зарядів, а також їх розподілу у товщі контактуючого шару.

Запропоновані моделі показують, що напрямок утворення та значення роботи адгезії головним чином залежать від поверхневої енергії та дзета-потенціалу й зв'язків, що виникають при утворенні плівки. До останніх можна віднести зв'язки між протилежно зарядженими групами, не доступними до дії води, наприклад, у гідрофобних зонах, які мають місце на граничній поверхні між шкірою та покриттям.

Розширення цих зон може бути предметом наступних спеціальних досліджень.

Література

1. Дубиновский М.З. Покрывное крашение кож. –М.: Легпромбытиздат, 1985. –121 с.
2. Химическая энциклопедия. –М.: Химия, 1998. –Т.1. –С.35-38.
3. Берлин А.А., Басин В.Е. Основы адгезии полимеров. –М.: Химия, 1974. –392 с.
4. Вакула В.Л., Притыкин Л.М. Физическая химия адгезии полимеров. –М.: Химия, 1984. –224 с.
5. Зимон А.Д. Адгезия жидкости и смачивание. –М.: Химия, 1974. –413 с.
6. Зимон А.Д. Адгезия пленок и покрытий. –М.: Химия, 1977. –352 с.
7. Bishof C., Possart W. Adhäsion. Theoretische und experimentelle Grundlagen. –Berlin.: Akademie-Verlag, 1983. – 277 s.
8. Кинлок Э. Адгезия и адгезивы: Наука и технология: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 484 с.
9. Доломатов М.Ю., Тимофеева М.Ю., Будрина Н.Г. Адгезия и фазовые переходы в сложных высокомолекулярных системах. –Уфа: Уфимск. технолг. ин-т. сервиса, 2001. –41 с.
10. Касьян Е.Є. Чинники адгезійної взаємодії при формуванні покриття на шкірі // Вісник КДУТД. –2009. –№ 1.–С34-40.
11. Касьян Е.Є. Вплив технологічних обробок на адгезію покриття до шкіри // Вісник КДУТД. –2009. –№ 2.–С35-40.
12. Липатов Ю.С. Коллоидная химия полимеров. –К.: Наукова думка, 1984. –344 с.
13. Притыкин Л.М. Теория физико-химического описания адгезионных свойств органических соединений (цианакрилатные адгезивы). –Днепропетровск: ПГАСА – Basilian Press, 1999. – 172 с.
14. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. –М.: Химия, 1982. –400 с.
15. Путилов К.А. Термодинамика. –М.: Наука, 1971. –375 с.
16. Основи створення сучасних технологій виробництва шкіри та хутра/ А.А. Горбачов, С.М. Кернер, О.А. Андреєва, О.Д. Орлова. –К.: КДУТД, 2007. –190 с.
17. Болдырев А.И. Физическая и коллоидная химия. – М.: Высшая школа, 1974. – 504 с.
18. Горбачов А.А. Наукові основи технологічних процесів виробництва шкіри та колагену з позиції термодинаміки: Автореф. дис…д-ра тех. наук: 05.19.05 / КДУТД. – К., 2002. – 40 с.
19. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисление. Для втузов. –М.: ГИЗ физ. – мат. литературы, 1963. –856 с.

Надійшла 22.3.2009 р.

УДК 612.317

В.Р. ЛЮБЧИК, Ю.В. СЕНЧИШИНА, Г.Б. ПАРАСКА
Хмельницький національний університет
О.М. КИЛИМНИК
Подільський експертно-технічний центр

РОЗРОБКА АНАЛІТИЧНОГО ФАЗОВОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНЕЙ ДО ТРЬОХ ОБ'ЄКТІВ

Стаття присвячена розробці аналітичного фазового методу вимірювання відстаней до трьох об'єктів. Метод полягає у зондуванні гармонійними сигналами із кратними частотами об'єктів вимірювання, вимірюванні амплітуд та фазових зсувів сумарних відбитих сигналів, записі систем рівнянь та їх розв'язку. Для розв'язання систем рівнянь застосовано метод надлишкових обчислень, що дало змогу лінеаризувати систему рівнянь та звести її до знаходження коефіцієнтів кубічного рівняння, розв'язок якого дав значення сигналів відбитих від кожного об'єкту в комплексній формі.

The article is devoted development of analytical phase method of measuring of distances to three objects. A method consists in sounding harmonious signals with multiple frequencies of measuring objects, measuring of amplitudes and phase changes of the total reflected signals, record of the systems of equalizations and their decision. For the decision of the systems of equalizations the method of surplus calculations is applied, that enabled linearizuvati system of equalizations and to erect it to finding of coefficients of cube equalization the decision of which was given by the value of signals reflected from every object in a complex form.

Попередні дослідження дозволили розробити фазові методи, які призначені для вимірювання відстаней до двох, трьох та більше об'єктів [1-4]. Проте, фазові методи які дозволяють вимірювати відстані до трьох і більше об'єктів [4] мають суттєві недоліки. А саме, для вимірювання відстаней необхідно сканувати значний частотний діапазон, що суттєво обмежує коло задач, які можуть розв'язувати дані методи, також точність встановлення мінімуму амплітудно-частотної характеристики сумарного відбитого сигналу (АЧХ) є досить низькою через її плоский характер. Отже, цей метод має низьку точність і не може відповідати сучасним вимогам до вимірювальних методів.

