

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 621.3.049

В. С. Осадчук, д. т. н., проф.;
О. В. Осадчук, д. т. н., проф.;
Ю. С. Кравченко, к. ф.-м. н., доц.;
О. О. Селецька, асп.

ОПТИЧНИЙ МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ З АКТИВНИМ ІНДУКТИВНИМ ЕЛЕМЕНТОМ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПЛАЗМОХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Розроблено математичну модель мікроелектронного оптичного перетворювача з активним індуктивним елементом, призначеного для контролю плазмохімічних процесів. На основі моделі отримано аналітичні залежності для функції перетворення та рівняння чутливості.

Вступ

Підвищення ефективності контролю процесів плазмохімічного травлення неможливе без застосування нових підходів його реалізації [1, 2]. Одним з методів такого контролю є емісійно-спектральний метод, в якому висока точність в системах контролю досягається використанням первинних фоточутливих перетворювачів на основі транзисторних структур з від'ємним опором [3, 4]. Тому у цій роботі досліджуються характеристики оптичного перетворювача на основі автогенераторного пристрою, в якому коливальний контур створено на основі ємнісної складової повного вихідного опору, а роль індуктивної складової виконує біполярний транзистор з RC-колом, що дозволяє виготовити перетворювач за інтегральною технологією.

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, залежність активної індуктивності від напруги живлення та визначити функцію перетворення оптичного перетворювача, який використовується в системі контролю плазмохімічних процесів.

Математична модель

Схема частотного перетворювача на основі біполярного та МДН-транзисторів показана на рис. 1. Фоточутливим елементом схеми є фоторезистор. Максимальна спектральна чутливість фоторезистора відповідає довжині хвилі пропускання інтерференційного світлофільтра, що використовується для виділення контрольної смуги із загального спектра випромінювання плазми.

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).

