

Ю. С. Кравченко, к. т. н., доц.; О. О. Даниленко, асп.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕМІСІЙНО-СПЕКТРАЛЬНОГО ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

У статті представлена математична модель мікроелектронного перетворювача інтенсивності оптичного випромінювання в частоту для систем емісійно-спектрального контролю плазмохімічних процесів. Виконано моделювання вольт-амперної характеристики та функції перетворення фоточутливого перетворювача у вигляді залежності частоти генерації від потужності оптичного випромінювання.

Ключові слова: математична модель, транзисторні структури з від'ємним опором, емісійно-спектральний контроль.

Вступ

Оперативний контроль параметрів технологічних процесів і, зокрема, контроль процесів плазмового травлення є важливою умовою при забезпеченні їх автоматизації. Одним із найбільш інформативних і технологічних методів контролю плазмових процесів є досить популярний метод емісійної спектроскопії, в основі якого лежить реєстрація оптичного спектру власного випромінювання збуджених в плазмі атомів і молекул. Однак існує проблема низької чутливості фотоперетворювачів у схемах емісійно-спектрального контролю, особливо при малих значеннях інтенсивності власного випромінювання плазми, що знижує точність виміру моменту закінчення процесу травлення і обмежує склад збуджених компонентів плазми, спектр власного випромінювання яких має незначну інтенсивність. Можливість контролю малих значень інтенсивності плазмового випромінювання досягається за рахунок перетворення її у частоту. Це досягається за допомогою напівпровідникових пристроїв з від'ємним диференціальним опором в схемах фотоперетворювачів [1, 2].

Для вивчення властивостей таких перетворювачів необхідною є математична модель фотоперетворювача на основі використання мікроелектронних частотних перетворювачів з урахуванням спектрального складу випромінювання нерівноважної плазми. Тому задача полягала в розробленні математичної моделі, на базі якої можна отримати залежність активної і реактивної складової повного опору структури, вивести функцію перетворення.

Математична модель

Схема частотного перетворювача на основі біполярного та польового транзисторів показана на рис. 1. Фоточутливим елементом схеми є фоторезистор, спектральна характеристика якого відповідає спектру випромінювання плазми при плазмохімічному травленні.

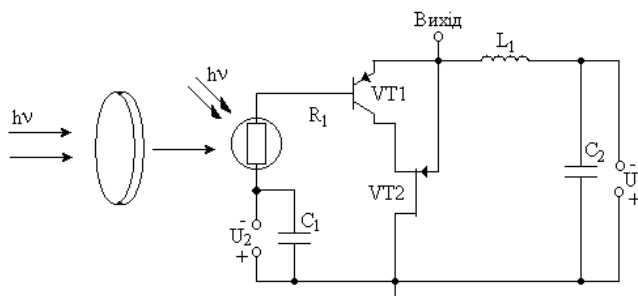


Рис. 1. Схема емісійно-спектрального перетворювача з фоторезистором

Для розрахунку вольт-амперної характеристики перетворювача на основі його еквівалентної схеми для постійного струму (рис. 2) [3] скористаємося системою рівнянь Кірхгофа (1).

