

УДК 621.3.049

В.С. ОСАДЧУК, Ю.С. КРАВЧЕНКО, О.О. СЕЛЕЦЬКА
Вінницький національний технічний університет**ОПТИЧНИЙ МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ З
ФОТОТРАНЗИСТОРОМ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПЛАЗМОХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ**

Розроблено математичну модель мікроелектронного оптичного перетворювача для контролю плазмохімічних процесів, яка складається з біполярного та МДН- транзисторів та фототранзистора в якості фоточутливого елемента, на основі якої отримано аналітичні залежності для функції перетворення та рівняння чутливості.

The mathematical model of microelectronic optical converter composed of bipolar and mosfet transistors with photo transistor as photosensitive element has been developed. On the base of this model analytical dependences of function of transformation and the equation of sensitivity are received.

Ключові слова: оптичний перетворювач, чутливість, біполярний транзистор, МДН транзистор.

Вступ

Базовим елементом системи управління плазмохімічних технологічних процесів є безперервний моніторинг їх фізичних та технологічних параметрів [1,2], який здійснюється за рахунок збору та обробки інформації від спеціальних сенсорів. Високої точності в системах контролю таких технологічних процесів можна досягнути використовуючи оптоелектронні сенсори на основі транзисторних структур з від'ємним опором [3]. Тому дана робота присвячена дослідженню характеристик оптичного перетворювача на основі автогенераторного пристрою, в якому коливальний контур створено на основі ємнісної складової повного вихідного опору та зовнішньої індуктивності. Фоточутливим елементом схеми є фототранзистор, який має істотно більшу інтегральну чутливість, ніж фотодіод та ширший частотний діапазон, ніж у фоторезистора [4].

Постановка задачі досліджень

Для виявлення властивостей частотного оптичного перетворювача необхідно розробити математичну модель, на основі якої можна отримати залежність активної і реактивної складової повного опору структури від освітленості та вивести функцію перетворення оптичного перетворювача, який використовується в системі контролю плазмохімічних процесів. Одним із таких процесів є процес травлення органічного фоторезисту, де оптичний частотний перетворювач використовується для реєстрації випромінювання смуги СО з довжиною хвилі 520 нм. Розгляду цих питань присвячена дана робота.

Математична модель

Схема частотного перетворювача з фототранзистором представлена на рис. 1. Випромінювання, що потрапляє на фототранзистор VT3, має довжину хвилі 520 нм. Для виділення цієї смуги використовувався смуговий інтерференційний фільтр.

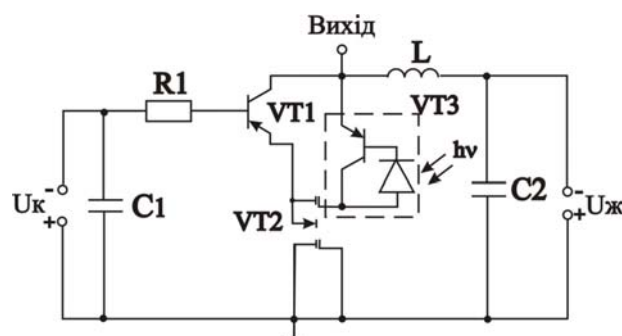


Рис. 1. Схема мікроелектронного оптичного перетворювача з фототранзистором

Для визначення функції перетворення фотоперетворювача необхідно розрахувати повний опір на електродах колектор-стік транзисторів VT1 та VT2 згідно з його еквівалентною схемою для змінного струму (рис. 2).