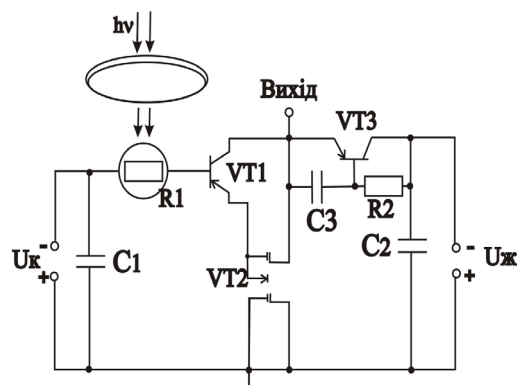


Рис. 1. Схема мікроелектронного оптичного перетворювача з фоторезистором

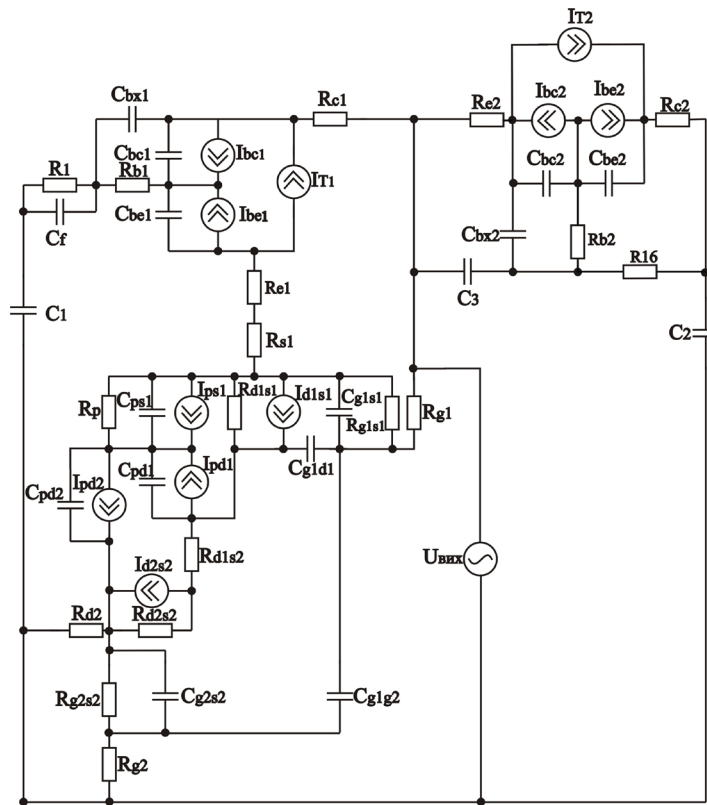


Рис. 2. Еквівалентна схема оптичного перетворювача по змінному струму

Перетворимо її у зручнішу для проведення розрахунків (рис. 3) схему.

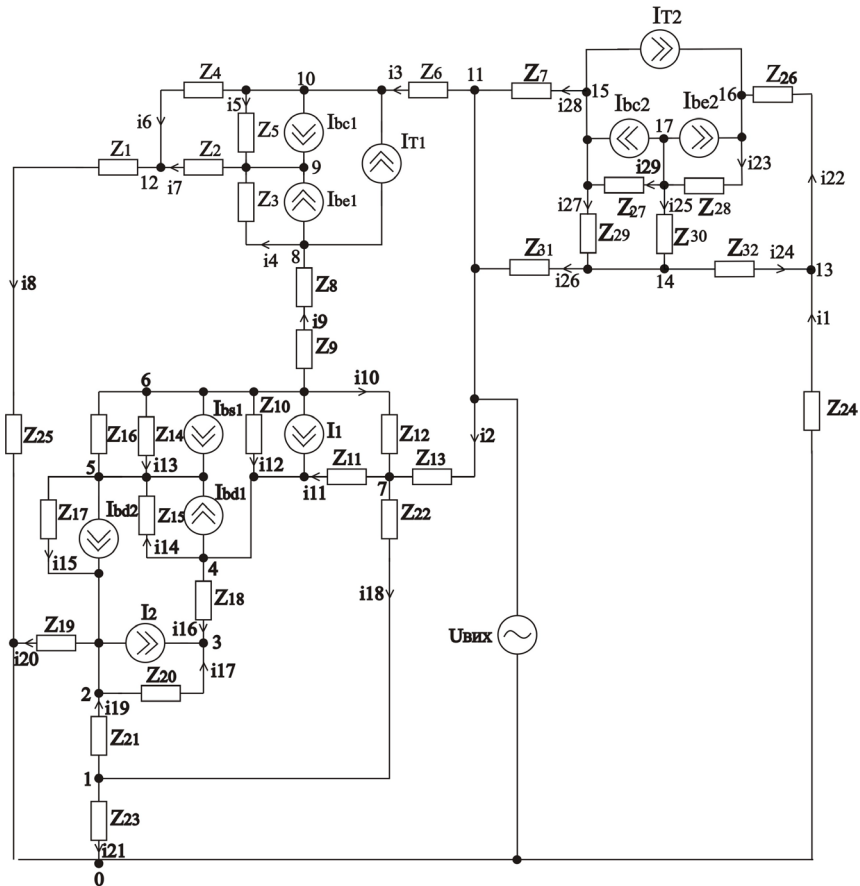


Рис. 3. Перетворена еквівалентна схема оптичного перетворювача по змінному струму

Система рівнянь Кірхгофа згідно з перетвореною еквівалентною схемою для змінного струму має вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = -\phi_1 (Y_{21} + Y_{19} + Y_8) + \phi_2 Y_{19} + \phi_7 Y_{18}; \\ I_2 - I_{bd2} = \phi_1 Y_{19} - \phi_2 (Y_{19} + Y_{17} + Y_{20} + Y_{15}) + \phi_3 Y_{17} + \phi_5 Y_{15}; \\ -I_2 = \phi_2 Y_7 - \phi_3 (Y_{16} + Y_{17}) + \phi_4 Y_{16}; \\ I_{bd1} - I_1 = \phi_3 Y_{16} - \phi_4 (Y_{16} + Y_{14} + Y_{12} + Y_{11}) + \phi_5 Y_{14} + \phi_7 Y_{11} + \phi_6 Y_{12}; \\ I_{bd2} - I_{bs1} - I_{bd1} = \phi_2 Y_{15} + \phi_4 Y_{14} - \phi_5 (Y_{15} + Y_{13} + Y_{14}) + \phi_6 Y_{13}; \\ I_{bs1} + I_1 = \phi_4 Y_{12} + \phi_5 Y_{13} - \phi_6 (Y_{13} + Y_{12} + Y_{10} + Y_9) + \phi_7 Y_{10} + \phi_8 Y_9; \\ 0 = \phi_1 Y_{18} + \phi_4 Y_{11} + \phi_6 Y_{10} - \phi_7 (Y_{11} + Y_{10} + Y_{18} + Y_2) + \phi_{11} Y_2; \\ I_{be1} + I_{T1} = \phi_6 Y_9 - \phi_8 (Y_9 + Y_4) + \phi_9 Y_4; \\ -(I_{bc1} + I_{be1}) = \phi_8 Y_4 - \phi_9 (Y_5 + Y_4 + Y_7) + \phi_{10} Y_5 + \phi_{12} Y_7; \\ I_{bc1} - I_{T1} = \phi_9 Y_5 - \phi_{10} (Y_3 + Y_5 + Y_6) + \phi_{11} Y_3 + \phi_{12} Y_6; \\ 0 = \phi_7 Y_2 + \phi_{10} Y_{13} - \phi_{11} (Y_3 + Y_2 + Y_{28} + Y_{26}) + \phi_{14} Y_{26} + \phi_{15} Y_{28}; \\ 0 = \phi_9 Y_7 + \phi_{10} Y_6 - \phi_{12} (Y_6 + Y_8 + Y_7); \\ 0 = -\phi_{13} (Y_{24} + Y_1 + Y_{22}) + \phi_{14} Y_{24} + \phi_{16} Y_{22}; \\ 0 = \phi_{13} Y_{24} - \phi_{14} (Y_{24} + Y_{25} + Y_{26} + Y_{27}) + \phi_{11} Y_{26} + \phi_{15} Y_{27} + \phi_{17} Y_{25}; \\ I_{T2} - I_{bc2} = \phi_{11} Y_{28} + \phi_{14} Y_{26} - \phi_{15} (Y_{28} + Y_{27} + Y_{29}) + \phi_{17} Y_{29}; \\ -I_{T2} - I_{bc2} = \phi_{13} Y_{22} - \phi_{16} (Y_{22} + Y_{23}) + \phi_{17} Y_{23}; \\ I_{bc2} + I_{be2} = \phi_{14} Y_{25} + \phi_{15} Y_{29} + \phi_{16} Y_{23} - \phi_{17} (Y_{29} + Y_{23} + Y_{25}). \end{array} \right. \quad (1)$$

Провідності гілок схеми визначаються з формул

$$\begin{aligned} Y_1 &= 1/(Z_{24} + Z_7); \quad Y_2 = 1/Z_{13}; \quad Y_3 = 1/Z_6; \quad Y_4 = 1/Z_3; \quad Y_5 = 1/Z_5; \quad Y_6 = 1/Z_4; \quad Y_7 = 1/Z_2; \\ Y_8 &= 1/(Z_{25} + Z_1); \quad Y_9 = 1/(Z_8 + Z_9); \quad Y_{10} = 1/Z_{12}; \quad Y_{11} = 1/Z_{11}; \quad Y_{12} = 1/Z_{10}; \\ Y_{13} &= (Z_{16} + Z_{14})/(Z_{16} Z_{14}); \quad Y_{14} = 1/Z_{15}; \quad Y_{15} = 1/Z_{17}; \quad Y_{16} = 1/Z_{18}; \quad Y_{17} = 1/Z_{20}; \quad Y_{18} = 1/Z_{22}; \\ & \quad Y_{19} = 1/Z_{21}; \quad Y_{20} = 1/Z_{19}; \quad Y_{21} = 1/Z_{23}, \end{aligned}$$

де $Z_1 = R_1/(1 + \omega^2 R_1^2 C_f^2) - j(R_1^2 \omega C_f/(1 + \omega^2 R_1^2 C_f^2))$;

$$Z_2 = R_B; \quad Z_3 = -j/\omega(C_{be1});$$

$$Z_4 = -j/(\omega C_{bx1}); \quad Z_5 = -j/(\omega C_{bc1});$$

$$Z_6 = R_{c1}; \quad Z_7 = R_{e2}; \quad Z_8 = R_{e1}; \quad Z_9 = R_{s1}; \quad Z_{10} = R_{d1s1}; \quad Z_{11} = -j/(\omega C_{g1d1});$$

$$Z_{12} = R_{g1s1}/(1 + \omega^2 R_{g1s1}^2 C_{g1s1}^2) - j(R_{g1s1}^2 \omega C_{g1s1}/(1 + \omega^2 R_{g1s1}^2 C_{g1s1}^2));$$

$$Z_{13} = R_{g1}; \quad Z_{14} = -j/(\omega C_{ps1});$$

$$Z_{15} = -j/(\omega C_{pd1}); \quad Z_{16} = R_p;$$

$$Z_{17} = -j/(\omega C_{pd2}); \quad Z_{18} = R_{d1s2};$$

$$Z_{19} = R_{d2}; \quad Z_{20} = R_{d2s2};$$

$$Z_{21} = R_{g2s2}/(1 + \omega^2 R_{g2s2}^2 C_{g2s2}^2) - j(R_{g2s2}^2 \omega C_{g2s2}/(1 + \omega^2 R_{g2s2}^2 C_{g2s2}^2));$$

$$Z_{22} = -j/\omega(C_{g1g2}); \quad Z_{23} = R_{g2};$$

$$Z_{24} = -j/(\omega C_2); \quad Z_{25} = -j/(\omega C_1); \quad Z_{26} = R_{c2}; \quad Z_{27} = -j/\omega(C_{bc2});$$

$$Z_{28} = -j/\omega(C_{be2}); \quad Z_{29} = -j/\omega(C_{bx2}); \quad Z_{30} = R_{b2}; \quad Z_{31} = -j/(\omega C_3); \quad Z_{32} = R_a$$

де R_{b1} , R_{c1} , R_{e1} — об'ємний опір бази, колектора і емітера транзистора VT1 відповідно; R_{b2} , R_{c2} , R_{e2} — об'ємний опір бази, колектора і емітера транзистора VT2 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 VT2 відповідно; C_{bx1} та C_{bx2} — ємність між зовнішнім виводом бази і колектора транзистора VT1 та транзистора VT2 відповідно; 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} — об'ємні 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; 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; R_a та C_3 — опір та ємність резистора та конденсатора фазозсувного кола, відповідно.

Систему рівнянь (1) розв'язуємо за методом Гауса за допомогою програмного пакету Matlab 5.2. Результатом розв'язку є величина повного опору на електродах колектор-стік перетворювача, що дає можливість розрахувати залежність його активної та реактивної складових від інтенсивності падаючого світла (рис. 4 та 5).

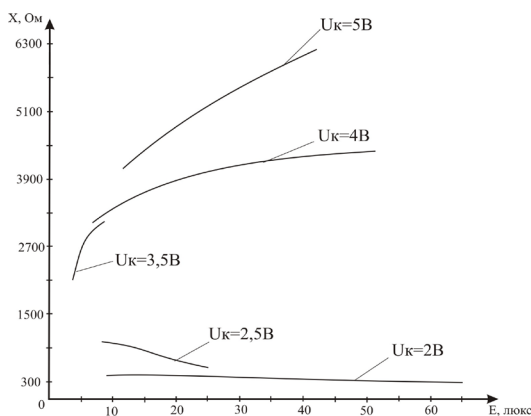


Рис. 4. Теоретичні залежності активної складової повного опору від освітленості з різними значеннями напруги керування ($\lambda = 520$ нм)

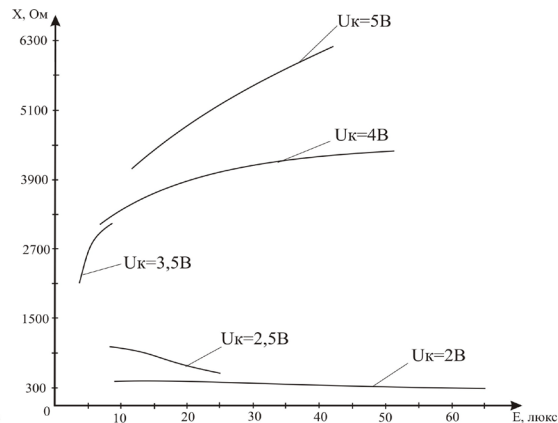


Рис. 5. Теоретичні залежності реактивної складової повного опору від освітленості з різними значеннями напруги керування ($\lambda = 520$ нм)

Аналіз графіків показує, що найбільша зміна як активної, так і реактивної складової повного опору відбувається при зміні освітленості від 5 люкс до 20 люкс.

На рис. 6 та 7 показані розрахункові та експериментальні залежності активної та реактивної складової повного опору від напруги живлення відповідно.

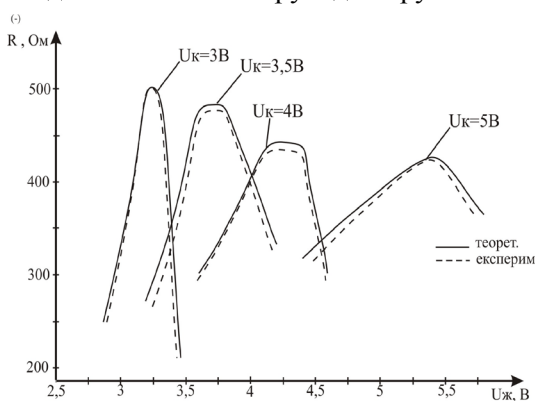


Рис. 6. Експериментальні залежності активної складової опору від напруги живлення

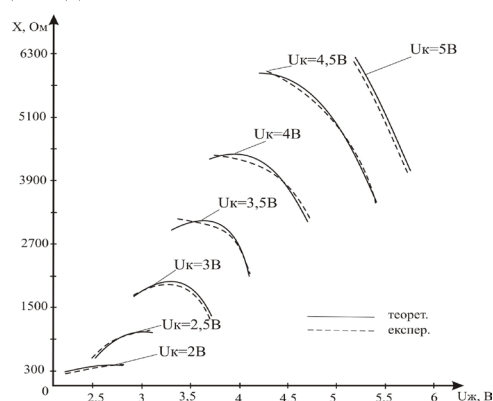


Рис. 7. Теоретичні та експериментальні залежності реактивної складової повного опору від зміни

Активна складова повного опору має максимальне значення при напрузі живлення 2,5 В та напрузі керування 2 В.

Реактивна складова повного опору при напрузі 5 В має максимальне значення і зменшується із збільшенням напруги живлення.

На рис. 8 та рис. 9 подані залежності реактивної та активної складових повного опору від величини зовнішнього базового опору. Реактивна складова зменшується пропорційно опору бази.

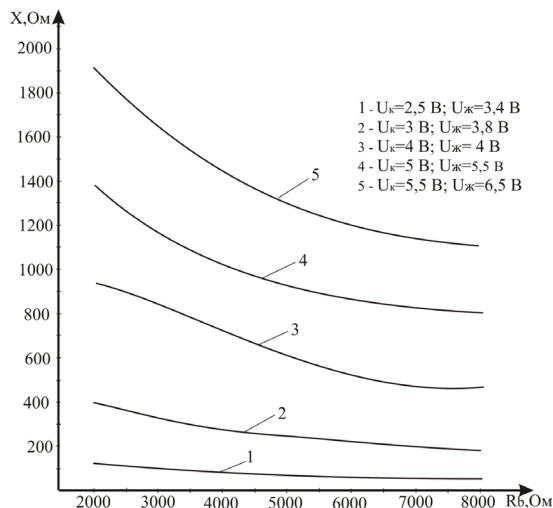


Рис. 8. Експериментальні залежності реактивної складової повного опору від зміни опору резистора фазозсувального RC-кола

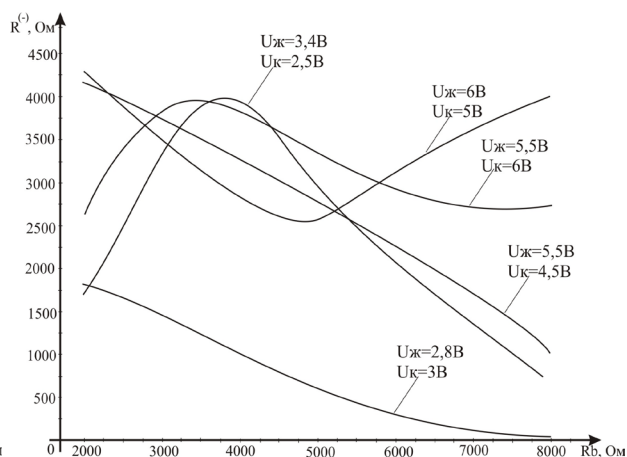


Рис. 9. Експериментальні залежності активної складової повного опору від зміни опору резистора фазозсувального RC-кола

Для визначення функції перетворення необхідно на основі розв'язку системи рівнянь Кірхгофа (1) знайти залежність частоти генерації від потужності оптичного випромінювання [4]. Функція перетворення в цьому випадку буде мати вигляд

$$F = \frac{1}{4} \frac{\sqrt{2} \sqrt{L_1 C_{bx} C_f (-L_1 C_{bx} + R_1^2(E) C_f + R_1^2(E) C_f C_{bx} + N)}}{\pi L_1 C_{bx} C_f R_1^2(E)}, \quad (2)$$

де $N = \sqrt{L_1^2 C_{bx}^2 + 2L_1 C_{bx} C_f R_1^2(E) - 2L_1 C_{bx}^2 C_f R_1^2(E) + R_1^4(E) C_f^2 + 2R_1^4(E) C_f^2 C_{bx} + R_1^4(E) C_f^2 C_{bx}^2}$.

В формулі (3) L_1 -еквівалентна індуктивність активного індуктивного елемента, яка визначається як уявна частина повного опору індуктивного елемента. Повний опір визначається з формули

$$z_{\text{екв}} = U_1 / \left(\frac{U_1}{A_1 Z_{32} Z_{31}} + \frac{K_2 B_2 Z_{31}}{B_1 C_3 (A_1 + Z_{32} Z_{31} / B_1)} + \frac{Z_{32} K_2}{K_3 (A_1 + Z_{32} Z_{31} / B_1)} + \frac{K_1 (B_2 Z_{31} / B_1 - Z_{32})}{K_3 (A_1 + Z_{32} Z_{31} / B_1)} - \frac{A_4 Z_{30} Z_{31}}{A_6 B_1 (A_1 + Z_{32} Z_{31} / B_1)} + \frac{A_5 Z_{31}}{B_1 (A_1 + Z_{32} Z_{31} / B_1)} \right),$$

де $A_1 = Z_{31} + Z_{34}$, $A_2 = Z_7 + Z_{29} + Z_{31} + Z_{27} + Z_{28}$, $A_3 = Z_{29} + Z_{27}$,

$A_4 = Z_{27} (I_{be2} - I_{bc2} + I_{T2})$, $A_5 = Z_{28} (I_{be2} - I_{bc} + I_{T2})$;

$B_1 = Z_{28} - A_3 Z_{30} / A_6$, $B_2 = Z_{30}^2 / A_6 - A_7$;

$K_1 = A_4 Z_{30} A_3^2 / A_6^2 B_1 - A_5 A_3^2 / B_1 A_6 - A_4 A_2 Z_{30} / A_6 B_1 + A_5 A_3 / A_6 + A_4 + A_5$,

$K_2 = Z_{32} A_3^2 / B_1 A_6 - Z_{31} - Z_{32} A_2 / B_1$, $K_3 = B_2 A_3^2 / B_1 A_6 - A_2 - Z_{30} A_3 / A_6 - Z_{28}$.

Залежність частоти генерації від освітленості, визначена експериментально та розрахована за формулою (2) для випромінювання з довжиною хвилі 520 нм, показана на рис. 10.

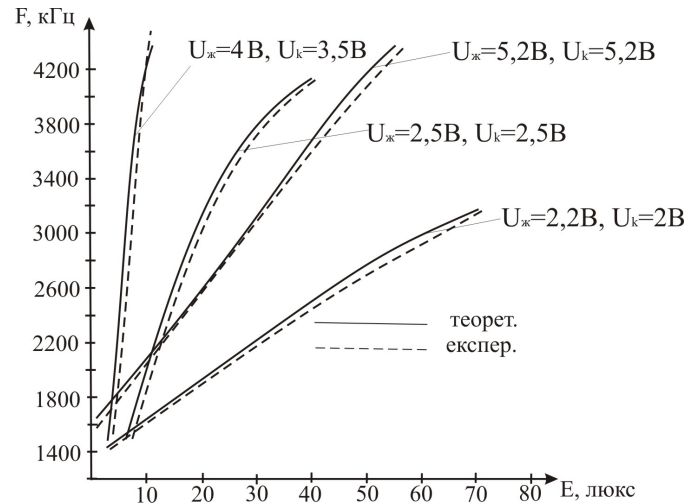


Рис. 10. Теоретичні та експериментальні залежності

частоти генерації від освітленості ($\lambda = 520$ нм) для різних напруг живлення і керування

З графіка видно, що зі збільшенням освітленості випромінювання плазми спостерігається зростання частоти генерації. Розбіжність теоретичної та експериментальної складової не перевищує $\pm 5\%$.

Чутливість перетворювача визначається з формули

$$\begin{aligned}
 S = & \frac{1}{8} \sqrt{2} (2R_f(E)C_f \left(\frac{\partial}{\partial E} R_f(E) \right) + 2R_f(E)C_{bx}C_f \left(\frac{\partial}{\partial E} R_f(E) \right) + \\
 & + \frac{1}{2} (4L_1R_f(E)C_{bx}C_f \left(\frac{\partial}{\partial E} R_f(E) \right) - 4L_1R_f(E)C_{bx}^2C_f \left(\frac{\partial}{\partial E} R_f(E) \right) + \\
 & + 4R_f^3(E)C_f^2 \left(\frac{\partial}{\partial E} R_f(E) \right) + 8R_f^3(E)C_{bx}C_f^2 \left(\frac{\partial}{\partial E} R_f(E) \right) + \\
 & + 4R_f^3(E)C_{bx}^2C_f^2 \left(\frac{\partial}{\partial E} R_f(E) \right)) / \sqrt{D1} / \left(\sqrt{L_1C_{bx}C_f (D2 + \sqrt{D1})} \right) \pi R_f(E) - \\
 & - \frac{1}{2} \sqrt{2} \sqrt{L_1C_{bx}C_f (D2 + \sqrt{D1})} \left(\frac{\partial}{\partial E} R_f(E) \right) / \pi L_1C_{bx}C_f R_f^2(E),
 \end{aligned}$$