Тому необхідно знайти шляхи зниження частотного діапазону вимірювальних сигналів та підвищення точності вимірювання. Підвищення точності вимірювання можна досягти шляхом застосування обчислювальних методів вимірювання, коли застосувавши результати невеликої кількості вимірювань, шляхом обчислень заходяться значення необхідних нам параметрів. Даний підхід було використано у методі вимірювання відстаней до двох об'єктів [3].

Для розробки аналітичного методу вимірювання відстаней до трьох об'єктів розглянемо систему рівнянь, виведення якої наведено в роботах [2, 3]:

$$\begin{cases} a_{\Sigma 1}\cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 1}} = a_1\cdot e^{-j\varphi_1} + a_2\cdot e^{-j\varphi_2} + a_3\cdot e^{-j\varphi_3} + a_4\cdot e^{-j\varphi_4} \\ a_{\Sigma 2}\cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 2}} = a_1\cdot e^{-j2\varphi_1} + a_2\cdot e^{-j2\varphi_2} + a_3\cdot e^{-j2\varphi_3} + a_4\cdot e^{-j2\varphi_4} \\ a_{\Sigma 3}\cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 3}} = a_1\cdot e^{-j3\varphi_1} + a_2\cdot e^{-j3\varphi_2} + a_3\cdot e^{-j3\varphi_3} + a_4\cdot e^{-j3\varphi_4} \\ a_{\Sigma 4}\cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 4}} = a_1\cdot e^{-j4\varphi_1} + a_2\cdot e^{-j4\varphi_2} + a_3\cdot e^{-j4\varphi_3} + a_4\cdot e^{-j4\varphi_4} \end{cases} \quad (1)$$

Дана система рівнянь описує зв'язок між сумарними сигналами для чотирьох зондуючих сигналів, частоти яких знаходяться у співвідношенні 1: 2: 3: 4. В роботах [2, 3] було показано, що фазові зсуви сигналів відбитих від кожного об'єкту із зростанням частоти зростають лінійно, це відображено у системі (1). В системі (1) зліва наведено відомі величини сумарних сигналів, амплітуди і фазові зсуви яких вимірюються. Справа наведено сума сигналів відбитих від кожного об'єкту.

При подальшому збільшенні частоти зондуючого сигналу в співвідношенні 5: 6: 7: 8 та 9: 10: 11: 12 можна отримати ще дві системи рівнянь, які описують зв'язок між сумарними відбитими сигналами та сумами сигналів, відбитих від кожного об'єкту на різних частотах.

$$\begin{cases} a_{\Sigma 5}\cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 1}} = a_1\cdot e^{-j5\varphi_1} + a_2\cdot e^{-j5\varphi_2} + a_3\cdot e^{-j5\varphi_3} + a_4\cdot e^{-j5\varphi_4} \\ a_{\Sigma 6}\cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 2}} = a_1\cdot e^{-j6\varphi_1} + a_2\cdot e^{-j6\varphi_2} + a_3\cdot e^{-j6\varphi_3} + a_4\cdot e^{-j6\varphi_4} \\ a_{\Sigma 7}\cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 3}} = a_1\cdot e^{-j7\varphi_1} + a_2\cdot e^{-j7\varphi_2} + a_3\cdot e^{-j7\varphi_3} + a_4\cdot e^{-j7\varphi_4} \\ a_{\Sigma 8}\cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 4}} = a_1\cdot e^{-j8\varphi_1} + a_2\cdot e^{-j8\varphi_2} + a_3\cdot e^{-j8\varphi_3} + a_4\cdot e^{-j8\varphi_4} \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} a_{\Sigma 9}\cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 1}} = a_1\cdot e^{-j9\varphi_1} + a_2\cdot e^{-j9\varphi_2} + a_3\cdot e^{-j9\varphi_3} + a_4\cdot e^{-j9\varphi_4} \\ a_{\Sigma 10}\cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 2}} = a_1\cdot e^{-j10\varphi_1} + a_2\cdot e^{-j10\varphi_2} + a_3\cdot e^{-j10\varphi_3} + a_4\cdot e^{-j10\varphi_4} \\ a_{\Sigma 11}\cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 3}} = a_1\cdot e^{-j11\varphi_1} + a_2\cdot e^{-j11\varphi_2} + a_3\cdot e^{-j11\varphi_3} + a_4\cdot e^{-j11\varphi_4} \\ a_{\Sigma 12}\cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 4}} = a_1\cdot e^{-j12\varphi_1} + a_2\cdot e^{-j12\varphi_2} + a_3\cdot e^{-j12\varphi_3} + a_4\cdot e^{-j12\varphi_4} \end{cases}. \quad (3)$$

В наведених системах рівнянь вирази вигляду $e^{-jn\varphi_i}$ можна замінити виразами $\left(e^{-j\varphi_i}\right)^n$. Якщо провести заміни вигляду:

$$a_{\Sigma 1}\cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 1}} = \dot{b}_1,\ a_{\Sigma 2}\cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 2}} = \dot{b}_2,\ a_{\Sigma 3}\cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 3}} = \dot{b}_3,\ a_{\Sigma 4}\cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 4}} = \dot{b}_4,$$
$$a_{\Sigma 5}\cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 5}} = \dot{b}_5,\ a_{\Sigma 6}\cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 6}} = \dot{b}_6,\ a_{\Sigma 7}\cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 7}} = \dot{b}_7,\ a_{\Sigma 8}\cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 8}} = \dot{b}_8, \quad (4)$$
$$a_{\Sigma 9}\cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 9}} = \dot{b}_9,\ a_{\Sigma 10}\cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 10}} = \dot{b}_{10},\ a_{\Sigma 11}\cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 11}} = \dot{b}_{11},\ a_{\Sigma 12}\cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 12}} = \dot{b}_{12},$$

