисторів. Вони широко використовуються в системах автоматизації, як пристрої для включення освітлення доріг, тунелів, приміщень, освітлення аеропортів, пожежних і димових сповіщувачів, в системах контролю положення об'єктів, фотореле в різних промислових машинах і т.д. [1, 9, 10].

Більшість фоточутливих перетворювачів мають вихідний сигнал у вигляді напруги або струму. Це призводить до втрати інформації в каналі між виходом перетворювача і входом підсилювальної

перетворювальної апаратури, значних похибок вимірювань через малу вихідну потужність сигналу перетворювача, а також мають низьку завадостійкість і швидкодію [11, 12].

Усунути вищеперераховані недоліки можливо на основі автогенераторних мікроелектронних перетворювачів, які працюють в режимі перетворення «потужність оптичного випромінювання – частота», що значно покращує їх метрологічні показники [13, 14].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Одним з перспективних напрямків у створенні фоточутливих перетворювачів є дослідження в області перетворювачів на основі реактивних властивостей напівпровідникових транзисторних структур з диференційним від'ємним опором, що дозволяє створювати вимірювальні пристрої з частотним вихідним сигналом. Мікроелектронні автогенераторні фоточутливі перетворювачі поєднують простоту та універсальність аналогових пристроїв із точністю та надійністю пристроїв кодованого виведення. Застосування принципу перетворення «потужність оптичного випромінювання – частота» на основі мікроелектронних автогенераторних перетворювачів значно знижує вартість інформаційно-вимірювальних систем, масогабаритні показники, підвищує точність і чутливість перетворення інформативного сигналу у частоту [15–20].

Постановка завдання

Метою даної статті є створення і дослідження оптичних перетворювачів на основі мікроелектронних транзисторних структур. У цій структурі фоточутливі біполярні і польові транзистори виконують роль первинних перетворювачів оптичного сигналу і діють як активні елементи в автогенераторах, компенсуючи втрати енергії в коливальній системі. Це дозволяє перетворювати оптичний сигнал у частоту. Для досягнення поставлених цілей у роботі необхідно вирішити наступні завдання:

- 1) провести аналіз існуючих літературних джерел і обґрунтувати застосування мікроелектронних транзисторних структур з диференційним від'ємним опором для побудови оптичних перетворювачів з частотним виходом;
- 2) розробити математичні моделі оптичних перетворювачів, в яких враховано залежність параметрів автогенераторів фоточутливих елементів від дії оптичного випромінювання та вплив їх на вихідну частоту оптичних перетворювачів;
- 3) отримати аналітичні вирази для параметричної залежності передатної функції та чутливості до зміни потужності оптичного випромінювання;
- 4) зробити висновки з проведеного дослідження.

Математичні моделі мікроелектронних оптичних перетворювачів

Мікроелектронний оптичний перетворювач з частотним вихідним сигналом побудований на основі напівпровідникової транзисторної структури з диференційним від'ємним опором, в якій фоточутливим елементом є біполярний транзистор VT1. На рис. 1 зображено схему мікроелектронного оптичного перетворювача.

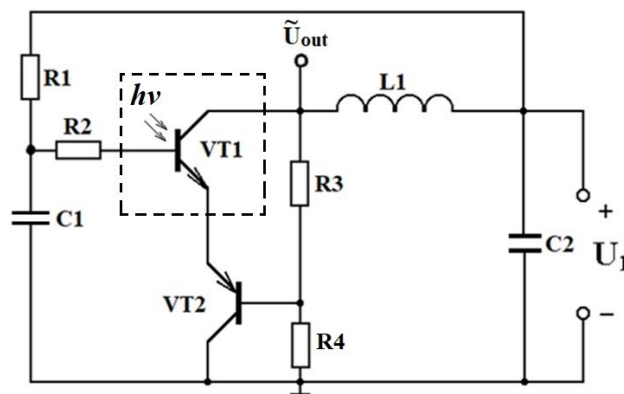


Рис. 1. Схематичне рішення мікроелектронного оптичного перетворювача

Мікроелектронний автогенераторний оптичний перетворювач складається з біполярних транзисторів VT1 і VT2 з різним типом провідності базових областей, що утворює спадну ділянку на вольт-амперній характеристиці на вихідних клеммах перетворювача. Спадній ділянці відповідає диференційний від'ємний опір. Оптичний перетворювач заживлюється джерелом постійної напруги U_1 через резистори R1, R2, R3 та R4. Конденсатор C2 виконує функцію блокування, за допомогою якого джерело постійної напруги U_1 захищається від протікання змінного струму. Резонансний контур утворений індуктивністю L1 і ємністю складовою повного опору, що існує на електродах колектор-колектор біполярних транзисторів VT1 та VT2.

При дії світла на фоточутливий біполярний транзистор VT1 здійснюється зміна активної і реактивної складових повного опору на електродах колектор-колектор приладу, що викликає зміну частоти мікроелектронного оптичного перетворювача. Фоточутливим елементом перетворювача був використаний транзистор типу ВРХ43 [21].

