

ФОТОТЕПЛОВИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТОНКИХ ПЛІВОК

© Демкович І.В., Петровська Г.А., Бобицький Я.В., 2009

I.V. Demkovytsch, H.A. Petrovska, Ya.V. Bobitski

THE DETERMINATION PHOTOTHERMAL METHOD OF PARAMETERS THIN FILM

© Demkovytsch I.V., Petrovska H.A., Bobitski Ya.V., 2009

Розроблено фототепловий метод контролю параметрів тонкоплівкових покриттів, зокрема, поглинання, температуропровідності, товщини. Для реалізації методу розроблено математичну модель та програмне забезпечення, що дає змогу числовими методами розрахувати просторово-часовий розподіл температурних змін на поверхні досліджуваного зразка типу “підкладка-плівка” за опромінення його лазерним пучком з заданими енергетичними та просторово-часовими характеристиками. Проведено теоретичні дослідження, що дасть змогу встановити залежність теплового відгуку на поверхні зразка від параметрів покриття під час використання імпульсного збуджувального випромінювання.

The photothermal method of control of the thin-film coating parameters (absorption, thermal conductivity, thicknesses) is developed. The mathematical model and the developed software allow to determinate the spatial-temporal distribution of temperature changes on the surface of the investigated “substrate-film” sample caused by laser irradiation under given parameters of the laser beam. The theoretical investigations allow to determine the dependence of the thermal response on the surface of the sample from the parameters of coatings under heating by continuous and pulse exciting radiation.

Вступ

У багатьох областях промисловості необхідно контролювати параметри покриттів різного типу (наприклад, в автомобільній промисловості актуальним є контроль товщини лакофарбових та антикорозійних покриттів у процесі їх нанесення на метал). Для подібних задач методи контролю повинні бути неруйнівними та відрізнятися високою швидкістю. Сьогодні для безконтактного вимірювання товщини покриттів у промисловості широко використовуються методи, які ґрунтуються на реєстрації теплових хвиль, що виникають під дією імпульсного періодичного випромінювання лазера [1, 2]. Однак такі методи вимагають для вимірювання як мінімум кілька секунд, що ускладнює їх використання для контролю товщини покриттів на рухомих об'єктах.

У цій роботі досліджено можливість використання для вимірювання товщин покриттів швидкісного фототеплового методу, що ґрунтується на реєстрації фототеплового відгуку на поверхні досліджуваного зразка під час опромінення його коротким лазерним імпульсом. Точність вимірювань при цьому залежить як від методу реєстрації теплового відгуку, так і від математичного апарата для його інтерпретації.

**Математична модель та програмне забезпечення
для моделювання фотостимульованих температурних полів**

Для реалізації фототеплового методу контролю параметрів тонких плівок розроблено теорію поширення тепла у багат шарових системах, а також програмне забезпечення для розрахунку температурних полів (у просторі та часі), які виникають у багат шаровому зразку після опромінювання його лазерним імпульсом із заданими енергетичними та просторово-часовими параметрами випромінювання.

Для розрахунку температурного поля в досліджуваному зразку розглянемо крайову задачу:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(W_x) + \frac{\partial}{\partial y}(W_y) + \frac{\partial}{\partial z}(W_z) + q(x, y, z, t), \quad (1)$$

де c – теплоємність матеріалу зразка (Дж/г·К); ρ – густина (г/см³); t – час (с); $q(x, y, z, t)$ – густина енергії об'ємного теплового джерела; $W_x = I \frac{\partial T}{\partial x}$; $W_y = I \frac{\partial T}{\partial y}$; $W_z = I \frac{\partial T}{\partial z}$ – теплові потоки;

λ – коефіцієнт теплопровідності (Вт/см·К).

Рівняння (1) задовольняє початковій умові:

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \text{ в області } \bar{G}(0 \leq x \leq l_x, 0 \leq y \leq l_y, 0 \leq z \leq l_z) \quad (2)$$

і крайовим умовам:

$$\begin{aligned} + I \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0}^{x=l_x} &= +a_T (T - T_c) \\ + I \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0}^{y=l_y} &= +a_T (T - T_c) \\ - I \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} &= +a_T (T - T_c), \quad T(x, y, l, t) \Big|_{l=l_z} = T_c, \end{aligned} \quad (3)$$

де T_0 – початкова температура (К); T_c – температура навколишнього середовища (К); α_T – коефіцієнт тепловіддачі (Вт/см²).