а також:

$$e^{-j\varphi_1} = \dot{c}_1,\ e^{-j\varphi_2} = \dot{c}_2,\ e^{-j\varphi_3} = \dot{c}_3,\ e^{-j\varphi_4} = \dot{c}_4, \quad (5)$$

отримаємо наступні системи рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{b}_1 = a_1\cdot\dot{c}_1 + a_2\cdot\dot{c}_2 + a_3\cdot\dot{c}_3 + a_4\cdot\dot{c}_4 \\ \dot{b}_2 = a_1\cdot\dot{c}_1^2 + a_2\cdot\dot{c}_2^2 + a_3\cdot\dot{c}_3^2 + a_4\cdot\dot{c}_4^2 \\ \dot{b}_3 = a_1\cdot\dot{c}_1^3 + a_2\cdot\dot{c}_2^3 + a_3\cdot\dot{c}_3^3 + a_4\cdot\dot{c}_4^3 \\ \dot{b}_4 = a_1\cdot\dot{c}_1^4 + a_2\cdot\dot{c}_2^4 + a_3\cdot\dot{c}_3^4 + a_4\cdot\dot{c}_4^4 \end{cases}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} \dot{b}_5 = a_1 \cdot \dot{c}_1^5 + a_2 \cdot \dot{c}_2^5 + a_3 \cdot \dot{c}_3^5 + a_4 \cdot \dot{c}_4^5 \\ \dot{b}_6 = a_1 \cdot \dot{c}_1^6 + a_2 \cdot \dot{c}_2^6 + a_3 \cdot \dot{c}_3^6 + a_4 \cdot \dot{c}_4^6 \\ \dot{b}_7 = a_1 \cdot \dot{c}_1^7 + a_2 \cdot \dot{c}_2^7 + a_3 \cdot \dot{c}_3^7 + a_4 \cdot \dot{c}_4^7 \\ \dot{b}_8 = a_1 \cdot \dot{c}_1^8 + a_2 \cdot \dot{c}_2^8 + a_3 \cdot \dot{c}_3^8 + a_4 \cdot \dot{c}_4^8 \end{cases}, \tag{7}$$

$$\begin{cases} \dot{b}_9 = a_1 \cdot \dot{c}_1^9 + a_2 \cdot \dot{c}_2^9 + a_3 \cdot \dot{c}_3^9 + a_4 \cdot \dot{c}_4^9 \\ \dot{b}_{10} = a_1 \cdot \dot{c}_1^{10} + a_2 \cdot \dot{c}_2^{10} + a_3 \cdot \dot{c}_3^{10} + a_4 \cdot \dot{c}_4^{10} \\ \dot{b}_{11} = a_1 \cdot \dot{c}_1^{11} + a_2 \cdot \dot{c}_2^{11} + a_3 \cdot \dot{c}_3^{11} + a_4 \cdot \dot{c}_4^{11} \\ \dot{b}_{12} = a_1 \cdot \dot{c}_1^{12} + a_2 \cdot \dot{c}_2^{12} + a_3 \cdot \dot{c}_3^{12} + a_4 \cdot \dot{c}_4^{12} \end{cases}. \tag{8}$$

Дані системи рівнянь складаються з матриці-стовпчика:

$$A = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{pmatrix}, \tag{9}$$

значень амплітуд сигналів відбитих від кожного об'єкту, матриць-стовпчиків:

$$B_1 = \begin{pmatrix} \dot{b}_1 \\ \dot{b}_2 \\ \dot{b}_3 \\ \dot{b}_4 \end{pmatrix}, \; B_2 = \begin{pmatrix} \dot{b}_5 \\ \dot{b}_6 \\ \dot{b}_7 \\ \dot{b}_8 \end{pmatrix}, \; B_3 = \begin{pmatrix} \dot{b}_9 \\ \dot{b}_{10} \\ \dot{b}_{11} \\ \dot{b}_{12} \end{pmatrix}, \tag{10}$$

значень векторів сумарних відбитих сигналів відповідно до виразів (4), матриць:

$$C_1 = \begin{pmatrix} \dot{c}_1 & \dot{c}_2 & \dot{c}_3 & \dot{c}_4 \\ \dot{c}_1^2 & \dot{c}_2^2 & \dot{c}_3^2 & \dot{c}_4^2 \\ \dot{c}_1^3 & \dot{c}_2^3 & \dot{c}_3^3 & \dot{c}_4^3 \\ \dot{c}_1^4 & \dot{c}_2^4 & \dot{c}_3^4 & \dot{c}_4^4 \end{pmatrix}, \; C_2 = \begin{pmatrix} \dot{c}_1^5 & \dot{c}_2^5 & \dot{c}_3^5 & \dot{c}_4^5 \\ \dot{c}_1^6 & \dot{c}_2^6 & \dot{c}_3^6 & \dot{c}_4^6 \\ \dot{c}_1^7 & \dot{c}_2^7 & \dot{c}_3^7 & \dot{c}_4^7 \\ \dot{c}_1^8 & \dot{c}_2^8 & \dot{c}_3^8 & \dot{c}_4^8 \end{pmatrix}, \; C_3 = \begin{pmatrix} \dot{c}_1^9 & \dot{c}_2^9 & \dot{c}_3^9 & \dot{c}_4^9 \\ \dot{c}_1^{10} & \dot{c}_2^{10} & \dot{c}_3^{10} & \dot{c}_4^{10} \\ \dot{c}_1^{11} & \dot{c}_2^{11} & \dot{c}_3^{11} & \dot{c}_4^{11} \\ \dot{c}_1^{12} & \dot{c}_2^{12} & \dot{c}_3^{12} & \dot{c}_4^{12} \end{pmatrix}, \tag{11}$$

