

УДК 534.14:535

АНАЛІЗ СУКУПНОГО ВПЛИВУ ТЕПЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ШАРУ НА ФТА СИГНАЛ

Богданов О.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

У статті розглянуто залежність амплітуди та фази стаціонарного пружного коливання, які виникають у тонкому тришаровому пакеті, від зміни двох теплових характеристик внутрішнього шару. Проведено аналіз впливу на амплітуду та фазу пружних коливань сукупної зміни коефіцієнтів теплопровідності та температуропровідності. Зовнішні шари пакету виконані з однакового матеріалу. Постановка задачі виконана в рамках теорії незв'язаної термопружності.

Ключові слова: тришаровий пакет, фототермоакустичне (ФТА) перетворення, пружні коливання, модуль пружності (Юнга).

Вступ. В роботах [1] та [2] розглянуті гіпотетичні ситуації впливу на ФТА сигнал зміни лише коефіцієнту теплопровідності або лише коефіцієнта температуропровідності. Однак всі розуміють, що такого окремого випадку ніколи не буде. Особливо, враховуючи той факт, що коефіцієнт температуропровідності напряму залежить від теплопровідності матеріалу:

$$\chi = \frac{\kappa}{c_p \rho},$$

де χ – коефіцієнт температуропровідності, κ – коефіцієнт теплопровідності, c_p – ізобарна теплоємність матеріалу, ρ – густина матеріалу.

Враховуючи цю відому залежність, можна зробити висновок, що зміна коефіцієнта теплопровідності напряму змінює коефіцієнт температуропровідності. Отже, метою запропонованої статті є аналіз впливу сукупної зміни згаданих коефіцієнтів на ФТА сигнал.

Постановка задачі. Загальна постановка задачі вже наводилася [3], проте, для більш повного розуміння матеріалу, нагадаємо її. Розглядається пружний тришаровий пакет (рис. 1) на який діє амплітудо-модульований оптичний (лазерний) потік. Шари 1 та 3 представляють один той самий матеріал, а шар 2 – будемо вважати «дефектним», відмінність якого (від шарів 1 та 3) полягає у відмінності оптичного коефіцієнта поглинання.

В результаті поглинання лазерного випромінювання в матеріалі об'єкта дослідження виникає неоднорідне теплове розширення шарів. Це теплове розширення, в свою чергу, викликає

збудження в середовищі пружних коливань. Падіння лазерного потоку вважалось нормальним до границі розподілу повітря – пакет. Випромінювання було модульоване по інтенсивності

$$I = I_0 (1 + m \cos \omega t), \quad \omega = 2\pi f,$$

де m – коефіцієнт амплітудної модуляції (дорівнює 1), f – частота амплітудної модуляції.

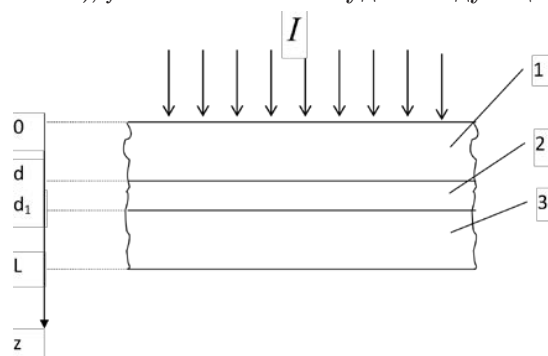


Рис. 1. Модель об'єкта дослідження

В випадку генерації акустичних хвиль в тришаровому пакеті, 1 та 3 шари (рис. 1) контактують з повітрям, передбачається що немає відтоку тепла з поверхонь зазначених шарів, а теплообмін протікає лише між шарами пакету, причому при переході тепла з одного шару в інший немає стрибків температури. Також було прийнято, що процес, який збуджується, змінюється в часі по гармонійному закону, а при його описі виправдано використання рівнянь теорії незв'язаної термопружності. [4, 5]

Підсумовуючи усе раніш сказане, запишемо математичні рівняння, які описують процеси в пакеті, а також крайові умови для кожної з границь. При зроблених допущеннях вихідна система включає в себе рівняння незв'язаної теплопровідності та рівняння руху кожного з пружних шарів ($j = 1-3$)

$$\frac{\partial^2 \theta_j}{\partial z^2} - \frac{1}{\chi_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial t} = -\frac{\beta_j G_j}{2\kappa_j} I_0 \exp(i\omega t - \beta_j z), \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 u_j}{\partial z^2} - \frac{1}{v_j^2} \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} = \eta_j \alpha_j \frac{\partial \theta_j}{\partial z} \quad (2)$$

$$\sigma_j = C_j^T \frac{\partial u_j}{\partial z} - \alpha_j B_j^* \theta_j \quad (3)$$