Густина енергії об'ємного джерела енергії запишемо у вигляді [3]

$$\begin{aligned} q(x, y, z, t) &= (1 - R)I(t) \exp\left[\frac{(x - l_x/2)^2 + (y - l_y/2)^2}{r^2} \right] \times \\ &\times \left\{ a_S \cdot \exp\left[- \int_{l_C}^{l_Z} a_S(x) dx \right] + a_C \cdot \exp\left[- \int_0^{l_C} a_C(x) dx \right] \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

де $R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}$ – коефіцієнт відбивання від поверхні зразка; n – показник заломлення матеріалу плівки на довжині хвилі потужного лазера; $I(t)$ – часова залежність густини потужності лазерного випромінювання; r – радіус лазерного пучка (см); α_c – коефіцієнт поглинання матеріалу покриття (см⁻¹); α_s – коефіцієнт поглинання матеріалу підкладки (см⁻¹); l_c – товщина покриття; ξ – змінна інтегрування.

Крайову задачу (1)-(3) розв'язуємо різницевиими методами [3]. В описаній області \bar{G} будемо сітку:

$$\bar{w}_{h_1 h_2 h_3} \times \bar{w}_t = \left\{ \begin{aligned} &(x_i = ih_1, y_j = jh_2, z_k = kh_3, i = 0 \dots N_1, j = 0 \dots N_2, k = 0 \dots N_3), \\ &(t_l = lt, l = 0 \dots N_4), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де h_1, h_2, h_3 – відповідно кроки по координатах x, y, z ; t – крок за часом t .

Запишемо рівняння балансу тепла для елементарного об'єму:

$$V_{i,j,k}^l = \left\{ x_{i-\frac{1}{2}} \leq x \leq x_{i+\frac{1}{2}}, y_{j-\frac{1}{2}} \leq y \leq y_{j+\frac{1}{2}}, z_{k-\frac{1}{2}} \leq z \leq z_{k+\frac{1}{2}}, t_l < t < t_{l+1} \right\}. \quad (6)$$

В результаті інтегрування рівняння (1) по $dx dy dz dt$ отримаємо:

$$\begin{aligned} cr(T_{i,j,k}^{l+1} - T_{i,j,k}^l)h_1h_2h_3 = & \\ = \left[s \left(W_{i+\frac{1}{2},j,k}^{l+1} - W_{i-\frac{1}{2},j,k}^{l+1} \right) + (1-s) \left(W_{i+\frac{1}{2},j,k}^l - W_{i-\frac{1}{2},j,k}^l \right) \right] h_2h_3t + & \\ + \left[s \left(W_{i,j+\frac{1}{2},k}^{l+1} - W_{i,j-\frac{1}{2},k}^{l+1} \right) + (1-s) \left(W_{i,j+\frac{1}{2},k}^l - W_{i,j-\frac{1}{2},k}^l \right) \right] h_1h_3t + & \\ + \left[s \left(W_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{l+1} - W_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{l+1} \right) + (1-s) \left(W_{i,j,k+\frac{1}{2}}^l - W_{i,j,k-\frac{1}{2}}^l \right) \right] h_1h_2t + & \\ + q_{i,j,k}^l h_1h_2h_3t, & \end{aligned} \quad (7)$$

де σ – вага верхнього шару $t=t^{l+1}$.

Розрахунок проводимо за неявною схемою ($\sigma=1$). Враховуючи, що

$$\begin{aligned} W_{i+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{h_1}(T_{i+1} - T_i); & W_{i-\frac{1}{2}} &= \frac{1}{h_1}(T_i - T_{i-1}); \\ W_{j+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{h_2}(T_{j+1} - T_j); & W_{j-\frac{1}{2}} &= -\frac{1}{h_2}(T_j - T_{j-1}); \\ W_{k+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{h_3}(T_{k+1} - T_k); & W_{k-\frac{1}{2}} &= \frac{1}{h_3}(T_k - T_{k-1}), \end{aligned} \quad (8)$$