значень аргументів відповідно до заміни (5). Враховуючи вирази (9), (10) та (11) системи рівнянь (6), (7) та (8) можна записати в матричній формі:

$$A \cdot C_1 = B_1, \; A \cdot C_2 = B_2, \; A \cdot C_3 = B_3. \tag{12}$$

Розв'язок цих систем рівнянь відносно значень амплітуд сигналів відбитих від кожного об'єкту записується наступним чином:

$$A = B_1 \cdot C_1^{-1}, \; A = B_2 \cdot C_2^{-1}, \; A = B_3 \cdot C_3^{-1}. \tag{13}$$

В результаті перетворень відповідно до виразів (13), отримаємо наступні матриці стовпчики:

$$B_1 \cdot C_1^{-1} = \begin{vmatrix} -\dfrac{\dot{c}_2\dot{c}_3\dot{c}_4\dot{b}_1}{\dot{m}_1\dot{c}_1} + \dfrac{(\dot{c}_2\dot{c}_3 + \dot{c}_2\dot{c}_4 + \dot{c}_3\dot{c}_4)\dot{b}_2}{\dot{m}_1\dot{c}_1} - \dfrac{(\dot{c}_2 + \dot{c}_3 + \dot{c}_4)\dot{b}_3}{\dot{m}_1\dot{c}_1} + \dfrac{\dot{b}_4}{\dot{m}_1\dot{c}_1} \\ \dfrac{\dot{c}_1\dot{c}_3\dot{c}_4\dot{b}_1}{\dot{m}_2\dot{c}_2} - \dfrac{(\dot{c}_1\dot{c}_3 + \dot{c}_1\dot{c}_4 + \dot{c}_3\dot{c}_4)\dot{b}_2}{\dot{m}_2\dot{c}_2} + \dfrac{(\dot{c}_1 + \dot{c}_3 + \dot{c}_4)\dot{b}_3}{\dot{m}_2\dot{c}_2} - \dfrac{\dot{b}_4}{\dot{m}_2\dot{c}_2} \\ -\dfrac{\dot{c}_1\dot{c}_2\dot{c}_4\dot{b}_1}{\dot{m}_3\dot{c}_3} + \dfrac{(\dot{c}_1\dot{c}_2 + \dot{c}_1\dot{c}_4 + \dot{c}_2\dot{c}_4)\dot{b}_2}{\dot{m}_3\dot{c}_3} - \dfrac{(\dot{c}_1 + \dot{c}_2 + \dot{c}_4)\dot{b}_3}{\dot{m}_3\dot{c}_3} + \dfrac{\dot{b}_4}{\dot{m}_3\dot{c}_3} \\ \dfrac{\dot{c}_1\dot{c}_2\dot{c}_3\dot{b}_1}{\dot{m}_4\dot{c}_4} - \dfrac{(\dot{c}_1\dot{c}_2 + \dot{c}_1\dot{c}_3 + \dot{c}_2\dot{c}_3)\dot{b}_2}{\dot{m}_4\dot{c}_4} + \dfrac{(\dot{c}_1 + \dot{c}_2 + \dot{c}_3)\dot{b}_3}{\dot{m}_4\dot{c}_4} - \dfrac{\dot{b}_4}{\dot{m}_4\dot{c}_4} \end{vmatrix}, \tag{14}$$

$$B_2 \cdot C_2^{-1} = \begin{vmatrix} -\dfrac{\dot c_2\dot c_3\dot c_4\dot b_5}{\dot m_1\dot c_1^5} + \dfrac{(\dot c_2\dot c_3 + \dot c_2\dot c_4 + \dot c_3\dot c_4)\dot b_6}{\dot m_1\dot c_1^5} - \dfrac{(\dot c_2 + \dot c_3 + \dot c_4)\dot b_7}{\dot m_1\dot c_1^5} + \dfrac{\dot b_8}{\dot m_1\dot c_1^5} \\ \dfrac{\dot c_1\dot c_3\dot c_4\dot b_5}{\dot m_2\dot c_2^5} - \dfrac{(\dot c_1\dot c_3 + \dot c_1\dot c_4 + \dot c_3\dot c_4)\dot b_6}{\dot m_2\dot c_2^5} + \dfrac{(\dot c_1 + \dot c_3 + \dot c_4)\dot b_7}{\dot m_2\dot c_2^5} - \dfrac{\dot b_8}{\dot m_2\dot c_2^5} \\ -\dfrac{\dot c_1\dot c_2\dot c_4\dot b_5}{\dot m_3\dot c_3^5} + \dfrac{(\dot c_1\dot c_2 + \dot c_1\dot c_4 + \dot c_2\dot c_4)\dot b_6}{\dot m_3\dot c_3^5} - \dfrac{(\dot c_1 + \dot c_2 + \dot c_4)\dot b_7}{\dot m_3\dot c_3^5} + \dfrac{\dot b_8}{\dot m_3\dot c_3^5} \\ \dfrac{\dot c_1\dot c_2\dot c_3\dot b_5}{\dot m_4\dot c_4^5} - \dfrac{(\dot c_1\dot c_2 + \dot c_1\dot c_3 + \dot c_2\dot c_3)\dot b_6}{\dot m_4\dot c_4^5} + \dfrac{(\dot c_1 + \dot c_2 + \dot c_3)\dot b_7}{\dot m_4\dot c_4^5} - \dfrac{\dot b_8}{\dot m_4\dot c_4^5} \end{vmatrix}, \tag{15}$$