Перейдемо до визначення аналітичних виразів параметричних залежностей параметрів

фоточутливого біполярного транзистора за схемою із загальним емітером при дії на нього світла. Оскільки колекторний р-п-перехід працює у зворотному режимі, то його струм складається із темнового струму насичення і фотоструму, що викликаний внутрішнім фотоелементом при дії світла на базову область біполярного транзистора VT1. Якщо знехтувати струмом бази VT1, то струм колектора при дії світла описується виразом [22]

$$I_C = \frac{I_F - I_{CB0}}{1 - h_{21B}}, \quad (1)$$

де I_F – фотострум; I_{CB0} – зворотний темновий струм колекторного р-п переходу; h_{21B} – коефіцієнт передачі струму біполярного транзистора у схемі із загальною базою. Величина фотоструму має вигляд [22]

$$I_F = \frac{q\eta_i\Phi\alpha V}{h\nu}, \quad (2)$$

де q – заряд електрона, η_i – квантовий вихід фотоіонізації фотоелектронів і фотодірок, Φ – інтенсивність світла, α – коефіцієнт поглинання фотонів, $h\nu$ – енергія квантів діючого світла, V – об'єм базової області фототранзистора. Величина темнового струму насичення при $p_p \ll n_n$ описується формулою [22]

$$I_{CB0} = \frac{qSD_p p_n}{L_p}, \quad (3)$$

де S – площа перерізу колекторної області VT1, D_p – коефіцієнт дифузії дірок, p_n – концентрація неосновних носіїв заряду в колекторній області, L_p – дифузійна довжина дірок. З врахуванням, що довжина

базової області $W_0 \ll L_p$, то при підстановці значень формул (2), (3) і $h_{21B} = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W_0}{L_p} \right)^2$ у формулу (1),

отримуємо рівняння

$$I_C = \frac{2q(\eta_i\Phi\alpha VL_p + SD_p p_n h\nu)L_p}{h\nu W_0^2}. \quad (4)$$

З врахуванням (4), залежність опору базової області фоточутливого транзистора VT1 від дії світла описується виразом

$$R_B(\Phi) = \frac{U_{CE} h\nu W_0^2}{2q(\eta_i\Phi\alpha VL_p + SD_p p_n h\nu)L_p}, \quad (5)$$

де U_{CE} – напруга на електродах колектор-емітер VT1.

Приріст опору базової області VT1 від дії світла приймає вигляд

$$\Delta R_B(\Phi) = -\frac{U_{CE} h\nu W_0^2}{2q} (\eta_i\Phi\alpha VL_p + SD_p p_n h\nu)^{-2} \eta_i\alpha VL_p \Delta\Phi. \quad (6)$$

Переходимо до визначення параметричної залежності вихідної частоти фотоперетворювача від параметрів фототранзистора та автогенератора. При вирішенні цієї задачі необхідно враховувати перетворення енергії потужності оптичного випромінювання у енергію змінного електричного поля на виході перетворювача. Для цього визначимо ККД автогенераторного перетворювача. З початку енергія оптичного сигналу перетворюється в енергію постійного електричного поля на фототранзисторі, яка є вхідною енергією для автогенератора. Далі енергія постійного електричного поля на фототранзисторі перетворюється у енергію змінного електричного поля, яка пов'язана з еквівалентною ємністю резонансного коливального контуру автогенератора оптичного перетворювача. Коефіцієнт корисної дії оптичного перетворювача має вигляд

$$K = \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}}. \quad (7)$$

Вихідна потужність автогенераторного перетворювача описується виразом

$$P_{\text{вих}} = \frac{C_{\text{ekv}} U_{\sim}^2}{2t}, \quad (8)$$

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

Вхідна потужність автогенераторного оптичного перетворювача описується формулою

$$P_{\text{вх}} = \frac{2q(\eta_i\Phi\alpha VL_p + SD_p p_n h\nu)U_{CE}}{h\nu W_0}. \quad (9)$$

Отже, коефіцієнт корисної дії приладу приймає вигляд

$$K = \frac{C_{ekv} U_{\sim}^2 h\nu W_0}{4tU_{CE}q(\eta_i \Phi \alpha V L_p + SD_p p_n h\nu)} \quad (10)$$

З виразу (10) визначається еквівалентна ємність пристрою C_{ekv} , яка описується виразом

$$C_{ekv} = \frac{4KtU_{CE}q(\eta_i \Phi \alpha V L_p + SD_p p_n h\nu)}{U_{\sim}^2 h\nu W_0} \quad (11)$$

З іншого боку, еквівалентну ємність можна визначити за формулою резонансної частоти автогенераторного оптичного перетворювача у вигляді [23, 24]

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

де R_g – диференційний від’ємний опір у коливальному контурі, L – індуктивність контуру. З виразу (12) визначаємо квадратне рівняння, на підставі якого визначаємо еквівалентну ємність C_{ekv}

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

Введемо позначення

$$b_1 = 4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L, \quad (14)$$

$$b_2 = R_g^2, \quad (15)$$

$$b_3 = L, \quad (16)$$

$$b_4 = C_{ekv} = \frac{4KtU_{CE}q(\eta_i \Phi \alpha V L_p + SD_p p_n h\nu)}{U_{\sim}^2 W_0 h\nu} \quad (17)$$