отримаємо різницеве рівняння:

$$\begin{aligned} \frac{T_{i,j,k}^{l+1} - T_{i,j,k}^l}{t} = \frac{1}{cr} \frac{T_{i+1,j,k}^{l+1} - 2T_{i,j,k}^{l+1} + T_{i-1,j,k}^{l+1}}{h_1^2} + \frac{1}{cr} \frac{T_{i,j+1,k}^{l+1} - 2T_{i,j,k}^{l+1} + T_{i,j-1,k}^{l+1}}{h_2^2} + & \\ + \frac{1}{cr} \frac{T_{i,j,k+1}^{l+1} - 2T_{i,j,k}^{l+1} + T_{i,j,k-1}^{l+1}}{h_3^2} + \frac{1}{cr} q_{i,j,k}^l. & \end{aligned} \quad (9)$$

Для розв'язання різницевого рівняння в області \bar{G} використовуємо локально-одновимірний метод. Шукаємо наближений розв'язок рівняння (9), розв'язуючи послідовно по x, y, z одновимірні рівняння теплопровідності.

Кожне з одновимірних рівнянь доповнюється двома крайовими умовами з (8) у вигляді їх апроксимації і початковою умовою. Отримаємо три крайові задачі на часовому інтервалі $t_l \leq t \leq t_{l+1}$. До кожної з одновимірних крайових задач застосовуємо метод прогону з ітераційним уточненням:

$$\frac{S_{i+1,j,k}^{l+\frac{1}{3}}}{T_{i,j,k}} = a_{i+1,j,k} \cdot \frac{S_{i+1,j,k}^{l+\frac{1}{3}}}{T_{i+1,j,k}} + b_{i+1,j,k}, \quad (10)$$

де $a_{i+1,j,k}$ $b_{i+1,j,k}$ – прогоночні коефіцієнти; s – кількість ітерацій;

$$1 \leq i \leq N_1 - 1; \quad 1 \leq j \leq N_2 - 1; \quad 1 \leq k \leq N_3 - 1.$$

Form1

Розрахувати

Параметри тіла

	Покриття	Підкладка
Коефіцієнт поглинання, 1/см	10	5000
Густина, г/см ³	3	7.8
Теплоємність, Дж/(г·К)	0.8	0.465
Теплопровідність, Вт/(К·см)	0.14	0.3
Товщина покриття, см		0.0005
Максимальна густина енергії, Дж/см ²		2
Тривалість імпульсу, мкс		1
Тривалість процесу, мкс		10

Рис. 1. Інтерфейс програми для розрахунку температури на поверхні зразка “підкладка-покриття”

Умовою закінчення ітерацій є:

$$\left| \frac{S_{i+1}}{T_{i,j,k}} - \frac{S}{T_{i,j,k}} \right| < \varepsilon, \text{ де } \varepsilon \approx 10^{-2} \div 10^{-3}$$
 –
 точність визначення температури у заданих точках.

У результаті розв’язання системи рівнянь отримаємо розподіл температури на поверхні зразка у фіксовані моменти часу.

Цю математичну модель покладено в основу програмного забезпечення для моделювання температурних полів в часі на поверхні зразка «підкладка-плівка» після дії на нього одиночного лазерного імпульсу з заданими тривалістю та енергією. На рис. 1 показано інтерфейс розробленої програми.

Теоретична оцінка можливості методу

За допомогою розробленого програмного забезпечення проведено теоретичні дослідження з метою оцінки можливостей застосування для вимірювання товщин

покриттів фототеплового методу під час використання одиночних лазерних імпульсів. На рис. 2 показано результати розрахунків часових змін температури на поверхні зразка “метал-плівка” після дії на нього короткого лазерного імпульсу.

