

УДК 536.2.023

Ю.О. Скрипник*, Г.В. Юрчик#

*Київська державна академія технології та дизайну,
кафедра автоматизації та комп'ютерних технологій

#Національний університет "Львівська політехніка",

кафедра електронних засобів інформаційних та комп'ютерних технологій

ФАЗОВИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВІДНОСТІ МАТЕРІАЛІВ

© Скрипник Ю.О., Юрчик Г.В., 2002

Розглянуто прямий фазовий метод визначення температуропровідності різних матеріалів, що базується на збудженні у досліджуваному матеріалі плоскої температурної хвилі, вимірюванні різниці фаз температурних коливань у двох ізотермічних площинах зразка матеріалу і визначенні коефіцієнта температуропровідності за формулою.

A direct phase method different material conductivity ratio determination is discussed. Method is based on excitation in the investigated material of a plane temperature wave, with further measuring the phase difference between waves (oscillations) in two isothermic planes of the sample and calculation the thermal conductivity ratio by a formula proposed.

Впровадження в радіоелектронній промисловості нових автоматизованих технологій виробництва різних конструкційних радіоматеріалів (полімери-діелектрики, напівпровідники, ферити, сплави металів, пластмаси, текстилі, шаруваті пластики тощо). вимагає застосування нових високоточних приладів для автоматичного вимірювання і безперервного контролю теплофізичних параметрів цих матеріалів, від яких передусім залежить якість радіоелектронної апаратури, що випускається [1]. Одним з найважливіших теплофізичних параметрів є температуропровідність матеріалу.

Серед існуючих прямих фазових методів вимірювання коефіцієнта температуропровідності матеріалів, які відповідають таким показникам, як висока точність та швидкість вимірювання, а також простота схемного вирішення, є відомі методи [2, 3, 4], що базуються на збудженні у досліджуваному матеріалі плоскої температурної хвилі, вимірюванні різниці фаз температурних коливань у двох ізотермічних площинах зразка матеріалу і визначенні коефіцієнта температуропровідності за формулою [4]

$$a = \frac{\delta^2}{2\pi} F$$

де δ – товщина досліджуваного зразка матеріалу; F – частота температурної хвилі.

Однак неконтрольовані фазові зсуви, які вносяться інерційним нагрівачем поверхні матеріалу і інерційним термоприймачем температурної хвилі, не забезпечує високої точності вимірювання різниці фаз, створеної досліджуваним матеріалом, розташованим між нагрівачем та термоприймачем. Крім того, при дослідженні зразків матеріалів, товщина яких перевищує 5–10 мм, для отримання нульової різниці фаз температурної хвилі на ізотермічних поверхнях, тобто встановлення довжини температурної хвилі, що дорівнює товщині матеріалу, необхідно знижувати частоту температурних коливань до одиниць або

навіть до часток Герца, що значно знижує точність фазових вимірювань. При підвищенні частоти важко усунути неоднозначність фазових вимірювань, якщо різниця фаз перевищує $2\pi(360^\circ)$. Присутність цих чинників істотно може впливати на точність визначення коефіцієнта температуропровідності матеріалів.

У статті розглядається фазовий метод визначення коефіцієнта температуропровідності матеріалів, який забезпечує однозначність фазових вимірювань у широкому діапазоні співвідношень товщини досліджуваного одношарового або багатшарового пакета різних матеріалів і довжини температурної хвилі, що дає змогу розширити кількість досліджуваних матеріалів і підвищити точність визначення їх коефіцієнта температуропровідності.

На рисунку показана структурна схема пристрою для вимірювання коефіцієнта температуропровідності матеріалів фазовим методом. Метод визначення коефіцієнта температуропровідності матеріалів полягає ось у чому.

Нагрівання досліджуваного матеріалу або пакета з декількох матеріалів 15 здійснюється малоінерційним нагрівачем 4, на який діють змінною напругою від генератора 1, підсиленою по потужності підсилувачем 3. Внаслідок чого у пакеті досліджуваних матеріалів збуджується температурна хвиля з подвоєним значенням частоти напруги живлення нагрівача. Для вирівнювання частот температурних коливань і електричних коливань генератора 1 частота останніх ділиться на два у подільнику частоти 2. Температурна хвиля розповсюджується по товщині пакета 15 і приймається малоінерційним термоприймачем 6, наприклад, болометром або малоінерційним термістером, який розташований на протилежному боці пакета, що не нагрівається. Температурна хвиля у процесі поширення в матеріалі зазнає амплітудного затухання та фазової затримки залежно від відстані між нагрівачем і термоприймачем, тобто товщини δ досліджуваного пакета матеріалів.

При відсутності змінної складової теплообміну з оточуючим середовищем розподіл амплітуди та фази змінної складової температури T вздовж координати x , направленої по товщині пакета, описується рівнянням [1].

$$T = T_0 \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{a}} \cdot x\right) \cdot \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{a}} \cdot x\right) \quad (1)$$

де T_0 – амплітуда змінної складової температури на поверхні нагрівання ($x=0$); ω – кутова частота електричних коливань генератора 1; a – коефіцієнт температуропровідності пакета 15.