тоді еквівалентна ємність C_{ekv} з рівняння (13) дорівнює

$$C_{ekv} = \frac{b_2 \pm \sqrt{b_2^2 - 4b_1 b_3}}{2b_1} \quad (18)$$

Прирівнявши формулу (18) до формули (11), отримуємо рівняння для визначення частоти генерації F_0 , яке має вигляд

$$b_1 = \frac{b_2}{b_4} - \frac{b_3}{b_4^2} \quad (19)$$

Підставляючи значення рівнянь (14)-(17) в рівняння (19), отримуємо рівняння

$$4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L = \frac{U_{\sim}^2 W_0 h\nu R_g^2}{4KtU_{CE}q(\eta_i \Phi \alpha V L_p + SD_p p_n h\nu)} - \frac{U_{\sim}^4 W_0^2 (h\nu)^2 L}{16K^2 t^2 U_{CE}^2 q^2 (\eta_i \Phi \alpha V L_p + SD_p p_n h\nu)^2} \quad (20)$$

З рівняння (20) визначимо параметричну залежність вихідної частоти автогенераторного оптичного перетворювача від параметрів первинного перетворювача та параметрів автогенератора, таким чином

$$F_0 = \left[\frac{U_{\sim}^2 W_0 h\nu}{4KtU_{CE}q(\eta_i \Phi \alpha V L_p + SD_p p_n h\nu)L} - \frac{U_{\sim}^4 W_0^2 (h\nu)^2}{16K^2 t^2 U_{CE}^2 q^2 (\eta_i \Phi \alpha V L_p + SD_p p_n h\nu)^2 R_g^2} \right]^{1/2} \quad (21)$$

Отримане рівняння (21) дозволяє розрахувати функцію перетворення пристрою простим, а не складним способом по нелінійній еквівалентній схемі оптичного перетворювача на основі системи рівнянь Кірхгофа, які в подальшому можна розв’язати на комп’ютері чисельними методами.

На рис. 2 наведено теоретичні та експериментальні залежності функції перетворення автогенераторного оптичного перетворювача від зміни оптичної потужності.

Чутливість автогенераторного оптичного перетворювача визначається похідною функції (21) за параметром інтенсивності падаючого світла Φ . На підставі експериментальних досліджень, вихідна змінна напруга U_{\sim} автогенераторного оптичного перетворювача залежить від інтенсивності падаючого світла, що необхідно враховувати під час визначення чутливості пристрою. З врахуванням цього зауваження функція перетворення (21) приймає вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[U_{\sim}^2(\Phi) (\eta_i \Phi \alpha V L_p + SD_p p_n h\nu)^{-1} b_5 - U_{\sim}^4(\Phi) (\eta_i \Phi \alpha V L_p + SD_p p_n h\nu)^{-2} b_6 \right]^{1/2} \quad (22)$$

де

$$b_5 = \frac{W_0 h\nu}{4KtU_{CE}qL}, \quad (23)$$

$$b_6 = \frac{W_0^2 (h\nu)^2}{16K^2 t^2 U_{CE}^2 q^2 R_g^2} \quad (24)$$

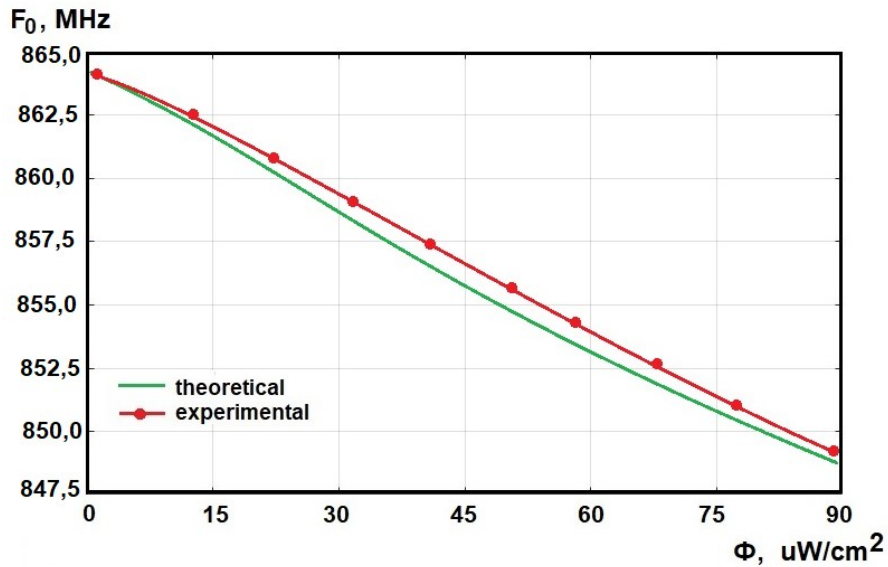


Рис. 2. Теоретичні та експериментальні залежності функції перетворення оптичного перетворювача від зміни оптичної потужності

Чутливість автогенераторного оптичного перетворювача описується формулою

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} \left[U_-^2(\Phi) (\eta_i \Phi \alpha V L_p + S D_p p_n h \nu)^{-1} b_5 - U_-^4(\Phi) (\eta_i \Phi \alpha V L_p + S D_p p_n h \nu)^{-2} b_6 \right]^{-1/2} \times$$

$$\times \left\{ 2 U_- (\Phi) \frac{dU_- (\Phi)}{d\Phi} (\eta_i \Phi \alpha V L_p + S D_p p_n h \nu)^{-1} - U_-^2 (\Phi) (\eta_i \Phi \alpha V L_p + S D_p p_n h \nu)^{-2} \eta_i \alpha V L_p \right\} b_5 -$$

$$- \left[4 U_-^3 (\Phi) \frac{dU_- (\Phi)}{d\Phi} (\eta_i \Phi \alpha V L_p + S D_p p_n h \nu)^{-2} - 2 U_-^4 (\Phi) (\eta_i \Phi \alpha V L_p + S D_p p_n h \nu)^{-3} \eta_i \alpha V L_p \right] b_6 \} . \quad (25)$$

Графік чутливості автогенераторного оптичного перетворювача від зміни оптичної потужності наведено на рис. 3.