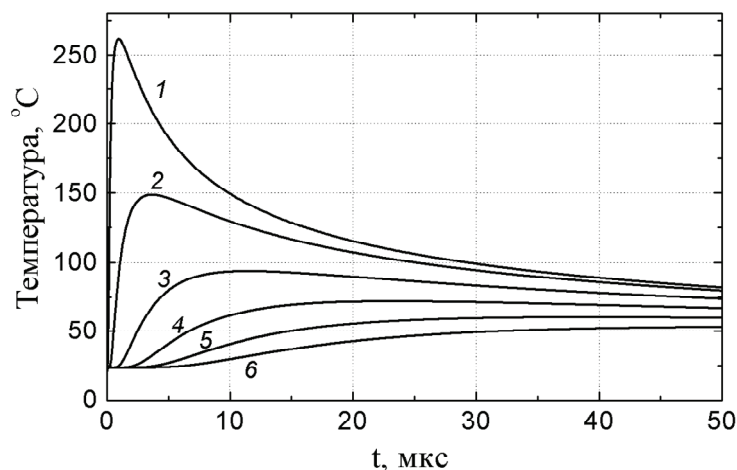


Рис. 2. Часові зміни температури на поверхні зразка “плівка-метал” після дії імпульсу тривалістю 0,5 мкс та густиною енергії лазерного випромінювання 1 Дж/см² за різних товщин покриття: 1 – 2 мкм; 2 – 5 мкм; 3 – 10 мкм; 4 – 15 мкм; 5 – 20 мкм; 6 – 25 мкм

Як підкладка тут розглядається сталь (густина $\rho=7.8$ г/см³, теплоємність $c=0.465$ Дж/(г·К), теплопровідність $\lambda=0.47$ Вт/(К·см), коефіцієнт поглинання $\alpha=5000$ см⁻¹). На сталеву підкладку нанесено лакофарбове покриття певної товщини (густина $\rho=3$ г/см³, теплоємність $c=0.8$ Дж/(г·К), теплопровідність $\lambda=0.14$ Вт/(К·см), коефіцієнт поглинання $\alpha=100$ см⁻¹). Розрахунки проведені для коротких лазерних імпульсів тривалістю 0,5 мкс за густини енергії лазерного випромінювання – 1 Дж/см².

Результати теоретичних досліджень свідчать про те, що зміна температури на поверхні структури “метал-плівка” у часі після дії короткого лазерного імпульсу залежить як від

теплофізичних характеристик матеріалів підкладки і покриття, так і від товщини покриття. На рис. 3 показано залежність часової затримки температурного максимуму на поверхні зразка «плівка-метал» за дії імпульсу тривалістю 0,5 мкс для описаної структури залежно від товщини покриття.

Однак слід зазначити, що температурні відгуки на поверхні досліджуваних зразків характеризуються чіткими максимумами лише у тому випадку, коли теплофізичні характеристики матеріалів підкладки та покриття істотно відрізняються. Зокрема, це стосується зразків «металева підкладка – діелектричне покриття», що існує у випадку лакофарбового покриття на металі. Окрім того, як зрозуміло з рис. 2, за збільшення товщини покриття часові розподіли температури на поверхні стають згладженішими, що обмежує діапазон вимірювальних товщин. Розрахунки температурних відгуків в часі за різних параметрів збуджувального імпульсу показали також, що температурні криві мають чіткіший характер за малих тривалостей збуджувального імпульсу.

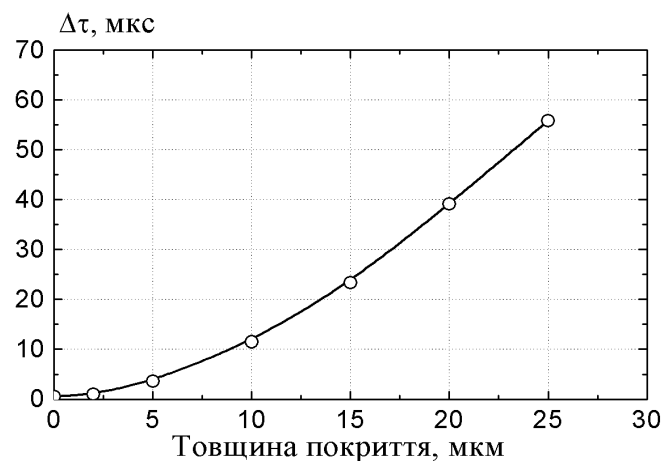


Рис. 3. Часова затримка температурного максимуму на поверхні зразка «плівка-метал» за дії імпульсу тривалістю 0,5 мкс та густини енергії лазерного випромінювання 1 Дж/см^2 залежно від товщини покриття

Отже, за відомих теплофізичних характеристик матеріалів підкладки та покриття за умови, що вони істотно відрізняються, за експериментально зареєстрованою часовою зміною температури на поверхні зразка можна визначити товщину покриття. Зокрема, інформативним параметром може бути часове зміщення температурного максимуму на поверхні досліджуваного зразка стосовно збуджувального імпульсу, оскільки така залежність для пари матеріалів з відомими характеристиками і заданими параметрами імпульсу є однозначною.