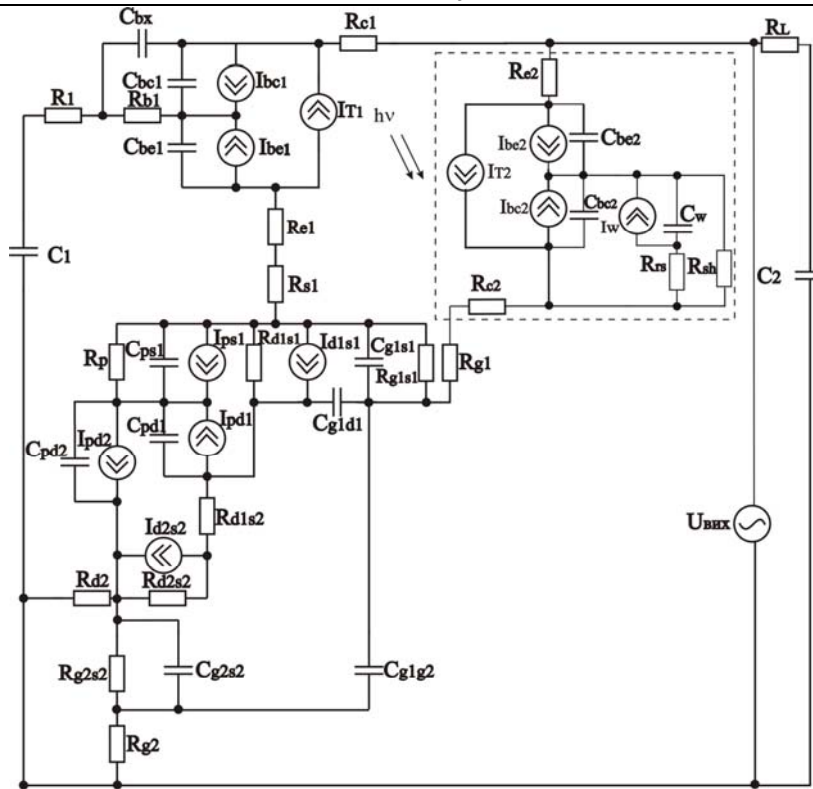


Рис. 2. Еквівалентна схема оптичного перетворювача по змінному струму

Перетворимо її в зручнішу для проведення розрахунків (рис. 3).

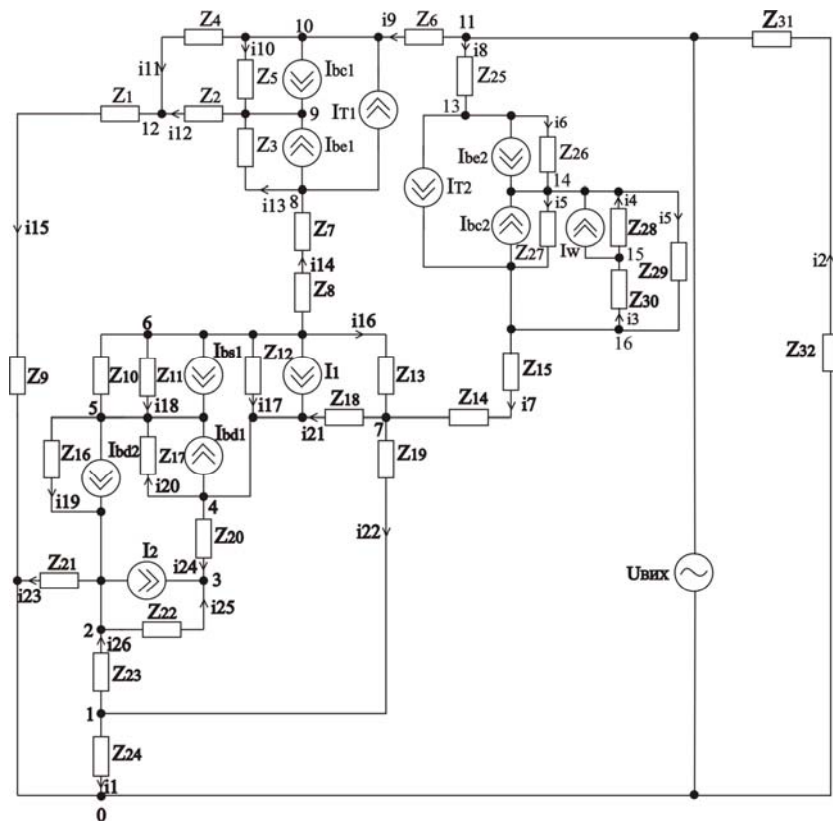


Рис. 3. Перетворена еквівалентна схема оптичного перетворювача по змінному струму