$$B_3 \cdot C_3^{-1} = \begin{vmatrix} -\dfrac{\dot c_2\dot c_3\dot c_4\dot b_9}{\dot m_1\dot c_1^9} + \dfrac{(\dot c_2\dot c_3 + \dot c_2\dot c_4 + \dot c_3\dot c_4)\dot b_{10}}{\dot m_1\dot c_1^9} - \dfrac{(\dot c_2 + \dot c_3 + \dot c_4)\dot b_{11}}{\dot m_1\dot c_1^9} + \dfrac{\dot b_{12}}{\dot m_1\dot c_1^9} \\ \dfrac{\dot c_1\dot c_3\dot c_4\dot b_9}{\dot m_2\dot c_2^9} - \dfrac{(\dot c_1\dot c_3 + \dot c_1\dot c_4 + \dot c_3\dot c_4)\dot b_{10}}{\dot m_2\dot c_2^9} + \dfrac{(\dot c_1 + \dot c_3 + \dot c_4)\dot b_{11}}{\dot m_2\dot c_2^9} - \dfrac{\dot b_{12}}{\dot m_2\dot c_2^9} \\ -\dfrac{\dot c_1\dot c_2\dot c_4\dot b_9}{\dot m_3\dot c_3^9} + \dfrac{(\dot c_1\dot c_2 + \dot c_1\dot c_4 + \dot c_2\dot c_4)\dot b_{10}}{\dot m_3\dot c_3^9} - \dfrac{(\dot c_1 + \dot c_2 + \dot c_4)\dot b_{11}}{\dot m_3\dot c_3^9} + \dfrac{\dot b_{12}}{\dot m_3\dot c_3^9} \\ \dfrac{\dot c_1\dot c_2\dot c_3\dot b_9}{\dot m_4\dot c_4^9} - \dfrac{(\dot c_1\dot c_2 + \dot c_1\dot c_3 + \dot c_2\dot c_3)\dot b_{10}}{\dot m_4\dot c_4^9} + \dfrac{(\dot c_1 + \dot c_2 + \dot c_3)\dot b_{11}}{\dot m_4\dot c_4^9} - \dfrac{\dot b_{12}}{\dot m_4\dot c_4^9} \end{vmatrix}, \tag{16}$$

де

$$\begin{cases} \dot m_1 = \dot c_1\dot c_2\dot c_3 - \dot c_2\dot c_3\dot c_4 + \dot c_1\dot c_2\dot c_4 + \dot c_1\dot c_3\dot c_4 - \dot c_1^2\dot c_2 - \dot c_1^2\dot c_3 - \dot c_1^2\dot c_4 + \dot c_1^3 \\ \dot m_2 = -\dot c_1\dot c_2\dot c_3 - \dot c_2\dot c_3\dot c_4 - \dot c_1\dot c_2\dot c_4 + \dot c_1\dot c_3\dot c_4 - \dot c_2^2\dot c_1 - \dot c_2^2\dot c_3 - \dot c_2^2\dot c_4 + \dot c_2^3 \\ \dot m_3 = \dot c_1\dot c_2\dot c_3 + \dot c_2\dot c_3\dot c_4 - \dot c_1\dot c_2\dot c_4 + \dot c_1\dot c_3\dot c_4 - \dot c_3^2\dot c_1 - \dot c_3^2\dot c_2 - \dot c_3^2\dot c_4 + \dot c_3^3 \\ \dot m_4 = \dot c_1\dot c_2\dot c_3 - \dot c_1\dot c_2\dot c_4 - \dot c_1\dot c_3\dot c_4 - \dot c_2\dot c_3\dot c_4 - \dot c_4^2\dot c_1 - \dot c_4^2\dot c_2 - \dot c_4^2\dot c_3 + \dot c_4^3 \end{cases}. \tag{17}$$

Аналіз виразів (14), (15) і (16) показує, що елементи матриць представляють собою значення амплітуд векторів сигналів відбитих від кожного об’єкту. Перший елемент матриці-стовпчика (14) подібний до першого елементу матриці-стовпчика (15) і відрізняється ступенем $\dot c_1$ знаменнику: у виразі (14) перший ступінь, у виразі (15) п’ятий, у виразі (16) дев’ятий; та значеннями $\dot b_i$, у матриці (14) значення $\dot b_1$, $\dot b_2$, $\dot b_3$ та $\dot b_4$, у матриці (15) значення $\dot b_5$, $\dot b_6$, $\dot b_7$ та $\dot b_8$, а у матриці (15) значення $\dot b_9$, $\dot b_{10}$, $\dot b_{11}$ та $\dot b_{12}$. Аналогічна подібність у другого, третього та четверного елементів матриць стовпчиків (14), (15) та (16). Ще однією особливістю є те, що в чисельнику наявні тільки три елементи $\dot c_i$.