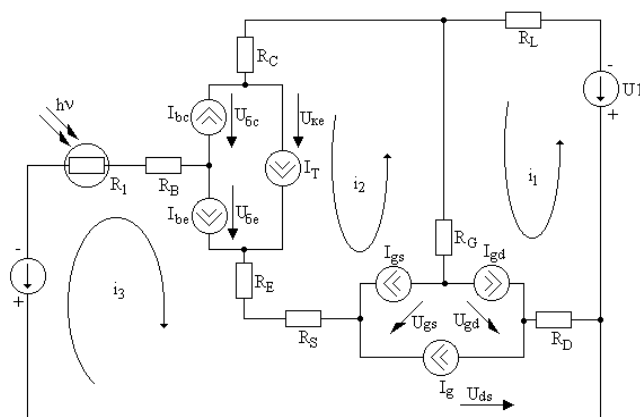


Рис. 2. Еквівалентна схема перетворювача для постійного струму

$$\begin{cases}
 UI = (R_L + R_G + R_D)(i_1 + I_{gd} + I_g - I_{gs}) - R_G(i_2 - I_{gs} - I_T - I_{bc} + I_g + I_{gd}) + \\
 + R_D(i_3 - I_g + I_{gs} - I_{gd} - I_{be} + I_{bc} + I_T), \\
 0 = (R_C + R_E + R_S + R_G)(i_2 + I_g - I_{gs} + I_{gd} + I_{be} - I_{bc} - I_T) - R_G(i_1 + I_{gd} + I_g - I_{gs}) + \\
 + R_E(i_3 - I_g + I_{gs} - I_{gd} - I_{be} + I_{bc} + I_T) + R_S(i_3 - I_g + I_{gs} - I_{gd} - I_{be} + I_{bc} + I_T), \\
 U2 = (R_L + R_B + R_E + R_D)(i_3 - I_g + I_{gs} - I_{gd} - I_{be} + I_{bc} + I_T) + \\
 + R_D(i_1 + I_{gd} + I_g - I_{gs}) + R_E(i_2 + I_g - I_{gs} + I_{gd} + I_{be} - I_{bc} - I_T) + \\
 + R_S(i_2 + I_g - I_{gs} + I_{gd} + I_{be} - I_{bc} - I_T).
 \end{cases} \quad (1)$$

Розв'язавши систему рівнянь (1) за допомогою програмного пакету Matlab 5.2, визначимо вольт-амперну характеристику частотного перетворювача (рис. 3).

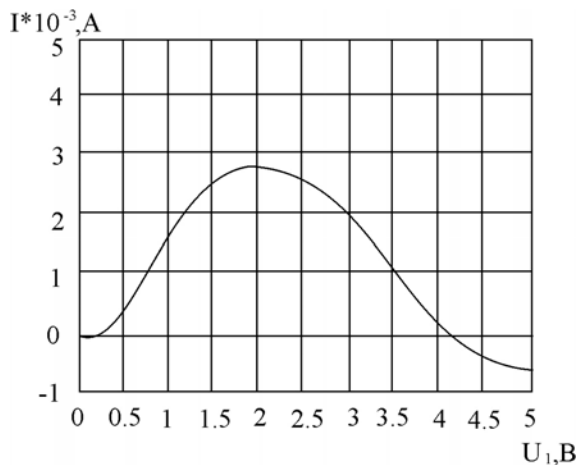


Рис. 3. Вольт-амперна характеристика емісійно-спектрального перетворювача з фоторезистором

Для визначення функції перетворення фотоперетворювача необхідно розрахувати повний опір на електродах колектор-стік транзисторів VT 1 та VT 2 згідно його еквівалентної схеми для змінного струму (рис. 4) [3].