На основі перетвореної еквівалентної схеми (рис. 3) для розрахунку повного опору схеми складемо систему рівнянь Кірхгофа, використавши метод вузлових потенціалів. Система рівнянь Кірхгофа для змінного струму має вигляд:

$$\begin{cases}
0 = -\varphi_1(Y_1 + Y_{26} + Y_{22}) + \varphi_2 Y_{26} + \varphi_7 Y_{22} \\
I_2 - I_{bd2} = \varphi_1 Y_{26} - \varphi_2(Y_{26} + Y_{25} + Y_{23} + Y_{19}) + \varphi_3 Y_{25} + \varphi_5 Y_{19} \\
-I_2 = \varphi_2 Y_{25} - \varphi_3(Y_{25} + Y_{24}) + \varphi_4 Y_{24} \\
I_{bd1} - I_1 = \varphi_3 Y_{24} - \varphi_4(Y_{24} + Y_{20} + Y_{17} + Y_{21}) + \varphi_5 Y_{20} + \varphi_6 Y_{17} + \varphi_7 Y_{21} \\
I_{bd2} - I_{bs1} - I_{bd1} = \varphi_2 Y_{19} + \varphi_4 Y_{20} - \varphi_5(Y_{18} + Y_{19} + Y_{20}) + \varphi_6 Y_{18} \\
I_{bs1} + I_1 = \varphi_4 Y_{17} + \varphi_5 Y_{18} - \varphi_6(Y_{18} + Y_{17} + Y_{14} + Y_{16}) + \varphi_7 Y_{16} + \varphi_8 Y_{14} \\
0 = \varphi_1 Y_{22} + \varphi_4 Y_{21} + \varphi_6 Y_{16} - \varphi_7(Y_{21} + Y_{16} + Y_7 + Y_{22}) + \varphi_{16} Y_7 \\
I_{be1} + I_{T1} = \varphi_6 Y_{14} - \varphi_8(Y_{13} + Y_{14}) + \varphi_9 Y_{13} \\
-(I_{bc1} + I_{be1}) = \varphi_8 Y_{13} - \varphi_9(Y_{10} + Y_{13} + Y_{12}) + \varphi_{10} Y_{10} + \varphi_{12} Y_{12} \\
I_{bc1} - I_{T1} = \varphi_9 Y_{10} - \varphi_{10}(Y_{11} + Y_{10} + Y_9) + \varphi_{11} Y_9 + \varphi_{12} Y_{11} \\
-U_{aux} Y_2 = \varphi_{10} Y_9 - \varphi_{11}(Y_9 + Y_8 + Y_2) + \varphi_{13} Y_8 \\
0 = \varphi_9 Y_{12} + \varphi_{10} Y_{11} - \varphi_{12}(Y_5 + Y_{11} + Y_{12}) \\
I_{T2} + I_{be2} = \varphi_{11} Y_8 - \varphi_{13}(Y_{18} + Y_6) + \varphi_{14} Y_6 \\
-(I_{bc2} + I_{be2} + I_W) = \varphi_{13} Y_6 - \varphi_{14}(Y_6 + Y_5 + Y_4) + \varphi_{15} Y_4 + \varphi_{16} Y_5 \\
I_W = \varphi_{14} Y_4 - \varphi_{15}(Y_4 + Y_3) + \varphi_{16} Y_3 \\
I_{bc2} - I_{T2} = \varphi_7 Y_7 + \varphi_{14} Y_5 + \varphi_{15} Y_3 - \varphi_{16}(Y_5 + Y_3 + Y_7)
\end{cases} \quad (1)$$

