

УДК 681.586.776:621.382

В. С. Осадчук, д. т. н., проф.; О. М. Ільченко**ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ОПТИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ОСНОВІ
ПОЛЬОВИХ ФОТОТРАНЗИСТОРІВ З ДВОСТОРОННІМ
ОСВІТЛЕННЯМ КАНАЛУ**

Показано можливість перетворення оптичної потужності на основі автогенераторного пристрою, який складається з транзисторних структур з від'ємним опором, і в якому фоточутливим елементом є МДН-транзистор з двостороннім освітленням каналу. Отримано аналітичні залежності вольт-амперної характеристики та функції перетворення, які можуть бути використані для інженерного розрахунку параметрів перетворювачів оптичної потужності.

Ключові слова: МДН-фототранзистор, оптичне випромінювання, повний опір, транзисторні структури з від'ємним опором, математична модель.

Вступ

Сучасний стан розвитку вітчизняної інформаційно-вимірювальної техніки визначається тенденцією до динамічного впровадження високоефективних мініатюрних первинних перетворювачів фізичних величин у системи контролю та діагностики технічних і нетехнічних процесів у військовій, аерокосмічній, автомобілебудівній та інших галузях сучасної економіки України.

Існуюча ситуація обумовлює необхідність у проведенні наукових досліджень у галузі вітчизняного виробництва мікроелектронних перетворювачів фізичних величин щодо покращення їхніх основних параметрів: ефективних масогабаритних показників, високих надійності, чутливості, стабільності характеристик, точності, відтворюваності, низької вартості, широкої номенклатури та інтеграції з мікропроцесорними пристроями обробки вимірюваної інформації [1 – 3].

Конструктивне об'єднання інтегральних первинних вимірювальних перетворювачів з цифровими мікропроцесорними пристроями дозволяє здійснити їхню інтелектуалізацію. Крім зняття вимірюваної інформації відбувається її практично одночасне опрацювання, фільтрація, стиск і коригування. При цьому перевага використання частотного інформативного сигналу первинного перетворювача над його аналоговою формою у вигляді напруги або струму обумовлена простотою та точністю перетворення частоти в цифровий код, його високою завадостійкістю під час передачі та ефективністю комутації в багатоканальних вимірювальних системах [3]. Перспективним напрямком є використання реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором для створення пристроїв генерування та функціональних мікроелектронних перетворювачів з частотним кодуванням інформації [4].

Для вивчення властивостей таких перетворювачів використаємо математичну модель фотоперетворювача на основі використання мікроелектронних частотних перетворювачів оптичної потужності. Тому завдання полягає в розробці математичної моделі, на основі якої можна отримати вольт-амперну характеристику, залежність повного опору структури, вивести функцію перетворення.

Математична модель

Проаналізувавши існуючі перетворювачі оптичної потужності на основі використання реактивних властивостей напівпровідникових структур [5], запропоновано власний метод розв'язку проблем у цій галузі сенсорної техніки, а саме, використовувати радіовимірювальні схеми на основі МДН-структури з двостороннім освітленням каналу.

МДН-фототранзистор розроблений для вирішення прикладних задач інтегральної фотоелектроніки і фотосенсорики.

Відомі МДН-фототранзистори (МДНФТ) з напівпрозорим електродом, через який освітлюється підзатворна зона. Відомо також, що електрод затвора тонкоплівкового МДНФТ можна виконувати непрозорим, а освітлення робити через підкладку. До недоліків таких приладів належать невисока фоточутливість і ускладнена технологія [6]. У відомому фототранзисторі на основі МДН-структури, який містить напівпровідникову підкладку, одна із поверхонь якої є чутливою до випромінювання, із зонами стоку, витoku і каналу, на якій сформовано шар діелектрика і електрод затвора, поверхня підкладки, вільна від діелектрика, є чутливою до випромінювання і має над зоною каналу пази [7].