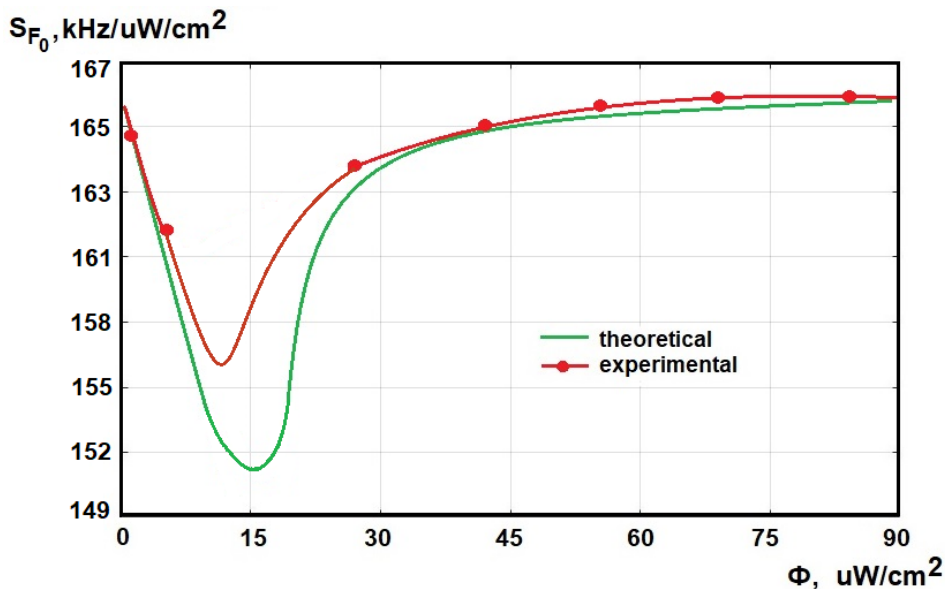


Рис. 3. Теоретична та експериментальна залежність функції чутливості автогенераторного оптичного перетворювача від зміни оптичної потужності

З графіка (рис. 3) видно, що чутливість автогенераторного оптичного перетворювача складала від 151,3 кГц/мкВт/см² до 166,2 кГц/мкВт/см² в діапазоні частот від 849 МГц до 864 МГц.

Перейдемо до розгляду параметрів оптичних перетворювачів на основі мікроелектронного автогенераторного приладу з використанням в якості первинного фоточутливого елементу – польового транзистора з індукованим каналом.

Електричну схему автогенераторного оптичного перетворювача на основі фоточутливого польового транзистора подано на рис. 4.

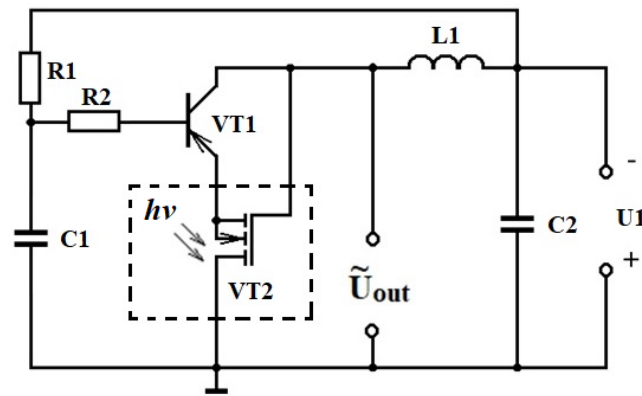


Рис. 4. Схема мікроелектронного автогенераторного оптичного перетворювача на основі фоточутливого польового транзистора

Вона побудована на основі біполярного транзистора VT1 і фоточутливого польового транзистора VT2 з індукованим каналом, який і є чутливим до оптичного випромінювання елементом. Живлення схеми з постійного струму відбувається через резистори R1 і R2 від джерела постійної напруги U1. Додатковий позитивний зворотний зв'язок у схемі здійснюється за рахунок електричного кола R1C1, що збільшує диференціальний від'ємний опір на електродах колектор VT1 і стік VT2. Ці електроди мають повний опір, активна частина якого має від'ємне значення, а реактивна носить ємнісний характер. При підключенні індуктивності L1 до колектора біполярного транзистора VT1 і верхнього виводу конденсатора C2 створюється коливальний контур, в якому компенсуються втрати енергії через диференціальний від'ємного опору. Конденсатор C2 перешкоджає проходженню змінного струму через джерело постійної напруги U1. Резонансна частота коливального контуру автогенераторного оптичного перетворювача залежить від дії світлового випромінювання на фоточутливий польовий транзистор VT2, оскільки змінюється величина струму яка протікає через нього. При цьому змінюється еквівалентна ємність автогенераторного оптичного перетворювача і диференціальний від'ємний опір коливальної системи перетворювального автогенератора.