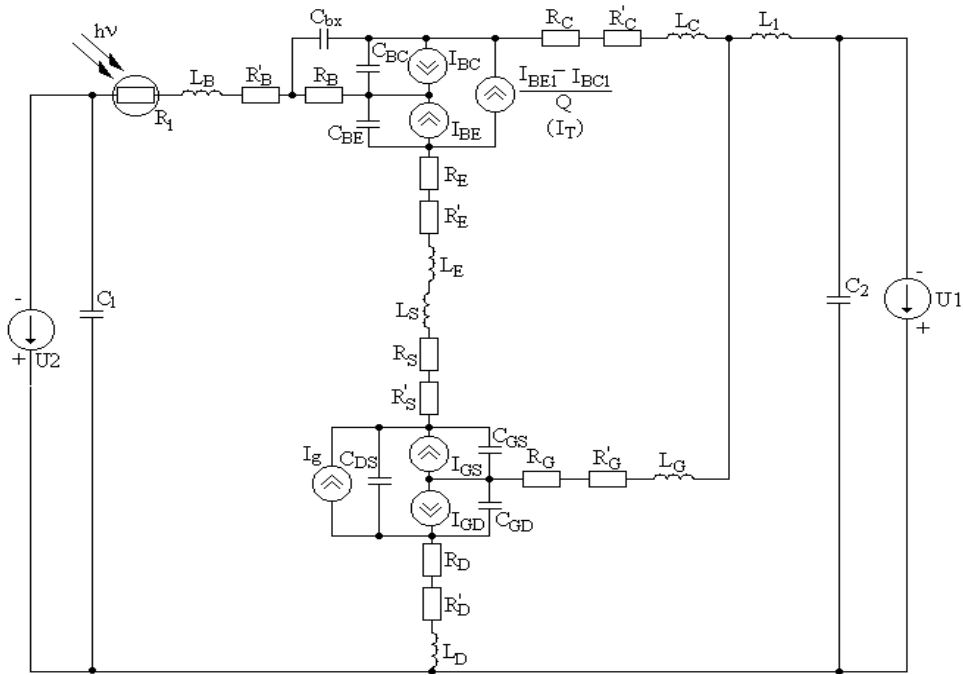


Рис. 4. Еквівалентна схема емісійно-спектрального перетворювача з фоторезистором

Система рівнянь Кірхгофа для змінного струму має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_1 = Z_{16}(i_1 + i_2), \\ 0 = (Z_8 + Z_{16} + Z_{15} + Z_{13} + Z_{14})i_2 + Z_{16}i_1 + Z_{14}i_3 + Z_{13}i_7 - Z_{15}i_4 + \\ + Z_{13}(I_{gd} - I_{gs} - I_g), \\ 0 = (Z_7 + Z_6 + Z_4 + Z_9 + Z_{10} + Z_{12} + Z_{14})i_3 - Z_6i_6 + Z_6(-I_{bc} + I_{be} + I_T) + \\ + Z_4i_4 + Z_4(-I_{bc} + I_{be} + I_T) + (Z_9 + Z_{10})i_4 - Z_{12}i_7 + Z_{12}(-I_{gd} + I_{gs} + I_g) + Z_{14}i_2, \\ 0 = (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_9 + Z_{10} + Z_{11} + Z_{15} + Z_{17})i_4 + Z_4(-I_{bc} + I_{be} + I_T) + \\ + (Z_9 + Z_{10})i_3 + Z_{11}i_7 + Z_{11}(-I_{gd} + I_{gs} + I_g) + Z_3i_6 + Z_4i_3 - Z_{15}i_2 - Z_{15}i_5, \\ U_2 = Z_{17}(i_5 - i_4), \\ 0 = (Z_5 + Z_3 + Z_6)i_6 + Z_3i_4 - Z_6i_3 + Z_6(I_{bc} - I_{be} - I_T), \\ 0 = (Z_{11} + Z_{13} + Z_{12})i_7 + Z_{11}i_4 + Z_{11}(-I_{gd} + I_{gs} + I_g) - Z_{12}i_3 + Z_{12}(I_{gd} - I_{gs} - I_g) + \\ + Z_{13}i_2 + Z_3(I_{gd} - I_{gs} - I_g), \end{array} \right. \quad (2)$$

де

$$\begin{array}{lll} Z_1 = R_1, & Z_2 = R'_B + j\omega L_B, & Z_3 = R_B, \\ Z_5 = -j/(\omega C_{bx}), & Z_6 = -j/(\omega C_{BC}), & Z_{17} = -j/(\omega C_1), \\ Z_{11} = -j/(\omega C_{DS}), & Z_{12} = -j/(\omega C_{GS}), & Z_{13} = -j/(\omega C_{GD}), \\ Z_7 = R_C + R'_C + j\omega L_C, & Z_9 = R_E + R'_E + j\omega L_E, & Z_{10} = R_S + R'_S + j\omega L_S, \\ Z_{14} = R_G + R'_G + j\omega L_G, & Z_{15} = R_D + R'_D + j\omega L_D, & Z_4 = -j/(\omega C_{BE}), \\ & Z_{16} = -j/(\omega C_2), & Z_8 = j\omega L_1, \end{array}$$

де R'_B, R'_C, R'_E – опір виводів бази, колектора й емітера відповідно; R_B, R_C, R_E – об'ємний опір бази, колектора й емітера відповідно; C_{BC}, C_{BE} – ємність переходу база-колектор та база-емітер відповідно; C_{bx} – ємність між зовнішнім виводом бази і колектора; L_B, L_C, L_E –

індуктивність виводів бази, колектора й емітера; Q – заряд у базі; R_G, R_D, R_S – об'ємний опір затвору, стоку і витоку відповідно; R'_G, R'_D, R'_S – опір виводів стоку, затвору і витоку відповідно; C_{DS}, C_{GD}, C_{GS} – ємність витік-стік, затвор-стік, затвор-витік відповідно; L_G, L_D, L_S – індуктивність виводів витоку, стоку і затвору відповідно, L_I – зовнішня індуктивність.

Розв'язавши систему рівнянь (2) за допомогою програмного пакету Matlab 5.2, можна отримати величину повного опору на електродах колектор-стік перетворювача. Розділивши повний опір на дійсну і уявну частину, можливо визначити еквівалентну ємність коливального контуру, яка залежить від потужності падаючого світла. На рис. 5 [3] показана теоретична залежність активної складової напруги споживання.