З метою розширення функціональних можливостей, а саме, збільшення чутливості фототранзистора до випромінювання, у запропонованій конструкції МДНФТ, яка містить підкладку з $p\text{-Si}$, з прозорим затворним електродом з Au , через який освітлюється підзатворна зона, зі зворотної сторони підкладки під зоною каналу виконані глибокі пази, площа перерізу кожного з яких відповідає такому співвідношенню: $A < S/n$, де S – площа каналу, n – число пазів. При цьому глибина пазів повинна бути такою, щоб виконувалася умова $ad \rightarrow 1$, де a – коефіцієнт поглинання, d – товщина пластини між дном паза і діелектрика затвора (рис. 1). Отже, освітлення здійснюється і через підкладку, і через затвор.

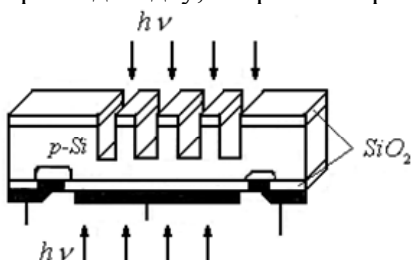


Рис. 1. Конструкція МДН-фототранзистора з двостороннім освітленням каналу

Схему частотного перетворювача на основі біполярного та МДН-транзистора показано на рис. 2. Фоточутливим елементом виступає МДН-транзистор з двостороннім освітленням каналу.

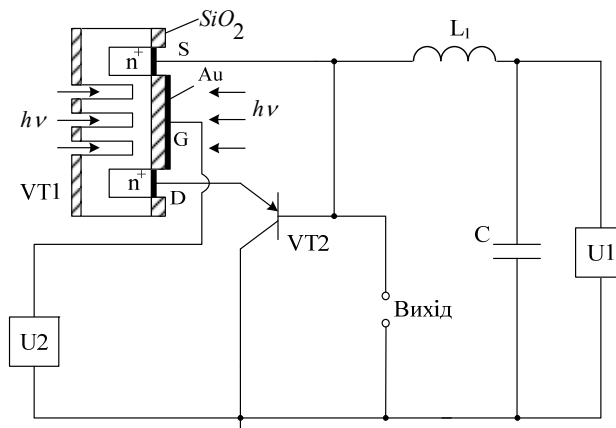


Рис. 2. Електрична схема перетворювача на основі МДН та біполярного транзисторів

Для розрахунку вольт-амперної характеристики (ВАХ) перетворювача на основі його еквівалентної схеми для постійного струму (рис. 3) скористаємося системою рівнянь Кірхгофа (1). Для визначення ВАХ найкраще обрати метод контурних струмів, що й було зроблено. Перевагою цього методу є те, що він наочно дає можливість визначити ВАХ, виходячи з розробленої теорії матричних розрахунків.