Зміна струму у каналі транзистора VT2 відбувається за рахунок зміни рухливості фотоелектронів і зміни порогової напруги польового транзистора. Освітлення напівпровідника здійснюється через напівпрозорий електрод затвору. При дії світла на польовий транзистор VT2 утворені фотоелектрони прискорюють утворення інверсного каналу і зменшують порогову напругу. Цьому також сприяє захоплення основних нерівноважних носіїв пастками на поверхні напівпровідника [22].

Розглянемо роботу польового транзистора з індукованим каналом VT2 у режимі насичення, при цьому величина струму стоку має вигляд [22, 25]

$$I_{C_{нас}} = \frac{Z\mu_n C_0}{L_{кан}} [U_з - U_{пор}]^2, \quad (26)$$

де Z – ширина каналу, μ_n – рухливість електронів, $U_з$ – напруга на затворі польового транзистора, C_0 – ємність діелектрика затвору на одиницю площі, $U_{пор}$ – порогова напруга утворення інверсного каналу, $L_{кан}$ – довжина каналу.

З врахуванням (26), опір каналу при дії світла описується виразом

$$R_{кан}(\Phi) = \frac{U_{св} L_{кан}}{Z\mu_n(\Phi)C_0 [U_з - U_{пор}(\Phi)]^2}, \quad (27)$$

де $U_{св}$ – напруга на стоці відносно витoku. Зміна опору каналу фототранзистора при дії світла з врахуванням (27) приймає вигляд

$$\Delta R_{кан}(\Phi) = \frac{\partial R_{кан}}{\partial \mu_n(\Phi)} \Delta \mu_n(\Phi) + \frac{\partial R_{кан}}{\partial U_{пор}(\Phi)} \Delta U_{пор}(\Phi). \quad (28)$$

Виконавши диференціювання у формулі (28), отримуємо формулу

$$R_{кан}(\Phi) = -\frac{U_{св} L_{кан}}{ZC_0 [U_з - U_{пор}(\Phi)]^2} \mu_n^{-2}(\Phi) \Delta \mu_n(\Phi) + \frac{2U_{св} L_{кан}}{ZC_0 \mu_n(\Phi)} [U_з - U_{пор}(\Phi)]^{-3} \Delta U_{пор}(\Phi). \quad (29)$$

Визначивши залежність зміни опору фоточутливого польового транзистора VT2 від дії світлового випромінювання, переходимо до визначення параметричної залежності вихідної частоти автогенераторного перетворювача від зміни оптичної потужності. Дана залежність визначається аналогічним способом, як і для автогенераторного оптичного перетворювача з фоточутливим біполярним транзистором, яка розглянута вище. Вхідну потужність для автогенераторного оптичного перетворювача визначаємо на основі формул (26) і (27), таким чином

$$P_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{св}} Z \mu_n C_0 [U_3 - U_{\text{пор}}]^2}{L_{\text{кан}}} \quad (30)$$

Вихідна потужність автогенераторного оптичного перетворювача визначається виразом (8). На підставі виразів (8) і (30), коефіцієнт корисної дії автогенераторного оптичного перетворювача дорівнює

$$K = \frac{C_{\text{екв}} U_{\text{св}}^2 L_{\text{кан}}}{2U_{\text{св}} t Z \mu_n C_0 [U_3 - U_{\text{пор}}]^2} \quad (31)$$

З рівняння (31) визначається величина еквівалентної ємності автогенераторного оптичного перетворювача $C_{\text{екв}}$, яка має вигляд

$$C_{\text{екв}} = \frac{2U_{\text{св}} t K Z \mu_n C_0 [U_3 - U_{\text{пор}}]^2}{U_{\text{св}}^2 L_{\text{кан}}} \quad (32)$$

Також еквівалентна ємність коливального контуру автогенераторного оптичного перетворювача зв'язана з резонансною частотою формулою (12). Підставивши у вираз (12) формулу (32), а також провівши необхідні математичні перетворення, отримано параметричну залежність вихідної резонансної частоти автогенераторного оптичного перетворювача від параметрів фоточутливого польового транзистора і параметрів автогенератора. Дана параметрична залежність описується рівнянням

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_{\text{св}}^2 L_{\text{кан}}}{2K U_{\text{св}} t Z \mu_n C_0 [U_3 - U_{\text{пор}}]^2 L} - \frac{U_{\text{св}}^4 L_{\text{кан}}^2}{4K^2 U_{\text{св}}^2 t^2 Z^2 \mu_n^2 C_0^2 [U_3 - U_{\text{пор}}]^4 R_g^2} \right]^{1/2} \quad (33)$$

Формула (33) є функцією перетворення автогенераторного оптичного перетворювача. На рис. 5 представлено теоретичну та експериментальну залежності функції перетворення автогенераторного оптичного перетворювача від зміни оптичної потужності.