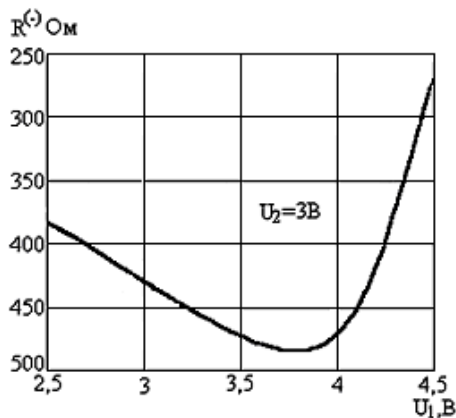


Рис. 5. Теоретична залежність активної складової опору від напруги живлення

На рис. 6 показана розрахункова залежність реактивної складової повного опору від потужності випромінювання.

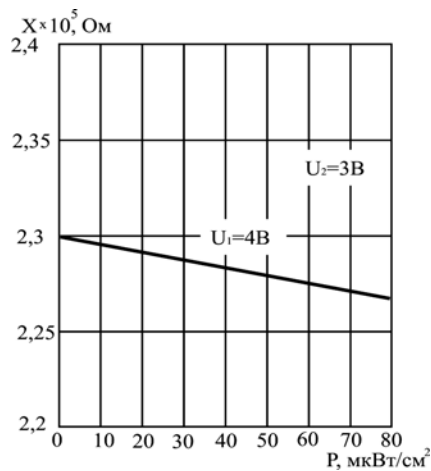


Рис. 6. Теоретична залежність реактивної складової від зміни потужності оптичного випромінювання

Для визначення функції перетворення необхідно знайти залежність частоти генерації від потужності оптичного випромінювання [3]. Це можливо зробити, розв'язавши систему рівнянь Кірхгофа (2), яка складена для змінного струму. Функція перетворення в цьому випадку буде мати вигляд [3]:

$$F = \frac{1}{4} \frac{\sqrt{2} \sqrt{\frac{R_1^2(P)C_f^2 + C_{GD}R_1^2(P)C_f - LC_{GD} - A}{LC_{GD}R_1^2(P)C_f^2}}}{\pi},$$

$$\text{де } A = \sqrt{(R_1^2(P)C_f^2 + C_{GD}R_1^2(P)C_f - LC_{GD})^2 + 4LC_{GD}R_1^2(P)C_f^2}.$$

Залежність частоти генерації від потужності падаючого світла показана на рис. 7 [3].

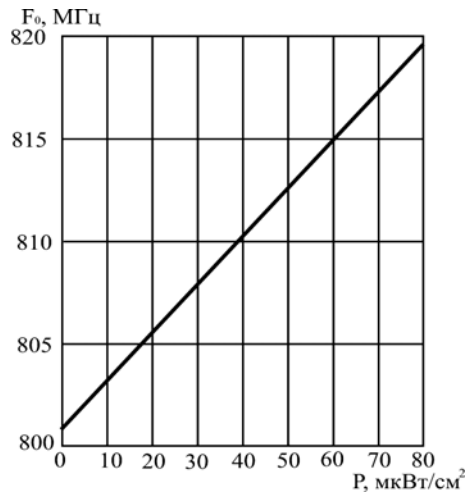


Рис. 7. Залежність частоти генерації від потужності оптичного випромінювання

Висновок

Розроблена математична модель емісійно-спектрального частотного перетворювача, яка складається з біполярного та польового транзисторів і фоточутливого елемента – фоторезистора, на основі якої отримано вольт-амперну характеристику та функцію перетворення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Патент України № 4229, Н01L 21/302. Пристрій для визначення моменту закінчення процесу плазмового травлення / Кравченко Ю.С., Даниленко О.О. // Бюл. № 1. – 2005.
2. Патент України № 4413, Н01L 21/302. Пристрій для визначення моменту закінчення процесу плазмового травлення / Кравченко Ю.С., Даниленко О.О. // Бюл. № 1. – 2005.
3. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором. – Вінниця: „УНІВЕРСУМ-Вінниця”, 2000. – 303 с.

Кравченко Юрій Степанович – доцент кафедри;

Даниленко Олена Олександрівна – аспірант кафедри.

Кафедра електроніки, Вінницький національний технічний університет