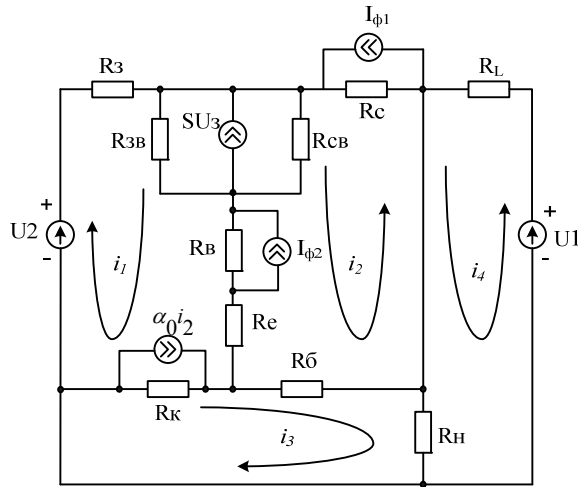


Рис. 3. Еквівалентна схема перетворювача для постійного струму

$$\begin{cases}
 U_1 = (R_H + R_L) i_4 + R_H i_3, \\
 0 = (R_K + R_{\sigma} + R_H) i_3 - R_K \alpha_0 i_2 + R_{\sigma} i_2 + R_H i_4, \\
 0 = (R_{\sigma} + R_C + R_{CB} + R_e + R_e) i_2 + R_{\sigma} i_3 + \\
 + R_e I_{\phi 2} + (R_e + R_e) i_1 - R_C I_{\phi 1} + R_{CB} S U_3, \\
 U_2 = (R_3 + R_{3B} + R_e + R_e + R_K) i_1 + R_{3B} \cdot S U_3 + \\
 + (R_e + R_e) i_2 + R_e I_{\phi 2} - R_K i_3 + R_K \alpha_0 i_2.
 \end{cases} \quad (1)$$

Розв’язавши систему рівнянь (1) за допомогою програмного пакета MatLab 5.2, визначимо ВАХ частотного перетворювача (рис. 4). Як видно, чим більша потужність світлового випромінювання, тим вище лежить максимум ВАХ.

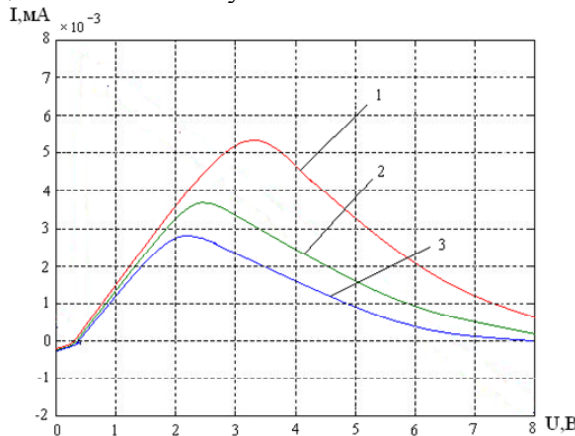


Рис. 4. Ряд ВАХ мікроелектронного частотного перетворювача оптичної потужності:

$$1 - 120 \text{ мкВт} / \text{см}^2 ; 2 - 60 \text{ мкВт} / \text{см}^2 ; 3 - 0 \text{ мкВт} / \text{см}^2$$

Для визначення функції перетворення необхідно знайти залежність частоти генерації від потужності падаючого випромінювання. Це можна зробити розв’язавши систему рівнянь Кірхгофа, яка складена для змінного струму на основі еквівалентної схеми (рис. 5).

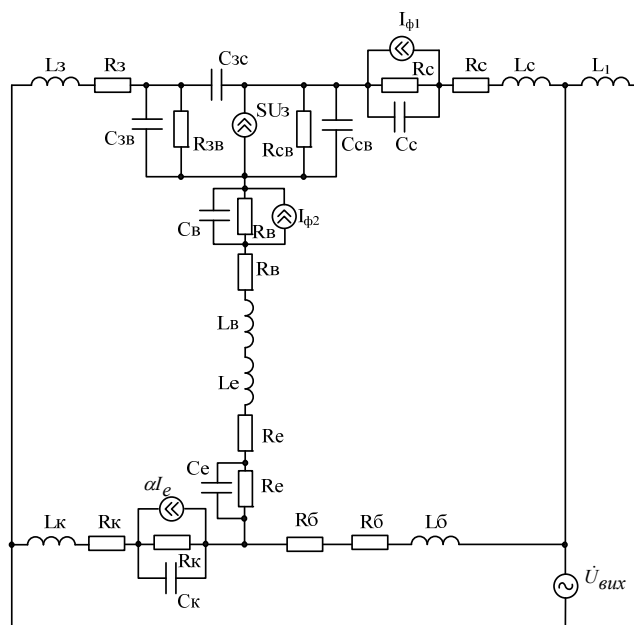


Рис. 5. Еквівалентна схема перетворювача на основі біполярного і МДН-транзисторів

Для зручності розрахунків подано еквівалентну схему, яка наведена на рис. 6.