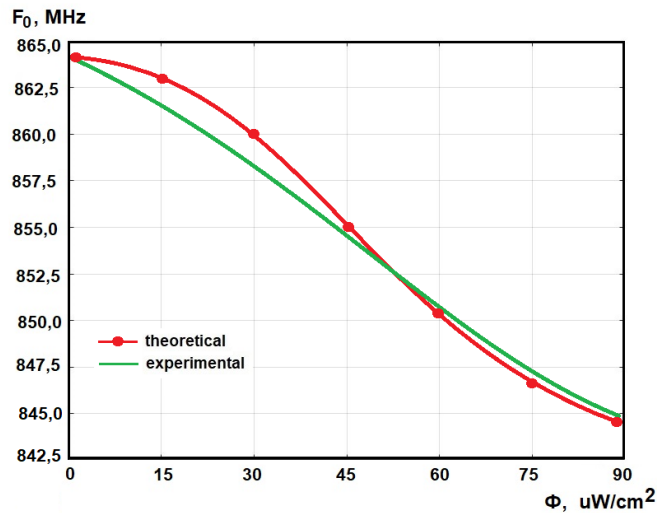


Рис. 5. Залежність функції перетворення мікроелектронного автогенераторного перетворювача на основі фоточутливого МДН транзистора від оптичної потужності

Як видно з графіка (рис. 5), вихідна частота автогенераторного оптичного перетворювача змінюється від 864,2 МГц до 844,8 МГц при зміні оптичної потужності від 0 мВт/см² до 90 мВт/см². Функція чутливості автогенераторного оптичного перетворювача на основі фоточутливого МДН транзистора визначається на основі виразу (33), при цьому вважається, що вихідна напруга перетворювача також залежить від зміни оптичної потужності. Таким чином, функція чутливості автогенераторного оптичного перетворювача описується формулою

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} \left[U_{\text{св}}^2(\Phi) \mu_n^{-1}(\Phi) [U_3 - U_{\text{пор}}(\Phi)]^{-2} b_7 - U_{\text{св}}^4(\Phi) \mu_n^{-2}(\Phi) [U_3 - U_{\text{пор}}(\Phi)]^{-4} b_8 \right]^{-1/2} \times$$

$$\times \left\{ \left[2U_{\text{св}}(\Phi) \frac{dU_{\text{св}}(\Phi)}{d\Phi} \mu_n^{-1}(\Phi) [U_3 - U_{\text{пор}}(\Phi)]^{-2} - U_{\text{св}}^2(\Phi) \left(\mu_n^{-2}(\Phi) \frac{d\mu_n(\Phi)}{d\Phi} [U_3 - U_{\text{пор}}(\Phi)]^{-2} - \right. \right. \right. \quad (34)$$

$$\left. \left. - 2[U_3 - U_{\text{пор}}(\Phi)]^{-3} \frac{dU_{\text{пор}}(\Phi)}{d\Phi} \mu_n^{-1}(\Phi) \right) \right] b_7 - \left[4U_{\text{св}}^3(\Phi) \frac{dU_{\text{св}}(\Phi)}{d\Phi} \mu_n^{-2}(\Phi) [U_3 - U_{\text{пор}}(\Phi)]^{-4} - \right.$$

$$\left. \left. - U_{\text{св}}^4(\Phi) \left(2\mu_n^{-3}(\Phi) \frac{d\mu_n(\Phi)}{d\Phi} [U_3 - U_{\text{пор}}(\Phi)]^{-4} + 4[U_3 - U_{\text{пор}}(\Phi)]^{-5} \frac{dU_{\text{пор}}(\Phi)}{d\Phi} \mu_n^{-2}(\Phi) \right) \right] b_8 \right\}.$$

$$b_7 = \frac{L_{\text{кан}}}{2KtZC_0U_{\text{сб}}L}, \quad (35)$$

$$b_8 = \frac{L_{\text{кан}}^2}{4K^2t^2Z^2C_0^2U_{\text{сб}}^2R_g^2}. \quad (36)$$

На рис. 6 представлено теоретичні та експериментальні залежності функції чутливості автогенераторного перетворювача на основі фоточутливого МДН транзистора від зміни оптичної потужності.

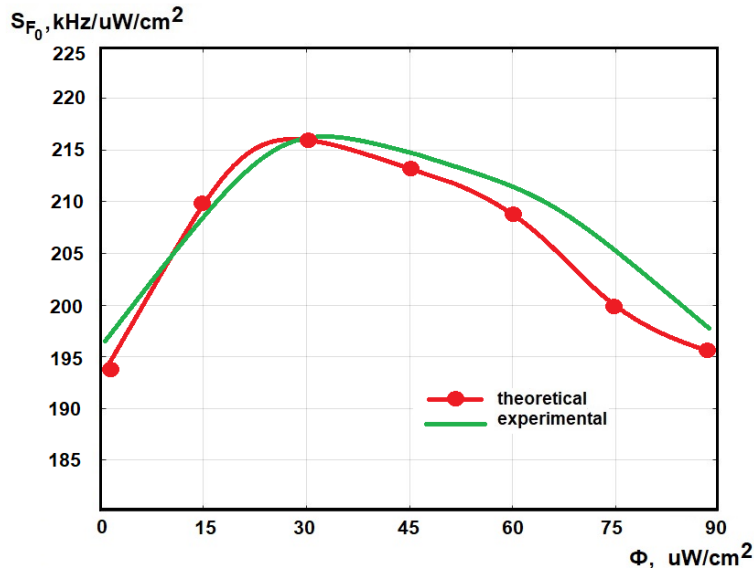


Рис. 6. Залежності функції чутливості мікроелектронного автогенераторного перетворювача на основі фоточутливого МДН транзистора від оптичної потужності

З графіка (рис. 6), видно, що чутливість розробленого автогенераторного перетворювача на основі фоточутливого МДН транзистора складає від 194 кГц/мкВт/см² до 215,2 кГц/мкВт/см² в діапазоні оптичної потужності 0...90 мкВт/см².