В приведених диференціальних рівняннях прийняті наступні позначення: θ_j – різниця між температурою речовини в збудженому стані та температурою в стані спокою; χ_j , κ_j , β_j – коефіцієнти теплопровідності, теплопровідності та оптичного поглинання, відповідно; $G_1=1$, $G_2 = \exp(-[\beta_1 - \beta_2]d)$, $G_3 = \exp(-[\beta_1 - \beta_2]d - [\beta_2 - \beta_3]d_1)$ – коефіцієнти для вирівнювання температурного поля (щоб на границях не було стрибків температури); $\omega = 2\pi f$; u – виникаючи в шарі переміщення; $v_j = \sqrt{\frac{\lambda_j + 2\mu_j}{\rho_j}}$ – швидкість розповсюдження пружних поздовжніх хвиль (λ_j та μ_j – коефіцієнти Ламе, ρ_j – густина шару); α_j – коефіцієнти лінійного теплового розширення матеріалу; $\eta_j = \frac{B_j^*}{C_j^T}$, $B_j^* = 3\lambda_j + 2\mu_j$, $C_j^T = \lambda_j + 2\mu_j$.

Крайові умови запишуться в наступному вигляді:

на границі $z = 0$

$$\kappa_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial z} = 0, \quad \sigma_1 = 0. \quad (4)$$

на границі $z = d$

$$\theta_1 = \theta_2, \quad \kappa_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial z} = \kappa_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial z}, \quad (5)$$

$$u_1 = u_2, \quad \sigma_1 = \sigma_2.$$

на границі $z = d_1$

$$\theta_2 = \theta_3, \quad \kappa_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial z} = \kappa_3 \frac{\partial \theta_3}{\partial z}, \quad (6)$$

$$u_2 = u_3, \quad \sigma_2 = \sigma_3.$$

на границі $z = L$

$$\kappa_3 \frac{\partial \theta_3}{\partial z} = 0, \quad \sigma_3 = 0. \quad (7)$$

Розв'язок задачі. Характер динамічного процесу змінюється в часі за гармонійним законом. Враховуючи те, що лазерне випромінювання генерує в середовищі пружні хвилі з частотою, рівною частоті амплітудної модуляції випромінювання [3], будемо шукати рішення у вигляді:

$$\theta(z,t) = \Theta(z) \cdot e^{i\omega t}, \quad (8)$$

$$u(z,t) = U(z) \cdot e^{i\omega t}.$$

Розв'язуючи диференціальні рівняння (1), з урахуванням крайових умов (4) – (7), отримаємо наступні розв'язки для температурного поля в тришаровому пакеті

$$\Theta_j = \left(\begin{array}{l} C_{4j-3} \cdot \exp[-p_{1j} z] + \\ + C_{4j-2} \cdot \exp[p_{1j} z] \end{array} \right) + \quad (9)$$

$$+ S_{1j} \cdot \exp[-\beta_j z],$$

де $C_1 - C_{14}$ постійні інтегрування, $p_{1j} = \sqrt{\frac{\omega}{2\chi_j}}(1+i)$, $S_{1j} = \frac{\beta_j G_j I_0}{2\kappa_j(p_{1j}^2 - \beta_j^2)}$. Підставляючи (9) в рівняння (2)

знаходимо розв'язок для переміщень пружного тришарового пакету:

$$U_j = \left(\begin{array}{l} -C_{4j-3} \cdot \exp[-p_{1j} z] + \\ + C_{4j-2} \cdot \exp[p_{1j} z] \end{array} \right) \cdot M_{1j} + \quad (10)$$

$$+ \left(\begin{array}{l} C_{4j-1} \cdot \exp[-p_{2j} z] + \\ + C_{4j} \cdot \exp[p_{2j} z] \end{array} \right) -$$

$$- S_{2j} \cdot \exp[-\beta_j z],$$

де $M_{1j} = \frac{\alpha_j \eta_j \cdot p_{1j}}{p_{1j}^2 - \beta_j^2}$, $p_{2j} = \frac{i\omega}{v_j}$, $S_{2j} = \frac{\alpha_j \beta_j \eta_j \cdot S_{1j}}{\beta_j^2 - p_{2j}^2}$. Використовуючи отримані результати (9) та (10) знайдемо формули які описують теплові потоки та механічні напруги в шарах тришарового пружного пакету, підставляючи (9) та (10) в (3):

$$\kappa_j \frac{\partial \Theta_j}{\partial z} = \left(\begin{array}{l} -C_{4j-3} \cdot \exp[-p_{1j} z] + \\ + C_{4j-2} \cdot \exp[p_{1j} z] \end{array} \right) \cdot M_{2j} -$$