Для того, щоб позбутись знаменника скористаємось наступним прийомом: піднесемо до квадрату перший елемент матриці-стовпчика вираз (15), в результаті у знаменнику отримаємо вираз із десятим степенем $\dot c_1$, для отримання такого ж степеню потрібно перемножити перший елемент матриці-стовпчика вираз (14) із першим елементом матриці-стовпчика вираз (16). Віднявши квадрат першого елементу, отриманий із виразу (15), від добутку перших елементів матриць (14) та (16), в результаті отримаємо нуль. Отже:

$$\begin{aligned} &\left(-\dot c_2\dot c_3\dot c_4\dot b_5 + (\dot c_2\dot c_3 + \dot c_2\dot c_4 + \dot c_3\dot c_4)\dot b_6 - (\dot c_2 + \dot c_3 + \dot c_4)\dot b_7 + \dot b_8\right)^2 - \\ &\left(-\dot c_2\dot c_3\dot c_4\dot b_1 + (\dot c_2\dot c_3 + \dot c_2\dot c_4 + \dot c_3\dot c_4)\dot b_2 - (\dot c_2 + \dot c_3 + \dot c_4)\dot b_3 + \dot b_4\right)\times \\ &\times\left(-\dot c_2\dot c_3\dot c_4\dot b_9 + (\dot c_2\dot c_3 + \dot c_2\dot c_4 + \dot c_3\dot c_4)\dot b_{10} - (\dot c_2 + \dot c_3 + \dot c_4)\dot b_{11} + \dot b_{12}\right) = 0 \end{aligned}. \tag{18}$$

Аналіз виразу (18) показує, що він залежить від коефіцієнтів $\dot b_1$ до $\dot b_{12}$, та виразів $\dot c_2\dot c_3\dot c_4$, $\dot c_2\dot c_3 + \dot c_2\dot c_4 + \dot c_3\dot c_4$ та $\dot c_2 + \dot c_3 + \dot c_4$. Останні три вирази є ні чим іншим як коефіцієнтами кубічного рівняння відповідно до теореми Вієта. Тому, якщо ми знайдемо ці коефіцієнти, то відповідно можемо підставити їх у кубічне рівняння, розв’язок якого дасть нам значення $\dot c_2$, $\dot c_3$ та $\dot c_4$. Якщо ввести позначення:

$$\dot c_2\dot c_3\dot c_4 = \dot k_1,\ \dot c_2\dot c_3 + \dot c_2\dot c_4 + \dot c_3\dot c_4 = \dot k_2,\ \dot c_2 + \dot c_3 + \dot c_4 = \dot k_3, \tag{19}$$

то в результаті після підстановки (19) у (18) і перетворень отримаємо:

$$\dot v_1 k_3^2 + \dot v_2 k_2^2 + \dot v_3 k_1^2 + \dot v_4 k_1 k_2 + \dot v_5 k_1 k_3 + \dot v_6 k_2 k_3 + \dot v_7 k_1 + \dot v_8 k_2 + \dot v_9 k_3 + \dot b_4 \dot b_{12} - \dot b_8^2 = 0, \tag{20}$$

де

$$\left(\dot{b}_3\dot{b}_{11}-\dot{b}_7^2\right)=\dot{v}_1,\ \left(\dot{b}_2\dot{b}_{10}-\dot{b}_6^2\right)=\dot{v}_2,\ \left(\dot{b}_1\dot{b}_9-\dot{b}_5^2\right)=\dot{v}_3,$$
$$\left(\dot{b}_5\dot{b}_6-\dot{b}_2\dot{b}_9-\dot{b}_1\dot{b}_{10}\right)=\dot{v}_4,\ \left(\dot{b}_1\dot{b}_{11}-2\dot{b}_5\dot{b}_7+\dot{b}_3\dot{b}_9\right)=\dot{v}_5,\ \left(2\dot{b}_6\dot{b}_7-\dot{b}_2\dot{b}_{11}-\dot{b}_3\dot{b}_{10}\right)=\dot{v}_6,$$
$$\left(2\dot{b}_5\dot{b}_8-\dot{b}_1\dot{b}_{12}-\dot{b}_4\dot{b}_9\right)=\dot{v}_7,\ \left(\dot{b}_2\dot{b}_{12}+\dot{b}_4\dot{b}_{10}-2\dot{b}_6\dot{b}_8\right)=\dot{v}_8,\ \left(2\dot{b}_7\dot{b}_8-\dot{b}_4\dot{b}_{11}-\dot{b}_3\dot{b}_{12}\right)=\dot{v}_9. \quad (21)$$

У виразі (2) невідомими є значення $\dot{k}_1$, $\dot{k}_2$ і $\dot{k}_3$ які є коефіцієнтами кубічного рівняння. Дане рівняння є нелінійним через наявність у ньому квадратів та попарних добутків $\dot{k}_1$, $\dot{k}_2$ і $\dot{k}_3$. Проте, якщо квадрати і попарні добутки значень $\dot{k}_1$, $\dot{k}_2$ і $\dot{k}_3$ прийняти як невідомі, рівняння (20) стає лінійним і до нього можна застосовувати методи лінійної алгебри. Як видно з (20) у виразі є дев'ять невідомих, а рівняння одне. Отже, необхідно записати ще вісім рівнянь, що дасть змогу отримати однозначний розв'язок відносно $\dot{k}_1$, $\dot{k}_2$ і $\dot{k}_3$.