Однак потрібно зазначити, що для практичної реалізації методу необхідно застосувати такі методи реєстрації теплового відгуку, що дасть змогу з високою точністю синхронно реєструвати збуджувальний імпульс та імпульс теплового відгуку.

Висновки

Отже, теоретичні дослідження показали, що для вимірювання товщини покриття можна використати швидкісний фототепловий метод, що ґрунтується на реєстрації фототеплового відгуку на поверхні досліджуваного зразка під час опромінення його коротким лазерним імпульсом.

Реалізація такого методу можлива для зразків, коли теплофізичні характеристики матеріалів підкладки та покриття істотно відрізняються. Зокрема, такий метод може бути актуальним в автомобільній промисловості для контролю товщини лакофарбових та антикорозійних покриттів у процесі їх нанесення на метал.

1. Gusev V., Carabutov A. *Lazer optoacoustic.* – Moscow: Science, 1991. 2. Lapshin S., Petrovskiy A., Zuyev V., Kiryuhin A., Labuzov D. *Investigating of sample with thin-film by photothermal reflection method with harmonic excitation using heterodyning excited and testing irradiation. Letter in JTPh.* – 2000. – Vol. 26, No 2. – P. 35–40. 3. Реди Дж., *Действие мощного лазерного излучения.* – М.: Мир, 1974. – 468 с. 4. Самарский А.А. *Теория разностных схем.* – М.: Наука, 1989. – 616 с.

УДК 621.384: 621.385:621.365:616.31:537.8

І.Р. Дідич, А.М. Зазуляк, О.Т. Кожухар, М.С. Скіра
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електронних приладів

ОПТОЕЛЕКТРОННИЙ КОНТРОЛЬ ФОТОФЕРЕЗУ

© Дідич І.Р., Зазуляк А.М., Кожухар О.Т., Скіра М.С., 2009

I. Didych, A.Zazuljak, A. Kozhukhar, M. Skira

OPTOELECTRONIC CONTROL OF PHOTOPHERESIS

© Didych I., Zazuljak A., Kozhukhar A., Skira M., 2009

За експериментально виявленими змінами оптичних показників крові після її опромінення лікувальним фотоферезом запропоновано його контроль на основі двох оптоелектронних елементів із різнокольоровими світлодіодами та спільним фотоприймачем, розташованими на вході і виході апарата фотофереза. Якщо різниця між фотострумами елементів відповідає виявленим змінам, фотоферез є успішним.

After experimentally found out the changes of optical indexes of blood after its irradiation medical photospheres his control is offered on the basis of two optronic elements with varicolored light-emitting diodes and general photoresiver, located on an entrance and output of vehicle of photoresiver. If a difference between the photoelectrics of elements answers found out changes, photospheres is successful.

Вступ

Фотоферез – це лікувальна фотомедична технологія, яку широко застосовують для лікування Т-клітинної лімфоми шкіри та псоріазу. У відібрану пробу крові вводять хімічно нейтральну неактивну речовину – 8-метоксипсорален і опромінують пробу ультрафіолетовим випромінюванням області А (УФА). Унаслідок цього ця речовина стає хімічно активною і тому здатною створювати ковалентні зв'язки ДНК, блокуючи реплікацію клітин псоралену, характерних для вищезгаданих хвороб. Разом з тим зазначене опромінення викликає деформацію рецепторів на мембранах клітин псоралену [1].

Процеси і зміни біологічних властивостей крові внаслідок фотоферезу супроводжуються змінами їх електрофізичних, зокрема, оптичних характеристик [2]. Так, зокрема, під дією УФА гемоглобін крові частково переходить у білок, що може змінити її спектральні характеристики [3], зокрема, в характерній для білка оранжево-червоній області, а також викликати додаткове розсіяння, здатне зменшити світлопопускання.

Існують методи і засоби для вимірювання прозорості та спектра крові [4], які застосовують для визначення вмісту складових крові, наприклад, гемоглобіну, кисню та інших складових. Проте розрахункових чи експериментальних робіт з досліджень змін оптичних характеристик крові внаслідок дії гематологічного фотоферезу явно недостатньо. Це до певної міри є причиною