

Nghiên cứu và ứng dụng giao thoa kế điều biến tần số đo biến dạng của hợp kim nhôm khi nhiệt độ thay đổi trong khí tài quang học

Hoàng Anh Tú, Vũ Thanh Tùng*, Phạm Đức Tuấn, Lê Văn Văn

Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội, 1 Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam.

*Email: tung.vuthanh@hust.edu.vn

Nhận bài: 16/3/2024; Hoàn thiện: 02/4/2024; Chấp nhận đăng: 24/4/2024; Xuất bản: 25/6/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.96.2024.124-130>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày cơ sở lý thuyết và ứng dụng một phương pháp mới đo biến dạng của hợp kim nhôm theo sự thay đổi của nhiệt độ sử dụng giao thoa kế điều biến tần số. Hợp kim nhôm là thành phần quan trọng, thường sử dụng trong chế tạo, gá lắp các thấu kính trong các khí tài quang học. Khi nhiệt độ thay đổi dẫn đến độ dày, kích thước dọc trục cũng thay đổi theo hệ số giãn nở nhiệt của vật liệu, gây ra lượng defocus và giảm chất lượng tạo ảnh của khí tài quang học. Chúng ta sẽ gặp khó khăn khi tính toán lượng thay đổi của vật liệu theo hệ số giãn nở nhiệt nếu không biết vật liệu sử dụng. Vì vậy, cần có phương pháp đo kiểm thực tế giá trị thay đổi theo nhiệt độ của vật liệu để có giải pháp bù nhiệt ngay từ khâu thiết kế. Giao thoa kế điều biến tần số đề xuất dưới đây có kết cấu đơn giản, kỹ thuật xử lý tín hiệu mới có thể đo biến dạng nhỏ của hợp kim nhôm theo nhiệt độ với độ chính xác cao.

Từ khóa: Giao thoa kế điều biến tần số; Biến dạng vật liệu; Hợp kim nhôm.

1. MỞ ĐẦU

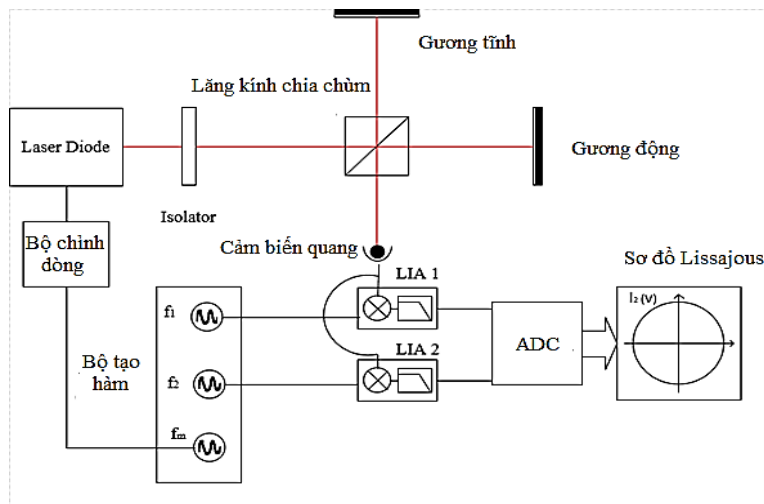
Khí tài quang học thuộc lĩnh vực quang điện tử có độ chính xác cao rất nhạy với sự thay đổi của môi trường, vì vậy, yêu cầu đo kiểm, đánh giá ảnh hưởng kết cấu vật liệu theo nhiệt độ để có giải pháp thiết kế sản phẩm là cần thiết. Các vật liệu thường dùng để chế tạo khí tài quang học có hệ số giãn nở nhiệt khá lớn, rất nhạy với nhiệt độ [1]. Nếu cho rằng, trong lòng từng chi tiết nói riêng và toàn bộ khí tài quang học nói chung không xuất hiện gradien nhiệt (nhiệt độ của tất cả các điểm trong khí tài quang học tại một thời điểm là như nhau) thì khi nhiệt độ tăng lên kích thước của vật liệu, chiều dài hệ quang cũng thay đổi,... dẫn đến thay đổi tiêu cự hệ quang và gây ra lượng defocus làm giảm chất lượng tạo ảnh [2]. Ảnh hưởng của nhiệt độ với các thấu kính quang học đã có nghiên cứu [3], với vật liệu cơ khí có thể tính toán thông qua hệ số giãn nở nhiệt khi biết chính xác vật liệu sử dụng. Tuy nhiên, không phải lúc nào cũng biết được chính xác thành phần hợp kim và tính toán được lượng thay đổi theo nhiệt độ. Mặt khác, giá trị thay đổi này thường rất nhỏ mắt thường không thể nhận biết, cần có phương pháp phù hợp để định lượng chúng.

Các phương pháp phổ biến đo dịch chuyển nhỏ với độ chính xác cao đến micromet thường sử dụng là các loại giao thoa kế. Trong khi giao thoa kế 1 tần số [4] yêu cầu độ ổn định cường độ cao đối với nguồn laser và môi trường, giao thoa kế 2 tần số [5] yêu cầu đặc biệt về nguồn laser và kết cấu phức tạp thì giao thoa kế điều biến tần số đề xuất trong bài báo [6] với kết cấu và kỹ thuật xử lý tín hiệu đơn giản cho kết quả đo có độ chính xác cao, phạm vi đo rộng. Tín hiệu giao thoa thu được sau khi điều biến là hàm liên tục theo thời gian, là những chuỗi hàm điều hòa của tần số điều biến, dịch pha gây ra bởi sự thay đổi chiều dài của hợp kim nhôm khi nhiệt độ thay đổi sẽ được trích xuất từ tín hiệu giao thoa một cách chính xác bằng việc sử dụng bộ khuếch đại lock-in amplifiers (LIA) [7], từ đó tính toán lượng thay đổi ