

УДК 621.3.049

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

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭМИССИОННО-СПЕКТРАЛЬНОГО ЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В статье представлена математическая модель микроселектронного преобразователя интенсивности оптического излучения в частоту для систем эмиссионно-спектрального контроля плазмохимических процессов. Исполнено моделирование вольт-амперной характеристики и функции преобразования фоточувствительного преобразователя в виде зависимости частоты генерации от мощности оптического излучения.

Ключевые слова: математическая модель, транзисторные структуры с отрицательным сопротивлением, эмиссионно-спектральный контроль.

Введение

Оперативный контроль параметров технологических процессов, в частности, контроль процессов плазменного травления является важным условием при обеспечении их автоматизации. Одним из наиболее информативных и технологических методов контроля плазменных процессов является достаточно популярный метод эмиссионной спектроскопии, в основе которого лежит регистрация оптического спектра собственного излучения возбужденных в плазме атомов и молекул. Однако существует проблема низкой чувствительности фотопреобразователей в схемах эмиссионно-спектрального контроля, особенно при малых значениях интенсивности собственного излучения плазмы, что снижает точность измерения момента окончания процесса травления и ограничивает состав возбужденных компонентов плазмы, спектр собственного излучения которых имеет незначительную интенсивность. Возможность контроля малых значений интенсивности плазменного излучения достигается за счет превращения ее в частоту. Это достигается с помощью полупроводниковых устройств с отрицательным дифференциальным сопротивлением в схемах фотопреобразователей [1, 2].

Для изучения свойств таких преобразователей необходима математическая модель фотопреобразователя на основе микроселектронных частотных преобразователей с учетом спектрального состава излучения неравновесной плазмы. Поэтому задача заключалась в разработке математической модели, на базе которой можно получить зависимость активной и реактивной составляющей полного сопротивления структуры, вывести функцию преобразования.

Математическая модель

Схема частотного преобразователя на основе биполярного и полевого транзисторов показана на рис. 1. Фоточувствительным элементом схемы является фоторезистор, спектральная характеристика которого соответствует спектру излучения плазмы при плазмохимическом травлении.

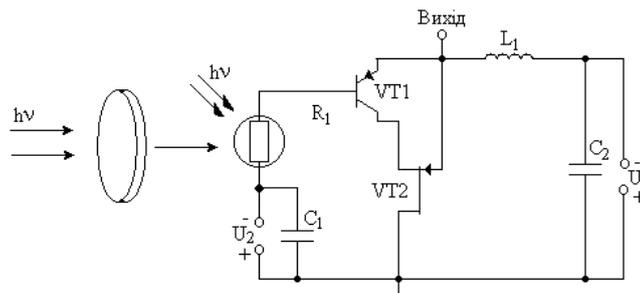


Рис. 1. Схема эмиссионно-спектрального преобразователя с фоторезистором

Для расчета вольт-амперной характеристики преобразователя на основе его эквивалентной схемы для постоянного тока (рис. 2) [3] воспользуемся системой уравнений Кирхгофа (1).