Тому як ми не обмежені у частотному діапазоні, можна скористатись наступним прийомом, для отримання додаткової інформації, яка дасть нам змогу записати додатково вісім рівнянь. Системи (6), (7) і (8) було отримано шляхом моделювання зондування об'єктів вимірювання сигналами з частотами, які співвідносяться між собою як 1: 2: 3: ...: 11: 12, в результаті чого отримано дванадцять значень амплітуд і фаз сумарних відбитих сигналів на усіх частотах. Якщо ми змоделюємо проходження сигналів з частотами, які співвідносяться між собою як 2: 3: 4: ...: 11: 12: 13, в результаті чого отримано дванадцять значень амплітуд і фаз сумарних відбитих сигналів на усіх даних частотах, і як наслідок будуть системи рівнянь, аналогічні системам (6), (7) і (8) але відмінні від них. Провівши виведення формул аналогічно виразам (9)-(19), в результаті отримаємо вираз, аналогічний виразу (20). Такі ж дії потрібно буде зробити, зсуваючи частоти зондуючих сигналів на одну ще сім разів. В результаті отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases}
\dot{v}_1k_3^2+\dot{v}_2k_2^2+\dot{v}_3k_1^2+\dot{v}_4k_1k_2+\dot{v}_5k_1k_3+\dot{v}_6k_2k_3+\dot{v}_7k_1+\dot{v}_8k_2+\dot{v}_9k_3+\dot{b}_4\dot{b}_{12}-\dot{b}_8^2=0\\
\dot{v}_{10}k_3^2+\dot{v}_{11}k_2^2+\dot{v}_{12}k_1^2+\dot{v}_{13}k_1k_2+\dot{v}_{23}k_1k_3+\dot{v}_{15}k_2k_3+\dot{v}_{16}k_1+\dot{v}_{17}k_2+\dot{v}_{18}k_3+\dot{b}_4\dot{b}_{12}-\dot{b}_8^2=0\\
\dot{v}_{20}k_3^2+\dot{v}_{21}k_2^2+\dot{v}_{22}k_1^2+\dot{v}_{23}k_1k_2+\dot{v}_{24}k_1k_3+\dot{v}_{25}k_2k_3+\dot{v}_{26}k_1+\dot{v}_{27}k_2+\dot{v}_{28}k_3+\dot{b}_4\dot{b}_{12}-\dot{b}_8^2=0\\
\dot{v}_{30}k_3^2+\dot{v}_{31}k_2^2+\dot{v}_{32}k_1^2+\dot{v}_{33}k_1k_2+\dot{v}_{33}k_1k_3+\dot{v}_{35}k_2k_3+\dot{v}_{36}k_1+\dot{v}_{37}k_2+\dot{v}_{38}k_3+\dot{b}_4\dot{b}_{12}-\dot{b}_8^2=0\\
\dot{v}_{40}k_3^2+\dot{v}_{41}k_2^2+\dot{v}_{42}k_1^2+\dot{v}_{43}k_1k_2+\dot{v}_{43}k_1k_3+\dot{v}_{45}k_2k_3+\dot{v}_{46}k_1+\dot{v}_{47}k_2+\dot{v}_{48}k_3+\dot{b}_4\dot{b}_{12}-\dot{b}_8^2=0.\\
\dot{v}_{50}k_3^2+\dot{v}_{51}k_2^2+\dot{v}_{52}k_1^2+\dot{v}_{53}k_1k_2+\dot{v}_{53}k_1k_3+\dot{v}_{55}k_2k_3+\dot{v}_{56}k_1+\dot{v}_{57}k_2+\dot{v}_{58}k_3+\dot{b}_4\dot{b}_{12}-\dot{b}_8^2=0\\
\dot{v}_{60}k_3^2+\dot{v}_{61}k_2^2+\dot{v}_{62}k_1^2+\dot{v}_{63}k_1k_2+\dot{v}_{63}k_1k_3+\dot{v}_{65}k_2k_3+\dot{v}_{66}k_1+\dot{v}_{67}k_2+\dot{v}_{68}k_3+\dot{b}_4\dot{b}_{12}-\dot{b}_8^2=0\\
\dot{v}_{70}k_3^2+\dot{v}_{71}k_2^2+\dot{v}_{72}k_1^2+\dot{v}_{73}k_1k_2+\dot{v}_{73}k_1k_3+\dot{v}_{75}k_2k_3+\dot{v}_{76}k_1+\dot{v}_{77}k_2+\dot{v}_{78}k_3+\dot{b}_4\dot{b}_{12}-\dot{b}_8^2=0\\
\dot{v}_{80}k_3^2+\dot{v}_{81}k_2^2+\dot{v}_{82}k_1^2+\dot{v}_{83}k_1k_2+\dot{v}_{83}k_1k_3+\dot{v}_{85}k_2k_3+\dot{v}_{86}k_1+\dot{v}_{87}k_2+\dot{v}_{88}k_3+\dot{b}_4\dot{b}_{12}-\dot{b}_8^2=0
\end{cases} \quad (22)$$

Коефіцієнти $\dot{v}_i$ у системі рівнянь (22) знаходяться за виразами (21), тільки у виразах необхідно збільшити номера коефіцієнтів $\dot{b}_i$ для другого рівняння на один, третього – на два і т.д.