$$- S_{3j} \cdot \exp[-\beta_j z],$$

$$\sigma_j^\omega = \left(\begin{array}{l} C_{4j-3} \cdot \exp[-p_{1j} z] + \\ + C_{4j-2} \cdot \exp[p_{1j} z] \end{array} \right) \cdot M_{3j} -$$

$$- \left(\begin{array}{l} C_{4j-1} \cdot \exp[-p_{2j} z] - \\ - C_{4j} \cdot \exp[p_{2j} z] \end{array} \right) \cdot M_{4j} +$$

$$+ S_{4j} \cdot \exp[-\beta_j z],$$

де $M_{2j} = \kappa_j \cdot p_{1j}$, $S_{3j} = \beta_j \kappa_j \cdot S_{1j}$, $M_{3j} = -\alpha_j B_j^* \frac{p_{2j}^2}{p_{2j}^2 - p_{1j}^2}$, $M_{4j} = C_j^T \cdot p_{2j}$, $S_{4j} = \frac{\alpha_j B_j^* p_{2j}^2}{p_{2j}^2 - \beta_j^2} \cdot S_{1j}$. [4]

Чисельні дослідження. Фізичні властивості шарів 1 та 3 (рис. 1) обираємо рівними властивостям кремнію, оскільки саме цей матеріал є базовим для побудови сучасних мікросхем: $\alpha = 2,33 \cdot 10^{-6}$ м/град, $\kappa = 156$ Вт/м, $\beta = 1,2 \cdot 10^6$ м⁻¹, $\chi = 8,8 \cdot 10^{-5}$ град/с, $v = 8,43 \cdot 10^3$ м/с, $E = 10^{11}$ Па, $\nu = 0,27$ [6]. Для математичного моделювання було обрано випадок, коли коефіцієнт теплопровідності (а отже і коефіцієнт температуропровідності) другого шару може відрізнятись на порядок, як в меншу сторону, так і в більшу сторону

Результати чисельного дослідження для амплітудної модуляції оптичного випромінювання з частотами 100 Гц та 500 Гц представлені на рис. 2; на рис. 3 частоти амплітудної модуляції становили 1 кГц та 5 кГц.

З наведених кривих на рис. 2 бачимо, що характер залежності пружних коливань містить в собі особливість в області 800 Гц, яка привнесена саме коефіцієнтом температуропровідності [1]. З іншого боку, в області НЧ головну роль відіграє саме коефіцієнт теплопровідності [2].

З іншого боку фаза пружних коливань змінюється однозначно так само, як у випадку [1], вплив коефіцієнта теплопровідності, в даному випадку, не суттєвий

Розглянемо більш детально криві на рис. 3 – характер залежності амплітуди наближається до результатів, отриманих в роботі [2]. На противагу фазова складова, більш чутлива до зміни коефіцієнта температуропровідності [1].

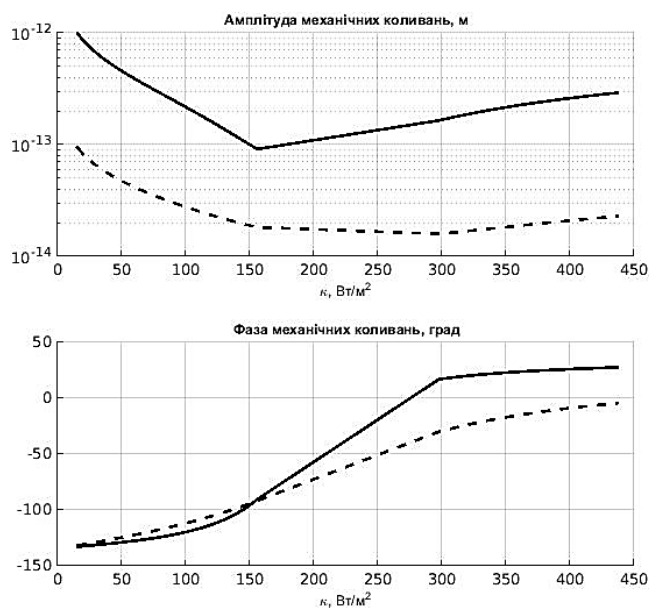


Рис. 2. Зміна амплітуди та фази механічних коливань «тіньової» поверхні тришарового пакета при частотах амплітудної модуляції оптичного випромінювання «-» – 100 Гц та «- -» – 500 Гц