Висновки

1. Запропоновано мікроелектронні автогенераторні перетворювачі оптичної потужності на основі мікроелектронних транзисторних структур з диференційним від'ємним опором та первинним фоточутливим елементом на базі біполярного і польового фототранзисторів, причому первинні фоточутливі елементи є також активними елементами самих автогенераторів, що значно спрощує конструкцію перетворювачів.

2. На основі розгляду фізичних процесів у первинному фоточутливому елементі та автогенераторі розроблено математичну модель мікроелектронного оптичного перетворювача, на основі якої отримано параметричні залежності функцій перетворення та чутливості. Основним фактором зміни функцій перетворення та чутливості є зміна оптичної потужності. Це змінює еквівалентну ємність і диференціальний від'ємний опір коливальної системи мікроелектронного автогенераторного перетворювача оптичної потужності, змінюючи вихідну частоту пристрою. Оскільки оптична потужність змінюється в діапазоні 0...90 мкВт/см², то чутливість автогенераторного оптичного перетворювача змінюється від 151,3 кГц/мкВт/см² до 215,2 кГц/мкВт/см².

3. Отримані аналітичні вирази параметричної залежності функцій чутливості та перетворення, що демонструють можливість значно легшого розрахунку основних характеристик перетворювача, враховуючи вплив кожного параметра первинного фоточутливого елемента та параметрів автогенератора на вихідну частоту приладу у порівнянні з розрахунками цих параметрів з системами рівнянь Кірхгофа. Фоточутливі перетворювачі з частотним виходом не потребують аналого-цифрових перетворювачів та підсилювачів для подальшої обробки інформаційного сигналу, що значно знижує витрати на інформаційне та вимірювальне обладнання. Крім того, коли перетворювачі працюють на дуже високих частотах, можна передавати безпосередньо інформацію на відстань.

Література

1. Sabrie Soloman. Sensors. Handbook. New York: McGraw-Hill Companies. 2010. 1352 p.
2. Gilewski M. Micro-Electro-Mechanical Systems in Light Stabilization. Sensors. 2023; 23(6):2916. <https://doi.org/10.3390/s23062916>
3. Sensors and actuators: technology and applications / edited by Princeton Brown. New York: Library Press. 2017. 268 p.

4. Lu C., Dashtabi M.M., Nikbakht H., Khoshmehr M.T., Akca B.I. Sub-Nanometer Acoustic Vibration Sensing Using a Tapered-Tip Optical Fiber Microcantilever. *Sensors*. 2023; 23(2):924. <https://doi.org/10.3390/s23020924>
5. Jacob Fraden. *Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications*. Springer New York Heidelberg Dordrecht London. 2010. 681 p.
6. Lu X., Tian G., Wang Z., Li W., Yang D, Li H., Wang Y., Ni J., Zhang Y. Research on the Time Drift Stability of Differential Inductive Displacement Sensors with Frequency Output. *Sensors*. 2022; 22(16):6234. <https://doi.org/10.3390/s22166234>
7. Wu J., Zhang X., Chen L. Research on the Dual Modulation of All-Fiber Optic Current Sensor. *Sensors*. 2022; 22(2):430. <https://doi.org/10.3390/s22020430>
8. Marrazzo V.R., Fienga F., Riccio M., Irace A., Breglio G. Multichannel Approach for Arrayed Waveguide Grating-Based FBG Interrogation Systems. *Sensors*. 2021; 21(18):6214. <https://doi.org/10.3390/s21186214>
9. 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.
10. *Electronics for Sensors*. Edited by Giuseppe Ferri, Gianluca Barile and Alfiero Leoni E. MDPI: Basel, Switzerland. 2021. 274 p.
11. Boyko O., Hotra Z., Fechan A. Organic optical sensors of physical quantities. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika"*. Serie: Radioelektronika ta telekomunikatsii. Lviv : Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki, 2018. No 909. P. 42–50.
12. Bastian-Querner B., Binn L.S., Böser S., Brostean-Kaiser J., Hebecker D., ... Vocke A. The Wavelength-Shifting Optical Module. *Sensors*. 2022; 22(4):1385. <https://doi.org/10.3390/s22041385>
13. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Semenov A.O., Osadchuk I.O., Semenova O.O., Baraban S.V., Prytula M.O. Radiomeasuring Optical-Frequency Transducers 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. P. 229–261.
14. 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*. 2021. Vol. 13 No 4, 04001(6 p.)
15. Torbus S.A., Michalski J.A. Testing of a Polarimetric Current Sensor in the Frequency Domain. *Sensors*. 2021; 21(9):3008. <https://doi.org/10.3390/s21093008>
16. Sánchez-Fraga R., Tecpoyotl-Torres M., Mejía I., Mañón J.O., Riestra L.E., Alcantar-Peña J. Optical Sensor, Based on an Accelerometer, for Low-Frequency Mechanical Vibrations. *Micromachines (Basel)*. 2022 Sep 3;13(9):1462. doi: 10.3390/mi13091462. PMID: 36144085; PMCID: PMC9502717.
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.
18. 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. P. 33.
19. Assaf T. A Frequency Modulation-Based Taxel Array: A Bio-Inspired Architecture for Large-Scale Artificial Skin. *Sensors* 2021, 21, 5112. P. 1–17. <https://doi.org/10.3390/s21155112>
20. Осадчук О.В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О. Дослідження автогенераторних параметричних оптичних сенсорів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 33(72), № 3. 2022. С. 106-114. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/17>
21. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/26264/VISHAY/BPX43.html>
22. Sze S.M., Kwok K.Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley-Interscience: Hoboken, USA, 2007. P. 435–455.
23. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Seletska O.O., Kisała P., Nurseitova K. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Volume 11176, 2019, Article number 111761I. ISSN 0277-786X. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2538264>
24. 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. P. 271–285. ISBN 978-1-9993071-4-1
25. Борисов О.В. *Основи твердотільної електроніки*. Київ. Освіта України. 2011. 460 с.