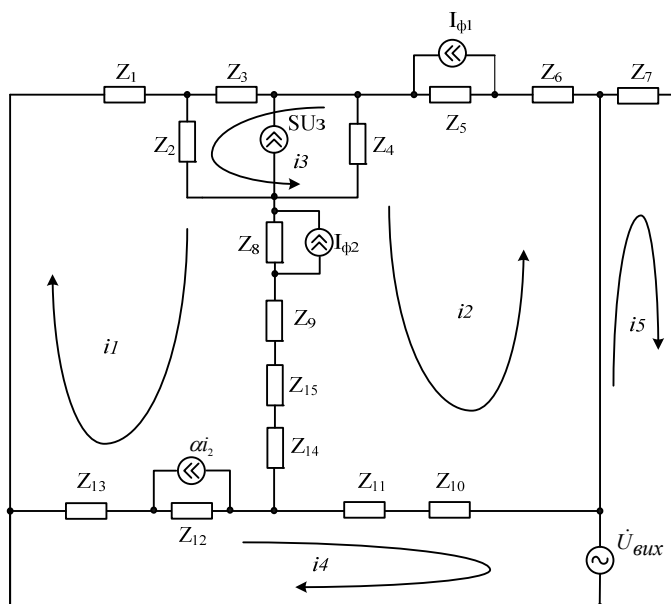


Рис. 6. Змінена еквівалентна схема перетворювача

Система рівнянь Кірхгофа для змінного струму має вигляд:

$$\begin{cases}
 \bullet \\
 U_{вух} = Z_7 i_5, \\
 \bullet \\
 U_{вух} = (Z_{13} + Z_{12} + Z_{11} + Z_{10}) i_4 + Z_{12} \alpha i_2 - (Z_{13} + Z_{12}) i_1 + (Z_{10} + Z_{11}) i_2, \\
 0 = (Z_4 + Z_8 + Z_9 + Z_{15} + Z_{14} + Z_{11} + Z_{10} + Z_6 + Z_5) i_2 + Z_8 I_{\phi 2} + \\
 + (Z_8 + Z_9 + Z_{14} + Z_{15}) i_1 + (Z_{10} + Z_{11}) i_4 + Z_4 S U_3 - Z_4 i_3 - Z_5 I_{\phi 1}, \\
 0 = (Z_1 + Z_2 + Z_8 + Z_9 + Z_{15} + Z_{14} + Z_{12} + Z_{13}) i_1 + Z_2 i_3 + Z_2 S U_3 + Z_8 I_{\phi 2} + \\
 (Z_8 + Z_9 + Z_{15} + Z_{14}) i_2 - Z_{12} \alpha i_2 - (Z_{12} + Z_{13}) i_4, \\
 0 = (Z_3 + Z_2 + Z_4) i_3 + Z_2 i_1 + (Z_3 + Z_2 - Z_4) S U_3 - Z_4 i_2,
 \end{cases} \quad (2)$$

де

$$Z_1 = R'_3 + j\omega L_3, \quad Z_2 = \frac{R_{3\phi}}{1 + \omega^2 R_{3\phi}^2 C_{3\phi}^2} - j \frac{\omega R_{3\phi}^2 C_{3\phi}}{1 + \omega^2 R_{3\phi}^2 C_{3\phi}^2}, \quad Z_3 = -j / (\omega C_{3c}), \quad Z_7 = j\omega L_1,$$

$$Z_6 = R'_c + j\omega L_c, \quad Z_4 = \frac{R_{c\phi}}{1 + \omega^2 R_{c\phi}^2 C_{c\phi}^2} - j \frac{\omega R_{c\phi}^2 C_{c\phi}}{1 + \omega^2 R_{c\phi}^2 C_{c\phi}^2}, \quad Z_9 = R'_e + j\omega L_e, \quad Z_{11} = R_{\phi},$$