Висновки. У статті розглянуто залежність амплітуди та фази пружних коливань від зміни двох теплових характеристик внутрішнього шару. В результаті чисельного моделювання було виявлено, що області НЧ амплітуда пружних коливань реагує на зміну обох параметрів, а в області ВЧ вона стає більш

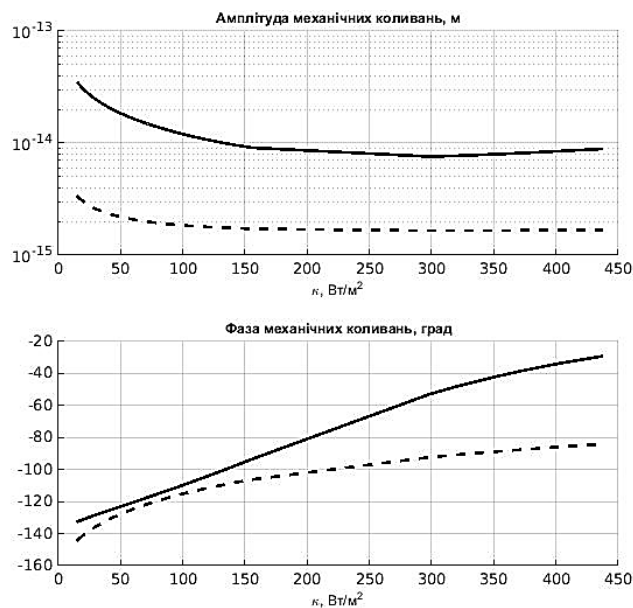


Рис. 3. Зміна амплітуди та фази механічних коливань «тіньової» поверхні тришарового пакета при частотах амплітудної модуляції оптичного випромінювання «-» – 1 кГц та «- -» – 5 кГц

«чуттєвою» лише до зміни коефіцієнта теплопровідності.

Що стосується фази пружних коливань, то вона краще відображає зміну коефіцієнта теплопровідності. Таким чином, загальний сигнал несе в собі інформацію про зміну двох теплових характеристик внутрішнього шару.

Список літератури:

1. Богданов О. В. Залежність пружних коливань пакету від коефіцієнту температуропровідності внутрішнього шару при ФТА перетворенні // Електроніка та зв'язок – 2015 г. – Том 20, № 1 (84). – с. 73-77.
2. Богданов О. В. Залежність пружних коливань пакету від коефіцієнту теплопровідності внутрішнього шару при ФТА перетворенні // Системи обробки інформації – 2015 г. – Випуск 7. – с. 18-22.
3. Бабаев А. Э. Термооптическое возбуждение четырехслойного пакета, содержащего электроупругий элемент / Бабаев А. Э., Савин В. Г., Богданов А. В. Сотников А. В. // Электроника и связь. – 2002. – № 15. – с. 20-24.
4. Гузь А. Н. Дифракция упругих волн в многосвязных телах. / Гузь А. Н., Головач В. Т. – К.: Наукова думка, 1972. – 254 с.
5. Коваленко А. Д. Термоупругость. – К.: Вища школа, 1975. – 216 с.
6. Кикоин И. К. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. акад. И. К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
7. Лямшев Л. М. Лазерное термооптическое возбуждение звука / Отв. ред. В. И. Ильичев; АН СССР, Акустический институт им. Н. Н. Андреева – М.: Наука, 1989. – 237 с.

Богданов А.В.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»

АНАЛИЗ СОВОКУПНОГО ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ СЛОЯ НА ФТА СИГНАЛ

Аннотация

В статье рассмотрены зависимость амплитуды и фазы стационарного упругого колебания, которые возникают в тонком трехслойном пакете, от изменения двух тепловых характеристик внутреннего слоя. Проведен анализ влияния на амплитуду и фазу упругие колебания совокупной изменения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности. Внешние слои пакета выполнены из одинакового материала. Постановка задачи выполнена в рамках теории несвязанной термоупругости.

Ключевые слова: трехслойный пакет, фототермоакустичне (ФТА) преобразование, упругие колебания, модуль упругости (Юнга).

Bogdanov O.V.

National Technical University of Ukraine
«Kyiv Polytechnic Institute»

ANALYSIS OF TOTAL INFLUENCE OF HEAT PARAMETERS OF LAYER ON PTA SIGNAL

Summary

In the article the dependence of the amplitude and phase of steady elastic vibrations that occur in a thin three-layer package of changes to the two thermal characteristics of the inner layer. Carried out analysis of the amplitude and phase of elastic vibrations total change of thermal conductivity and thermal diffusivity. Package outer layers are made of the same material. Problem done in the framework of unbound thermoelasticity.

Keywords: Three-layer package PTA conversion, elastic vibrations, elastic modulus (Young's).