Розв'язок системи (22) дасть нам значення $\dot{k}_1$, $\dot{k}_2$ і $\dot{k}_3$, що, в свою чергу, дозволить нам отримати кубічне рівняння:

$$\dot{c}^3-\dot{k}_3\dot{c}^2+\dot{k}_2\dot{c}+\dot{k}_1=0. \quad (23)$$

Розв'язок рівняння (23) дасть нам значення $\dot{c}_2$, $\dot{c}_3$ та $\dot{c}_4$, що відповідно до (5) дасть змогу отримати значення φ_2, φ_3 і φ_4:

$$\varphi_2=\arctan\frac{\mathrm{Im}(\dot{c}_2)}{\mathrm{Re}(\dot{c}_2)},\ \varphi_3=\arctan\frac{\mathrm{Im}(\dot{c}_3)}{\mathrm{Re}(\dot{c}_3)},\ \varphi_4=\arctan\frac{\mathrm{Im}(\dot{c}_4)}{\mathrm{Re}(\dot{c}_4)}. \quad (24)$$

Значення фазових зсувів φ_2, φ_3 і φ_4 дозволяють знайти відстані до кожного об'єкту:

$$l_2=\frac{\varphi_2 c}{4\pi f},\ l_3=\frac{\varphi_3 c}{4\pi f},\ l_4=\frac{\varphi_4 c}{4\pi f}. \quad (25)$$

Значення амплітуд відбитих сигналів можна знайти підставивши значення фазових зсувів у наступну систему рівнянь, причому, значення першого сигналу із системи «випадає» внаслідок відповідних математичних перетворень:

$$\begin{cases} a_{\Sigma 1} \cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 1}} = a_2 \cdot e^{-j\varphi_2} + a_3 \cdot e^{-j\varphi_3} + a_4 \cdot e^{-j\varphi_4} \\ a_{\Sigma 2} \cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 2}} = a_2 \cdot e^{-j2\varphi_2} + a_3 \cdot e^{-j2\varphi_3} + a_4 \cdot e^{-j2\varphi_4} \\ a_{\Sigma 3} \cdot e^{-j\varphi_{\Sigma 3}} = a_2 \cdot e^{-j3\varphi_2} + a_3 \cdot e^{-j3\varphi_3} + a_4 \cdot e^{-j3\varphi_4} \end{cases}, \qquad (26)$$

та розв'язавши його відносно a_2, a_3 і a_4.

Знаючи амплітуду зондуючого сигналу, можна розрахувати коефіцієнти відбиття кожного об'єкту:

$$k_2 = \frac{a_2}{a},\; k_3 = \frac{a_3}{a},\; k_4 = \frac{a_4}{a}. \qquad (27)$$

Наведені математичні перетворення доводять можливість практичної реалізації фазового методу вимірювання відстаней до трьох об'єктів. Для реалізації цього методу достатньо використати двадцять зондуючих гармонійних сигналів із рівномірним кроком між ними. У порівнянні із імпульсними або частотними методами, наведений фазовий метод має значно менший частотний діапазон, що дозволяє використовувати для пошуку об'єктів вимірювання в середовищах, які мають значні згасання сигналів на високих частотах.

Розроблений метод дозволить значно підвисити точності вимірювання відстаней до об'єктів в середині твердих матеріалів. Він може використовуватись в задачах дефектоскопії, ультразвукової діагностики медико-біологічних об'єктів, пошуку пошкоджень кабельних ліній зв'язку, гідролокації, радіолокації тощо [5, 6].

Література

1. Любчик В.Р., Горященко К.Л. Імпульсно-фазовий метод вимірювання відстані до пошкодження низькочастотних ліній зв'язку // Вісник ТУП, – 2003,- С.196-200

2. Любчик В. Р., Дем'янюк С. М. Дослідження потенційної точності та швидкодії спектрально-фазового методу вимірювання відстані // МНТЖ, «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», м. Хмельницький, 2003. – № 1 (23), – стор. 74-80.

3. Любчик В.Р. Розробка фазового методу вимірювання відстаней до двох об'єктів // Вісник ТУП, Ч.1., Том 3, № 4, 2004, – С.108-114.

4. Любчик В.Р., Гнатюк О. І. Вимірювання відстаней до трьох об'єктів. – Вісник ТУП, № 2, 2005. – С.183-188.

5. Любчик В.Р., Чук І.І., Килимник О.М. Фазочастотна дефектоскопія // Вісник ХНУ, № 3, 2008,- С.159- 163.

6. Сенчишина Ю.В., Любчик В.Р. Дослідження методів ультразвукової діагностики медико-біологічних обєктів // Вісник ХНУ, № 6, 2008,- С.132- 137

Надійшла 16.3.2009 р.

УДК 621.382

Ю.С. КРАВЧЕНКО, В.С. ОСАДЧУК, Г.В. ІВЧУК
Вінницький національний технічний університет

ДІАГНОСТИКА ТА КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРИ В ПЛАЗМОХІМІЧНИХ ПРОЦЕСАХ ТРАВЛЕННЯ МІКРОСТРУКТУР

Проаналізовано стан та методи діагностики і контролю температури в сучасній мікроелектронній технології, шляхи підвищення їх ефективності за рахунок впровадження нових підходів в реалізації контролю на основі сучасних досягнень в цій області.

Вступ

Внаслідок особливого значення температурного режиму обробки напівпровідникових структур в сучасній мікроелектронній технології [1] питанням підвищення ефективності і достовірності контролю температури приділяється особлива увага як зі сторони дослідників цього процесу [2, 3], так і виробничників [4, 5].

Сучасний моніторинг здійснюється переважно за рахунок збору та обробки інформації від спеціальних сенсорів, в основу роботи яких покладено різноманітні фізичні та хімічні ефекти, а сам моніторинг є основним базовим елементом системи управління технологічним процесом [3].

Мета даної роботи – аналіз шляхів підвищення ефективності і достовірності контролю температури при проведенні плазмохімічних процесів в мікроелектроніці.