Провідності гілок схеми визначаються за формулами:

$$\begin{aligned}
Y_1 &= 1/Z_{24}; Y_2 = 1/(Z_{32} + Z_{31}); Y_3 = 1/Z_{30}; Y_4 = 1/Z_{28}; Y_5 = (Z_{27} + Z_{29})/(Z_{27}Z_{29}); \\
Y_6 &= 1/Z_{26}; Y_7 = 1/(Z_{15} + Z_{14}); Y_8 = 1/Z_{25}; Y_9 = 1/Z_6; Y_{10} = 1/Z_5; Y_{11} = 1/Z_4; Y_{12} = 1/Z_2; \\
Y_{13} &= 1/Z_3; Y_{14} = 1/(Z_7 + Z_8); Y_{15} = 1/Z_9; Y_{16} = 1/Z_{13}; Y_{17} = 1/Z_{12}; Y_{18} = (Z_{11} + Z_{10})/(Z_{10}Z_{11}); \\
Y_{19} &= 1/Z_{16}; Y_{20} = 1/Z_{17}; Y_{21} = 1/Z_{18}; Y_{22} = 1/Z_{19}; Y_{23} = 1/Z_{21}; Y_{24} = 1/Z_{20}; Y_{25} = 1/Z_{22}; \\
Y_{26} &= 1/Z_{23},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{де } Z_1 &= R_1; Z_2 = R_{b1}; Z_3 = -j/\omega(C_{bc1}); Z_4 = -j/(\omega C_{bx}); Z_5 = -j/(\omega C_{bc1}); \\
Z_6 &= R_{c1}; Z_7 = R_{e1}; Z_8 = R_{s1}; Z_9 = -j/(\omega C_1); Z_{10} = R_p; Z_{11} = -j/(\omega C_{ps1}); \\
Z_{12} &= R_{d1s1}; Z_{13} = R_{g1s1}/(1 + \omega^2 R_{g1s1}^2 C_{g1s1}^2) - j(R_{g1s1}^2 \omega C_{g1s1}/(1 + \omega^2 R_{g1s1}^2 C_{g1s1}^2)); \\
Z_{14} &= R_{g1}; Z_{15} = R_{c2}; Z_{16} = -j/(\omega C_{pd2}); Z_{17} = -j/(\omega C_{pd1}); Z_{18} = -j/(\omega C_{g1d1}); \\
Z_{19} &= -j/(\omega C_{g1g2}); Z_{20} = R_{d1s2}; Z_{21} = R_{d2}; Z_{22} = R_{d2s2}; \\
Z_{23} &= R_{g2s2}/(1 + \omega^2 R_{g2s2}^2 C_{g2s2}^2) - j(R_{g2s2}^2 \omega C_{g2s2}/(1 + \omega^2 R_{g2s2}^2 C_{g2s2}^2)); Z_{24} = R_{g2}; \\
Z_{25} &= R_{e2}; Z_{26} = -j/(\omega C_{be2}); Z_{27} = -j/(\omega C_{bc2}); Z_{28} = -j/(\omega C_W); Z_{29} = R_{sh}; Z_{30} = R_{rs}; \\
Z_{31} &= j\omega L; Z_{32} = -j/(\omega C_2),
\end{aligned}$$