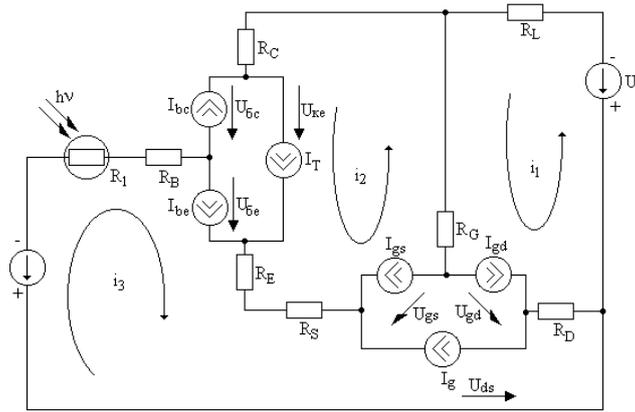


Рис. 2. Эквивалентная схема преобразователя для постоянного тока

$$\begin{cases}
 UI = (R_L + R_G + R_D)(i_1 + I_{gd} + I_g - I_{gs}) - R_G(i_2 - I_{gs} - I_T - I_{bc} + I_g + I_{gd}) + \\
 + R_D(i_3 - I_g + I_{gs} - I_{gd} - I_{be} + I_{bc} + I_T), \\
 0 = (R_C + R_E + R_S + R_G)(i_2 + I_g - I_{gs} + I_{gd} + I_{be} - I_{bc} - I_T) - R_G(i_1 + I_{gd} + I_g - I_{gs}) + \\
 + R_E(i_3 - I_g + I_{gs} - I_{gd} - I_{be} + I_{bc} + I_T) + R_S(i_3 - I_g + I_{gs} - I_{gd} - I_{be} + I_{bc} + I_T), \\
 U2 = (R1 + R_B + R_E + R_D)(i_3 - I_g + I_{gs} - I_{gd} - I_{be} + I_{bc} + I_T) + \\
 + R_D(i_1 + I_{gd} + I_g - I_{gs}) + R_E(i_2 + I_g - I_{gs} + I_{gd} + I_{be} - I_{bc} - I_T) + \\
 + R_S(i_2 + I_g - I_{gs} + I_{gd} + I_{be} - I_{bc} - I_T).
 \end{cases} \quad (1)$$

Решив систему уравнений (1) с помощью программного пакета Matlab 5.2, определим вольт-амперную характеристику частотного преобразователя (рис. 3) [3].

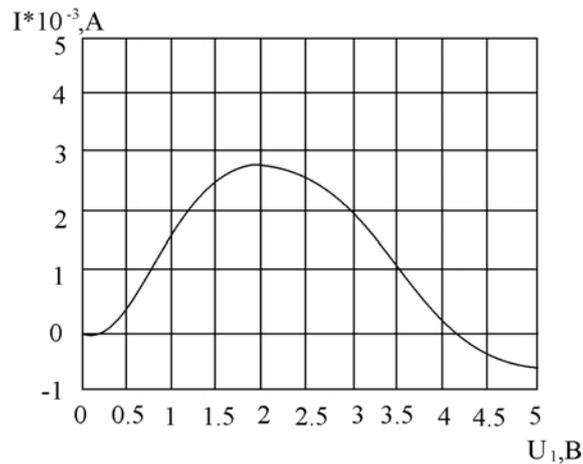


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика эмиссионно-спектрального преобразователя с фоторезистором

Для определения функции преобразования фотопреобразователя необходимо рассчитать полное сопротивление на электродах коллектор-сток транзисторов VT 1 и VT 2 согласно его эквивалентной схеме для переменного тока (рис. 4) [3].

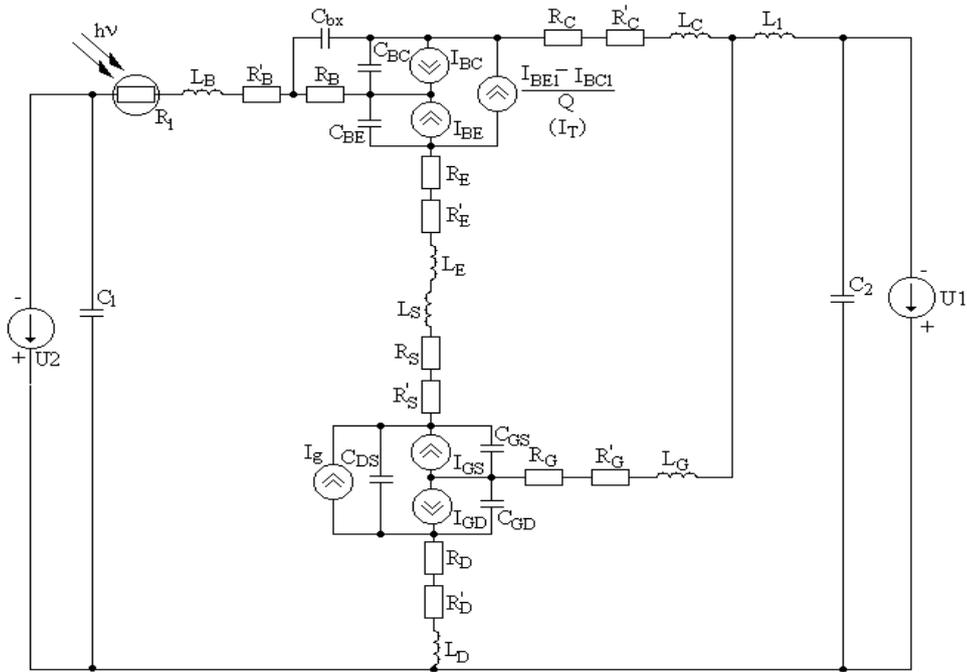


Рис. 4. Эквивалентная схема эмиссионно-спектрального преобразователя с фоторезистором

Система уравнений Кирхгофа для переменного тока [3]:

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

где

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

где R'_B , R'_C , R'_E – сопротивление выводов базы, коллектора и эмиттера соответственно; R_B , R_C , R_E – объемное сопротивление базы, коллектора и эмиттера соответственно; C_{BC} , C_{BE} – емкость перехода база-коллектор и база-эмиттер соответственно; C_{bx} – емкость между

внешним выводом базы и коллектора; L_B, L_C, L_E – индуктивность выводов базы, коллектора и эмиттера; Q – заряд в базе; R_G, R_D, R_S – объемное сопротивление затвора, стока и истока соответственно; R'_G, R'_D, R'_S – сопротивление выводов стока, затвора и истока соответственно; C_{DS}, C_{GD}, C_{GS} – емкость исток-сток, затвор-сток, затвор-исток соответственно; L_G, L_D, L_S – индуктивность выводов истока, стока и затвора соответственно; LI – внешняя индуктивность.

Решив систему уравнений (2) с помощью программного пакета Matlab 5.2, можно получить величину полного сопротивления на электродах коллектор-сток преобразователя. Разделив полное сопротивление на действительную и мнимую часть, можно определить эквивалентную емкость колебательного контура, которая зависит от мощности падающего излучения. На рис. 5 [3] представлена теоретическая зависимость активной составляющей от напряжения питания.

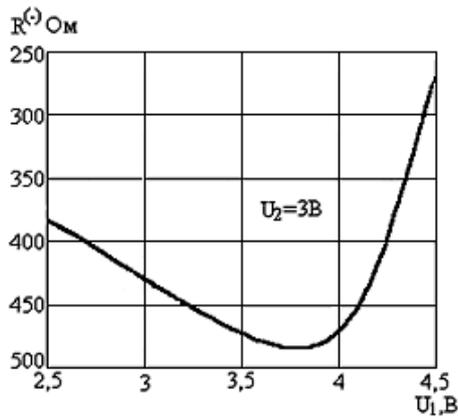


Рис. 5. Теоретическая зависимость активной составляющей сопротивления от напряжения питания

На рис. 6 показана расчетная зависимость реактивной составляющей полного сопротивления от мощности излучения.

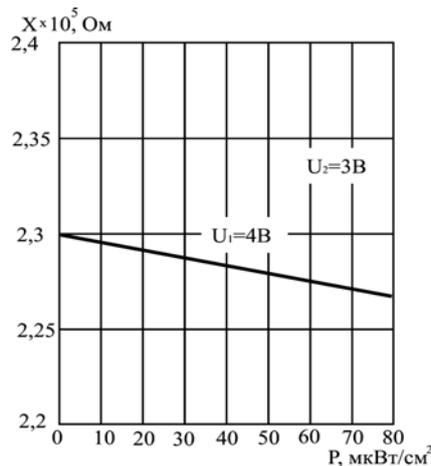


Рис. 6. Теоретическая зависимость реактивной составляющей от изменения мощности оптического излучения

Для определения функции превращения необходимо найти зависимость частоты генерации от мощности оптического излучения [3]. Это можно сделать, решив систему уравнений Кирхгофа (2), которая составлена для переменного тока. Функция превращения в этом случае будет иметь вид [3]:

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

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

Зависимость частоты генерации от мощности падающего света показана на рис. 7 [3].

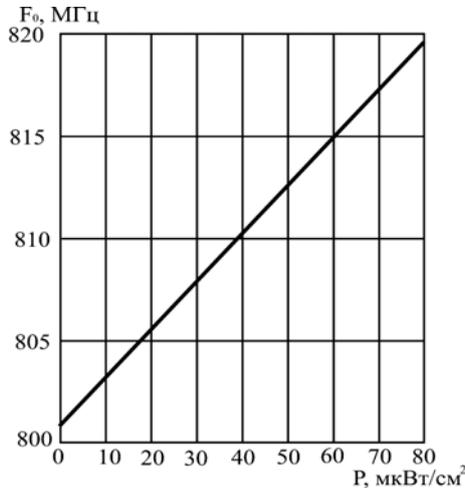


Рис. 7. Зависимость частоты генерации от мощности оптического излучения

Вывод

Разработана математическая модель эмиссионно-спектрального частотного преобразователя, которая состоит из биполярного и полевого транзисторов и фоточувствительного элемента-фоторезистора, на основе которой получена вольт-амперная характеристика и функция превращения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 Юрий Степанович – доцент кафедри;

Даниленко Елена Александровна – аспирант кафедри.

Кафедра електроніки, Вінницький національний технічний університет