де

$$D1 = L_1^2 C_{bx}^2 + 2L_1 C_{bx} C_f R_f^2(E) - 2L_1 C_{bx}^2 C_f R_f^2(E) + R_f^4(E) C_f^2 + 2R_f^4(E) C_f^2 C_{bx} + R_f^4(E) C_f^2 C_{bx}^2;$$

$$D2 = -L_1 C_{bx} + R_f^2(E) C_f + R_f^2(E) C_{bx} C_f.$$

На рис. 11 показана залежність чутливості оптичного перетворювача від освітленості.

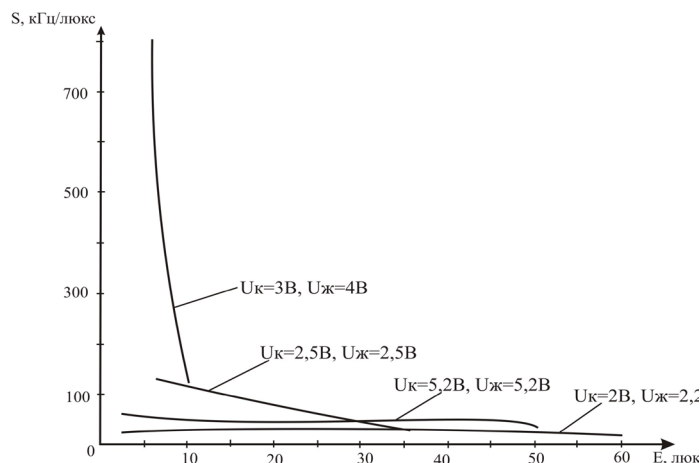


Рис. 11. Залежність чутливості оптичного частотного перетворювача від освітленості

Висновки

Розроблена математична модель емісійно-спектрального частотного перетворювача на основі автогенератора, який складається з біполярного та польового транзисторів та активного індуктивного елемента на основі біполярного транзистора з фазозсувним RC-колом. На основі моделі отримано аналітичні вирази для функції перетворення та рівняння чутливості. Теоретичні та експериментальні залежності показали, що чутливість розробленого оптичного перетворювача складає 20—800 кГц/люкс. Максимальну чутливість оптичний частотний перетворювач має при напрузі живлення 4 В та напрузі керування 3 В.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Орликовский А. А. Диагностика *in situ* плазменных технологических процессов микроэлектроники / А. А. Орликовский, К. В. Руденко, Я. Н. Суханов // Современное состояние и ближайшие перспективы. Часть IV. Микроэлектроника. — 2001. — Т. 30. — № 6. — С. 403—433.
2. Кравченко Ю. С. Шляхи підвищення ефективності контролю і управління плазмохімічними процесами / Юрій Степанович Кравченко, Володимир Степанович Осадчук, Сергій Юрійович Кравченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2007. — № 6. — С. 119—125.
3. Александр Владимирович Осадчук. Фоточувствительные преобразователи на основе структур с отрицательным сопротивлением : монография / А. В. Осадчук. — Винница : Континет, 1998. — 130 с.
4. Осадчук О. В. Микроэлектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / О. В. Осадчук. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. — 303 с.

Рекомендована кафедрою електроніки

Надійшла до редакції 11.06.09
Рекомендована до друку 24.06.09

Осадчук Володимир Степанович — завідувач кафедри, **Кравченко Юрій Степанович** — доцент, **Селецька Олена Олександрівна** — аспірантка.

Кафедра електроніки;

Осадчук Олександр Володимирович — завідувач кафедри радіотехніки.

Вінницький національний технічний університет