де R_{b1}, R_{c1}, R_{e1} – об’ємний опір бази, колектора і емітера транзистора VT1, відповідно; R_{e2}, R_{c2} – об’ємний опір емітера і колектора фототранзистора VT3 відповідно; C_{bc1}, C_{be1} – ємність переходу база-колектор та база-емітер транзистора VT1 відповідно; C_{bc2}, C_{be2} – ємність переходу база-колектор та база-емітер транзистора VT3 відповідно; C_{bx} – ємність між зовнішнім виводом бази і колектора транзистора VT1; R_{g1} – об’ємний опір затвору, R_{g1s1} та R_{g2s2} – об’ємні опори затвор-витік МДН-транзистора; R_{d1s1}, R_{d1s2} та R_{d2s2} – опори стік-витік МДН-транзистора; R_{s1}, R_{d2}, R_{g1} та R_{g2} – об’ємні опори витоку, стоку та затворів двозатворного МДН-транзистора відповідно; R_p – опір підкладки; R_{rs} – опір діода, що входить до складу фототранзистора VT3; R_{sh} – шунтуючий опір діода фототранзистора VT3; C_{g1s1} та C_{g2s2} – ємності затвор-витік; C_{g1d1} – ємність затвор-стік; C_{ps1} – ємність підкладка-витік; C_{pd1} та C_{pd2} – ємності підкладка-стік; C_1 та C_2 – ємності конденсаторів C_1 та C_2 відповідно; C_W – ємність p-n переходу діода фототранзистора VT3.

Систему рівнянь (1) розв’язуємо за методом Гауса за допомогою програмного пакету Matlab 5.2.

На рис. 4 та 5 показані розрахункові та експериментальні залежності активної складової повного

опору та ємнісної реактивної складової повного опору від напруги живлення відповідно.

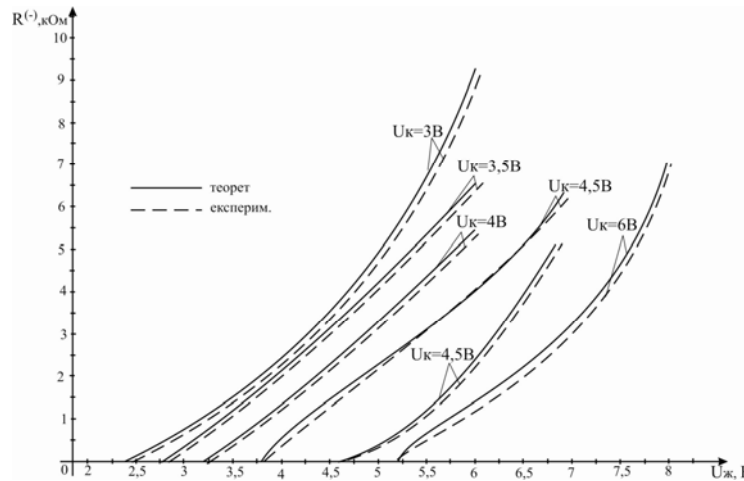


Рис. 4. Теоретичні та експериментальні залежності активної складової опору від напруги живлення

Активна складова повного опору при напрузі живлення 6 В має максимальне значення і збільшується із збільшенням напруги живлення.

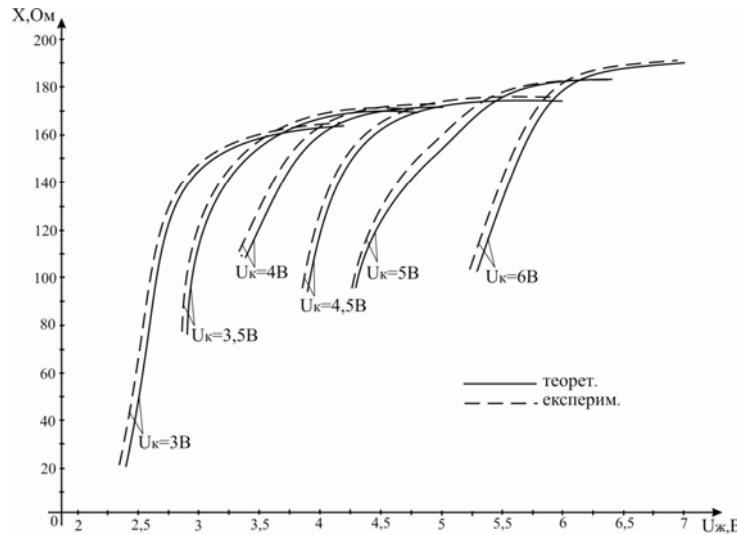


Рис. 5. Теоретичні та експериментальні залежності реактивної складової повного опору від зміни напруги живлення

Реактивна складова повного опору при напрузі живлення 7 В має максимальне значення і зменшується із зменшенням напруги живлення.