References

1. Sabrie Soloman. *Sensors. Handbook*. New York: McGraw-Hill Companies. 2010. 1352 p.

2. Gilewski M. Micro-Electro-Mechanical Systems in Light Stabilization. *Sensors*. 2023; 23(6):2916. <https://doi.org/10.3390/s23062916>
3. *Sensors and actuators: technology and applications* / edited by Princeton Brown. New York: Library Press. 2017. 268 p.
4. Lu C., Dashtabi M.M., Nikbakht H., Khoshmehr M.T., Akca B.I. Sub-Nanometer Acoustic Vibration Sensing Using a Tapered-Tip Optical Fiber Microcantilever. *Sensors*. 2023; 23(2):924. <https://doi.org/10.3390/s23020924>
5. Jacob Fraden. *Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications*. Springer New York Heidelberg Dordrecht London. 2010. 681 p.
6. Lu X., Tian G., Wang Z., Li W., Yang D, Li H., Wang Y., Ni J., Zhang Y. Research on the Time Drift Stability of Differential Inductive Displacement Sensors with Frequency Output. *Sensors*. 2022; 22(16):6234. <https://doi.org/10.3390/s22166234>
7. Wu J., Zhang X., Chen L. Research on the Dual Modulation of All-Fiber Optic Current Sensor. *Sensors*. 2022; 22(2):430. <https://doi.org/10.3390/s22020430>
8. Marrazzo V.R., Fienga F., Riccio M., Irace A., Breglio G. Multichannel Approach for Arrayed Waveguide Grating-Based FBG Interrogation Systems. *Sensors*. 2021; 21(18):6214. <https://doi.org/10.3390/s21186214>
9. 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.
10. *Electronics for Sensors*. Edited by Giuseppe Ferri, Gianluca Barile and Alfiero Leoni E. MDPI: Basel, Switzerland. 2021. 274 p.
11. Boyko O., Hotra Z., Fechan A. Organic optical sensors of physical quantities. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika"*. Serie: Radioelektronika ta telekomunikatsii. Lviv : Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki, 2018. No 909. P. 42–50.
12. Bastian-Querner B., Binn L.S., Böser S., Brostean-Kaiser J., Hebecker D., ... Vocke A. The Wavelength-Shifting Optical Module. *Sensors*. 2022; 22(4):1385. <https://doi.org/10.3390/s22041385>
13. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Semenov A.O., Osadchuk I.O., Semenova O.O., Baraban S.V., Prytula M.O. Radiomeasuring Optical-Frequency Transducers 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. P. 229–261.
14. 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. 2021. Vol. 13 No 4, 04001(6 p.)
15. Torbus S.A., Michalski J.A. Testing of a Polarimetric Current Sensor in the Frequency Domain. *Sensors*. 2021; 21(9):3008. <https://doi.org/10.3390/s21093008>
16. Sánchez-Fraga R., Tecpoyotl-Torres M., Mejía I., Mañón J.O., Riestra L.E., Alcantar-Peña J. Optical Sensor, Based on an Accelerometer, for Low-Frequency Mechanical Vibrations. *Micromachines* (Basel). 2022 Sep 3;13(9):1462. doi: 10.3390/mi13091462. PMID: 36144085; PMCID: PMC9502717.
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.
18. 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. P. 33.
19. Assaf T. A Frequency Modulation-Based Taxel Array: A Bio-Inspired Architecture for Large-Scale Artificial Skin. *Sensors* 2021, 21, 5112. P. 1–17. <https://doi.org/10.3390/s21155112>
20. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.O. Research of self-generating parametric optical sensors. *Scientific papers of TNU named after V.I. Vernadskyi*. Series: Technical sciences. Volume 33(72), No. 3 2022. P. 106-114. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/17>
21. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/26264/VISHAY/BPX43.html>
22. Sze S.M., Kwok K.Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley-Interscience: Hoboken, USA, 2007. P. 435–455.
23. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Seletska O.O., Kisała P., Nurseitova K. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Volume 11176, 2019, Article number 111761I. ISSN 0277-786X. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2538264>
24. 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. P. 271–285. ISBN 978-1-9993071-4-1
25. Borysov O.V. *Fundamentals of solid-state electronics*. Kyiv. Education of Ukraine. 2011. 460 p.