$$Z_{10} = R'_{\phi} + j\omega L_{\phi}, \quad Z_5 = \frac{R_c}{1 + \omega^2 R_c^2 C_c^2} - j \frac{\omega R_c^2 C_c}{1 + \omega^2 R_c^2 C_c^2}, \quad Z_{13} = R'_k + j\omega L_k, \quad \alpha = \alpha_1 - j\alpha_2,$$

$$Z_{15} = R'_e + j\omega L_e, \quad Z_8 = \frac{R_e}{1 + \omega^2 R_e^2 C_e^2} - j \frac{\omega R_e^2 C_e}{1 + \omega^2 R_e^2 C_e^2}, \quad \alpha_1 = \frac{\alpha_0}{1 + (f/f_{\alpha})^2}, \quad \alpha_2 = \frac{\alpha_0 f/f_{\alpha}}{1 + (f/f_{\alpha})^2},$$

$$Z_{12} = \frac{R_k}{1 + \omega^2 R_k^2 C_k^2} - j \frac{\omega R_k^2 C_k}{1 + \omega^2 R_k^2 C_k^2}, \quad Z_{14} = \frac{R_e}{1 + \omega^2 R_e^2 C_e^2} - j \frac{\omega R_e^2 C_e}{1 + \omega^2 R_e^2 C_e^2},$$

де R'_{ϕ}, R'_k, R'_e – опір виводів бази, колектора й емітера відповідно; R_{ϕ}, R_k, R_e – об'ємний опір бази, колектора, емітера відповідно; C_k, C_e – ємність колекторного й емітерного переходів; L_{ϕ}, L_k, L_e – індуктивність базового, колекторного й емітерного електродів; R'_3, R'_c, R'_e – опір виводів затвора, стоку і витоку відповідно; L_3, L_c, L_e – індуктивність виводів затвора, стоку і витоку відповідно; L_1 – зовнішня індуктивність; R_c, R_e – об'ємний опір стоку, витоку; I_{ϕ} – значення фотоструму $p-n$ переходів стоку і витоку; C_c, C_e – ємність $p-n$ переходу стоку, витоку; $R_{3\phi}, R_{c\phi}$ – опір затвора-витоку, стоку-витоку; $C_{3\phi}, C_{3c}, C_{c\phi}$ – ємність затвора-витоку, затвора-стоку, стоку-витоку; f – робоча частота; f_{α} – критична частота біполярного транзистора в схемі зі спільною базою. Числові значення цих параметрів узяті з [8].

Розв'язавши систему рівнянь (2) за допомогою програмного пакета MatLab 5.2, можна отримати величину повного опору на електродах колектор-стік перетворювача. Активна складова повного опору приймає від'ємне значення, а реактивна – ємнісний характер. Підключення зовнішньої індуктивності до клем колектор-затвор структури при від'ємних

значеннях активної складової, коли компенсуються втрати енергії в коливальному контурі, дозволяє створити генератор електричних коливань. При дії світла на канал МДН-транзистора здійснюється зміна активної та реактивної складової опору, а це в свою чергу, змінює частоту генерації.

Під час розділу повного опору на дійсну і уявну складові, неважко визначити еквівалентну ємність коливального контуру, яка залежить від потужності оптичного випромінювання. Еквівалентна ємність перетворювача визначає залежність частоти генерації від потужності діючого світла. Функція перетворення в цьому випадку має вигляд:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi R_{екв}(P)C_{екв}(P)} \sqrt{\frac{R_{екв}^2(P)C_{екв}(P)}{L} - 1}.$$

На рис. 7 наведено залежність частоти генерації від потужності оптичного випромінювання.