Довжина температурної хвилі L у досліджуваному матеріалі або пакеті

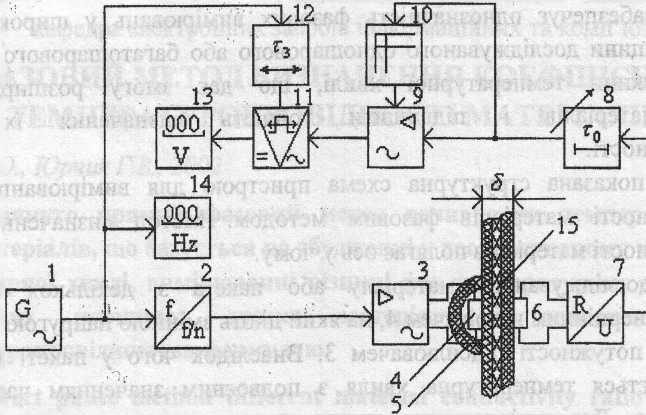
$$L = 2\pi / \sqrt{\frac{\omega}{a}} \quad (2)$$

Частоту електричних коливань $f = \frac{\omega}{2\pi}$ вибирають з умови нехтування гармонійною складовою теплообміну, тобто коли критерій [1]

$$Bi = \frac{\alpha}{B\sqrt{10}} = \frac{\alpha}{B\sqrt{2\pi f}} \leq 1 \quad (3)$$

де α – коефіцієнт теплообміну; B – коефіцієнт теплової активності.

При збільшенні частоти f умова (3) виконується краще, але довжина хвилі (2) зменшується і вона стає меншою від товщини досліджуваного матеріалу. При визначенні коефіцієнта температуропровідності пакета матеріалів при його товщині $\delta \geq 5-10$ мм у більшості випадків виникає ситуація, коли $L \ll \delta$.



Структурна схема пристрою для вимірювання коефіцієнта температуропровідності матеріалів: 1 – генератор напруги керованої частоти; 2 – подільник частоти; 3 – підсилювач потужності; 4 – малоінерційний нагрівач; 5 – теплоізолююча оболонка; 6 – малоінерційний термоприймач; 7 – вузол перетворення електричного опору в електричну напругу; 8 – ланка керованої затримки; 9 – підсилювач змінної напруги; 10 – вузол автоматичного керування підсиленням; 11 – фазовий детектор; 12 – ланка постійної затримки; 13 – цифровий вольтметр; 14 – цифровий частотомір; 15 – досліджуваний матеріал.

Фазовий зсув температурної хвилі у місці її приймання термоприймачем можна подати як

$$\Phi = \sqrt{\frac{\omega}{a}} \delta + \omega(\tau_1 + \tau_2) = 2\pi(m + p) \quad (4)$$

де τ_1 і τ_2 – теплові сталі часу нагрівача і термоприймача; m – ціле число довжин хвиль у матеріалі; p – дробна частина довжини останньої хвилі, якщо $\delta \neq mL$.

Оскільки електрична довжина хвилі дорівнює 2π , то вираз (4) містить деяку кількість цілих фазових циклів 2π і дробну частину останнього фазового циклу, що утворюють результуючий фазовий зсув температурної хвилі, яка пройшла через структуру досліджуваного матеріалу залежно від його коефіцієнта температуропровідності.

Вимірювання фази температурної хвилі на боці матеріалу, що не нагрівається, здійснюється у пристрої вимірювальним каналом, який складається з термоприймача 6, керованої лінії затримки 8, підсилювача змінної напруги 9 з вузлом автоматичного регулювання підсилення (АРП) 10, фазового детектора 11 і цифрового вольтметра 13. Під дією температурної хвилі змінна складова опору термоприймача 6 перетворюється вузлом 7 у змінну напругу, яка підсилюється підсилювачем 9 і регулюється вузлом АРП 10. В результаті на виході підсилювача 9 формується напруга з постійною амплітудою і змінною фазою, яка діє на перший вхід фазового детектора 11 як вимірювальний сигнал. На другий

вхід фазового детектора поступає опорний сигнал від генератора 1 через ланку затримки 12. З урахуванням фазових зсувів, які вносяться перетворювальними ланками схеми, різниця фаз вимірювального і опорного сигналів на входах фазового детектора 11 набуває такий вигляд:

$$\Delta\Phi_1 = \sqrt{\frac{\omega}{a}}\delta + \omega(\tau_1 + \tau_2 - \tau_3) = 2\pi m + \Delta\varphi_1 \quad (5)$$

де τ_3 – затримка опорного сигналу, яка вноситься ланкою затримки 12; $\Delta\varphi_1 = 2\pi r$ – дробна частина фазового циклу.

Затримку τ_3 опорного сигналу вибирають такою, щоб забезпечувалася симетрія вимірювального та опорного каналів:

$$\omega(\tau_1 + \tau_2 - \tau_3) = 0 \quad (6)$$

звідки $\tau_3 = \tau_1 + \tau_2$.