Для визначення функції перетворення необхідно на основі розв'язку системи рівнянь Кірхгофа (2) знайти залежність частоти генерації від потужності оптичного випромінювання [5]. Функція перетворення в цьому випадку буде мати вигляд:

$$F = \frac{1}{4} \frac{\sqrt{2} \sqrt{LC_{g1g2} (A_1 + \sqrt{A_2 + R_{rs}^4(E) C_W^4(E) + 2R_{rs}^4(E) C_W^3(E) C_{g1g2} + R_{rs}^4(E) C_W^2(E) C_{g1g2}^2})}}{\pi LC_{g1g2} C_W(E) R_{rs}(E)}, \quad (3)$$

де

$$A_1 = -LC_{g1g2} + R_{rs}^2(E) C_W^2(E) + R_{rs}^2(E) C_W(E) C_{g1g2},$$

$$A_2 = L^2 C_{g1g2}^2 + 2LC_{g1g2} R_{rs}^2(E) C_W^2(E) - 2LC_{g1g2}^2 R_{rs}^2(E) C_W.$$

Залежність частоти генерації від освітленості, визначена експериментально та розрахована за формулою (3) для випромінювання з довжиною хвилі 520 нм, показана на рис. 6.

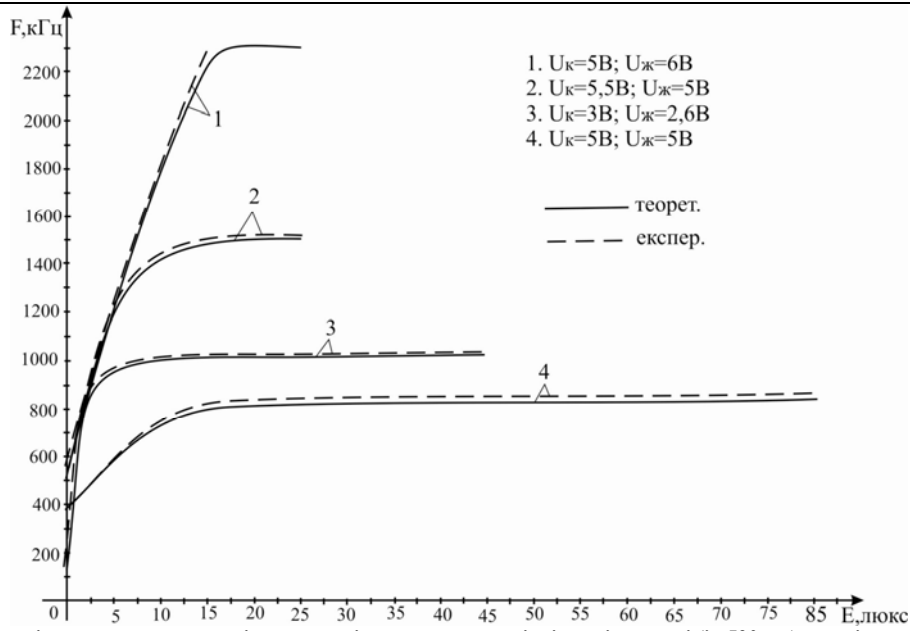


Рис. 6. Теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації від освітленості ($\lambda=520$ нм) для різних робочих точок автогенератора: 1,2 – для фототранзистора РТ928-7С; 3,4 – для фототранзистора РТ928-6С

З графіка видно, що із збільшенням освітленості випромінювання плазми спостерігається зростання частоти генерації. Розбіжність теоретичної та експериментальної складової не перевищує $\pm 3\%$.