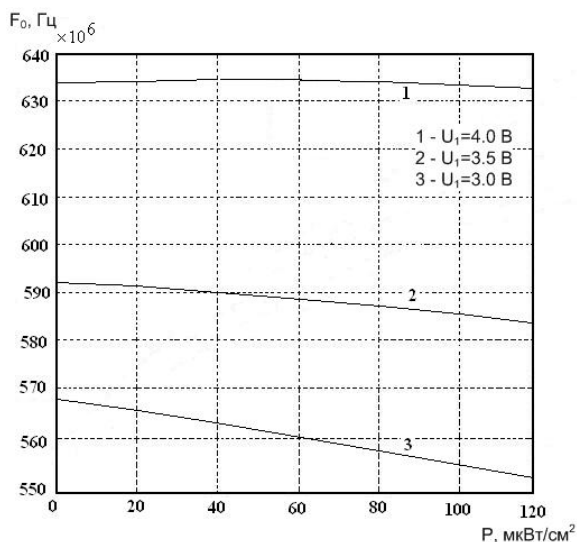


Рис. 7. Залежність резонансної частоти від потужності оптичного випромінювання

Змінюючи режим живлення фоточутливого перетворювача, можна отримати лінійну залежність частоти генерації від потужності падаючого світла.

Фотоперетворювачі з частотним виходом на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором використовуються для реалізації нових технічних рішень під час вирішення задач з підвищення ефективності емісійно-спектрального контролю [9]

Можливі й інші схеми вимірювання, побудовані за структурою МДН і використанням автогенератора. Авторами статті отримано чимало патентів на винаходи та корисні моделі.

Висновок

Розроблена математична модель мікроелектронного перетворювача оптичної потужності, який складається з біполярного транзистора та МДН-структури з двостороннім освітленням каналу. На основі математичної моделі отримано вольт-амперну характеристику та функцію перетворення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Білинський Й. Й. Аналіз сучасних багатоелементних фотоприймальних пристроїв та оптико-електронних методів і засобів на їх основі / Й. Й. Білинський // Вісник ВПІ. – 2005. – № 5. – С. 9 – 15.
2. Terry Guy. Interline CCDs Serve Machine Vision Applications / Terry Guy // Photonics spectra. – 2004. – Т. 38. – № 4. – Р. 72 – 73.
3. Бабаян Р. Р. Преобразователи неэлектрических величин с частотным выходом / Р. Р. Бабаян //

Приборы и системы управления. – 1996. – №11. – С. 24 – 27.

4. Осадчук О. В. Дослідження НВЧ генератора електричних коливань на основі транзисторної структури з від'ємним опором / О. В. Осадчук, А. О. Семенов // Вісник ВПІ. – 2005. – № 5. – С. 149 – 154.

5. Осадчук В. С. Аналіз сучасного стану реалізації фоточутливих перетворювачів / Осадчук О. В., Ільченко О. М., Барабан С. В. / Матеріали 4-ї міжнародної науково-практичної конференції «Научно пространство на Європа – 2008» / Том 27 / Технические науки / Электротехника и радиоэлектроника. – Софія (Болгарія): «Бял ГРАД-БГ» ООД. – С. 3 – 10.

6. Костенко В. Л. Комбинированные твердотельные структуры и микроэлектронные сенсоры / Костенко В. Л. – Запорожье: ЗГИА, 1997. – 109 с.

7. А.с. N 862753, СССР. МКИ Н 01 L 31/10. Фототранзистор / Костенко В. Л., Клименко В. А. – Зарег. 05.07.81.

8. Разевиг В. Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0 / Разевиг В. Д. – М.: Солон-Р, 2000. – 698 с.

9. Пат. 4229, Україна, МПК Н 01L 21/302. Пристрій для визначення моменту закінчення процесу плазмового травлення / Кравченко Ю. С., Даниленко О. О. – 2005, Бюл. № 1. – 4 с.

Осадчук Володимир Степанович – д. т. н., професор, завідувач кафедри електроніки, тел.: (0432)-598013.

Ільченко Олена Миколаївна – магістрант, кафедра електроніки, e-mail.: alenail_86@mail.ru, тел.: (0432)-688911.

Вінницький національний технічний університет.