Фазовий детектор реагує на різницю фаз у межах $\pm\pi$ (180°), тобто тільки на дробну частину повної різниці фаз $\Delta\Phi$. Тому по вихідному вольтметру 13 фіксують напругу пропорційну дробній частині фазового циклу

$$\Delta\varphi_1 = \sqrt{\frac{\omega}{a}}\delta - 2\pi m \quad (7)$$

Настроюють частоту генератора 1 до значення, при якому вольтметр 13 дає нульовий показ, що означає

$$\sqrt{\frac{\omega_1}{a}}\delta - 2\pi m = 0 \quad (8)$$

де ω_1 – кутова частота, при якій виконується рівність (8). Вимірюють частотоміром 14 значення частоти $f_1 = 2\pi/\omega_1$, яке запам'ятовують.

Потім за допомогою ланки регульованої затримки 8 вводять у вимірювальний сигнал затримку τ_0 кратну його періоду

$$\tau_0 = \frac{1}{Kf_1} \quad (9)$$

де K – цілі числа ряду 1,2,3,4....

При дослідженні методу, вимірювання здійснювалися при частоті змінної напруги $f_1 = 250$ Гц, $K=4$, а часова затримка сигналу τ_0 складала $\tau_0 = 1$ мс.

Додатковий фазовий зсув від введеної затримки, наприклад при $K=4$, $\Delta\varphi_0 = \omega_1\tau_0 = \pi/2$, тобто 90° . Тому ціле число фазових циклів при введеній затримці τ_0 залишається незмінним, а повна різниця фаз приймає значення

$$\Delta\Phi_2 = \sqrt{\frac{\omega_1}{a}}\delta + \omega_1\tau_0 = 2\pi m + \Delta\varphi_2 \quad (10)$$

де $\Delta\varphi_2$ – друге значення дробної частини фазового циклу.

Далі зменшують частоту генератора 1 до значення, при якому вольтметр 13 знову дає нульовий показ. При цьому

$$\sqrt{\frac{\omega_2}{a}}\delta + \omega_2\tau_0 - 2\pi m = 0 \quad (11)$$

де ω_2 – друге значення кутової частоти, при якій виконується рівність (11).

Вимірюють частотоміром 14 друге значення частоти $f_2=2\pi/\omega_2$, яке також запам'ятовують. Прирівнюючи ліві частини виразів (8) і (11), отримують

$$\sqrt{\frac{\omega_1}{a}}\delta = \sqrt{\frac{\omega_2}{a}}\delta + \omega_2\tau_0 \quad (12)$$

Вирішуючи рівняння (12) відносно коефіцієнта теплопровідності, отримують

$$a = \frac{\omega_1 - 2\sqrt{\omega_1\omega_2} + \omega_2}{(\omega_2\tau_0)^2} \delta^2 \quad (13)$$

При дослідженні товстих матеріалів, або пакетів ($\delta > 5 \dots 10$ мм) частоти ω_1 і ω_2 близькі між собою. Тому можна рахувати, що $\sqrt{\omega_1\omega_2} \approx \omega_2$. Тоді коефіцієнт теплопровідності

$$a = \frac{\omega_1 - \omega_2}{(\omega_2\tau_0)^2} \delta^2 \quad (14)$$

Якщо перейти від кутової частоти ω до частоти $f=2\pi/\omega$, яку вимірює частотомір 14, то з врахуванням (9) будемо мати

$$a = (f_1 - f_2) \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 \frac{(K\delta)^2}{2\pi} \quad (15)$$

З отриманого виразу (15) видно, що коефіцієнт теплопровідності визначається двома близькими значеннями частоти електричних коливань генератора 1, а результат не залежить від співвідношення довжини температурної хвилі та товщини досліджуваного матеріалу або пакету матеріалів, що значно розширює можливості пропонуємого способу. На відміну від фазових вимірювань похибка вимірювання частоти електронними частотомірами дуже мала (соті і навіть тисячні долі відсотка). Тому точність визначення коефіцієнта теплопровідності у відповідності з методом і формулою (15) підвищується за рахунок усунення суттєвої похибки, обумовленої неконтрольованими фазовими зсувами вимірювального сигналу, а залишкова похибка результату вимірювання залежить в основному від похибки вимірювання товщини матеріалу ($\pm 1 \cdot 10^{-3}$ мм) і фіксації нагрівача та термоприймача на протилежних поверхнях досліджуваного зрізця на відстані дорівнюючій його товщині.

1. *Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры. Под ред. А. П. Достанко, Ш. М. Чабдарова – М. : Радио и связь, 1989, 623с.* 2. *Филиппов Л. П. Измерения теплофизических свойств веществ методом периодического нагрева. – М. : Энергоатомиздат, 1984, 325 с.* 3. *Патент РФ №1776350 Скрипник Ю. А., Химичева А. И., Глазков Л. А. Способ определения коэффициентов теплопроводности материалов и устройство для его осуществления, БИ №42, 1992.* 4. *Ю. О. Скрипник, Г. В. Юрчик, В. І. Водотоква. Частотний метод визначення коефіцієнта теплопровідності органічних і неорганічних матеріалів. Вісник НУ «Львівська політехніка», №432, 2001.- с.143-146.*