Чутливість перетворювача визначається за формулою:

$$S = \frac{1}{8} \sqrt{2} (LC_{g1g2} \left(\frac{\partial}{\partial E} C_W(E) \right) (-LC_{g1g2} + R_{rs}^2(E) C_W^2(E) + R_{rs}^2(E) C_W(E) C_{g1g2} + \sqrt{B_1}) +$$

$$+ LC_{g1g2} C_W(E) (2R_{rs}(E) C_W^2(E) \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{rs}(E) \right) + 2R_{rs}^2(E) C_W(E) \left(\frac{\partial}{\partial E} C_W(E) \right) +$$

$$+ 2R_{rs}(E) C_W(E) C_{g1g2} \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{rs}(E) \right) + R_{rs}^2(E) \left(\frac{\partial}{\partial E} C_W(E) \right) C_{g1g2} + \frac{0.5B_3}{\sqrt{B_1}}) /$$

$$/ (\pi B_2 LC_{g1g2} C_W(E) R_{rs}(E)) - \frac{1}{4} \frac{\sqrt{2} B_2 \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{rs}(E) \right)}{\pi LC_{g1g2} C_W(E) R_{rs}^2(E)} - \frac{1}{4} \frac{\sqrt{2} B_2 \left(\frac{\partial}{\partial E} C_W(E) \right)}{\pi LC_{g1g2} R_{rs}(E) C_W^2(E)}, \quad (4)$$

де

$$B_1 = L^2 C_{g1g2}^2 + 2LC_{g1g2} R_{rs}^2(E) C_W^2(E) - 2LC_{g1g2}^2 R_{rs}^2(E) C_W(E) + R_{rs}^4(E) C_W^4(E) +$$

$$+ 2R_{rs}^4(E) C_W^3(E) C_{g1g2} + R_{rs}^4(E) C_W^2(E) C_{g1g2}^2,$$

$$B_2 = \sqrt{LC_{g1g2} C_W(E) (-LC_{g1g2} + R_{rs}^2(E) C_W^2(E) + R_{rs}^2(E) C_W(E) C_{g1g2} + \sqrt{B_1})}$$

$$B_3 = 4LC_{g1g2} C_W^2(E) \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{rs}(E) \right) + 4LC_{g1g2} R_{rs}^2(E) C_W(E) \left(\frac{\partial}{\partial E} C_W(E) \right) -$$

$$- 4LC_{g1g2}^2 R_{rs}(E) C_W(E) \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{rs}(E) \right) - 2LC_{g1g2}^2 R_{rs}^2(E) \left(\frac{\partial}{\partial E} C_W(E) \right) +$$

$$+ 4R_{rs}^3(E) C_W^4(E) \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{rs}(E) \right) + 4R_{rs}^4(E) C_W^3(E) \left(\frac{\partial}{\partial E} C_W(E) \right) + 4C_{g1g2} R_{rs}^3(E) C_W^2(E) \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{rs}(E) \right) +$$

$$+ 4R_{rs}^3(E) C_W^2(E) C_{g1g2}^2 \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{rs}(E) \right) + 2R_{rs}^4(E) C_W(E) C_{g1g2}^2 \left(\frac{\partial}{\partial E} C_W(E) \right).$$

На рис. 7 показана залежність чутливості оптичного перетворювача від освітленості.

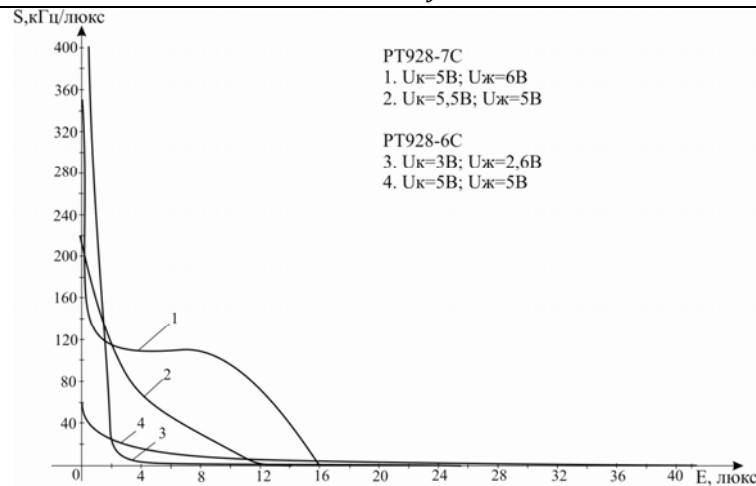


Рис. 7. Залежність чутливості оптичного частотного перетворювача від освітленості для фототранзисторів PT928-7C та PT928-6C

Висновки

Розроблена математична модель емісійно-спектрального частотного перетворювача, на основі автогенератора з біполярного то польового транзисторів з фототранзистором в якості чутливого елементу. На основі моделі отримано аналітичні вирази для функції перетворення та рівняння чутливості. Теоретичні та експериментальні залежності показали, що чутливість розробленого оптичного перетворювача складає 1-400 кГц/люкс.

Література

1. Таруи Ясуо. Основы технологии СБИС / Ясуо Таруи: [пер.с япон.]; под. ред. В.Г. Ржанова. – М.: Радио и связь, 1985. – 480 с.
2. Кравченко Ю. С. Шляхи підвищення ефективності контролю і управління плазмохімічними процесами / Юрій Степанович Кравченко, Володимир Степанович Осадчук, Сергій Юрійович Кравченко // Вісник ВПІ. – 2007. – № 6. – С.119-125
3. Осадчук А.В. Фоточувствительные преобразователи на основе структур с отрицательным сопротивлением: [монография] / А.В. Осадчук. – Винница: Континент, 1998. – 130 с.
4. Федотов Я.А. Основы физики полупроводниковых приборов / Я. А. Федотов. – М.: Сов. радио, 1970. – 591 с.
5. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / О.В. Осадчук. – Вінниця: "УНІВЕРСУМ-Вінниця", 2000. – 303 с.

Надійшла 23.11.2009 р.

УДК 612.317 + 534.7

Ю.В. СЕНЧИШИНА

Хмельницький національний університет

УТОЧНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ ФАЗОВОГО МЕТОДУ ПОШУКУ ВІДСТАНЕЙ ТА КОЕФІЦІЄНТІВ ВІДБИТТЯ В БІОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТАХ

Стаття присвячена розробці уточнених виразів для знаходження відстаней до об'єктів внутрішньої структури біологічних організмів, а також коефіцієнтів відбиття від кожного об'єкту. Для уточнення було враховано те що в кожній біологічній тканині різні швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль та коефіцієнти згасання.

The article is dedicated to mining of updated expressions for finding of spacing intervals to objects of an inner pattern of biological organisms, and also reflection coefficients from everyone to object. For refinement that was taken into account that in each biological tissue miscellaneous rate of propagations of ultrasonic waves and factors of fading.

Ключові слова: відстань до об'єктів, коефіцієнт відбиття, ультразвукова хвиля.

Вступ. Розроблена математична модель аналітичного фазового методу [1] дозволяє знайти фазові зсуви та амплітуди сигналів відбитих від декількох об'єктів, це дозволяє знайти відстані до кожного об'єкту та коефіцієнти відбиття кожного об'єкту які є характеристиками об'єктами. Але у випадку біологічних об'єктів внутрішня структура яких є дуже складною дана модель буде давати значні похибки, тому як у кожній біологічній тканині акустичні властивості є унікальними [2-4]. Для знаходження точних значень відстаней та коефіцієнтів відбиття потрібно врахувати різні швидкості розповсюдження ультразвукових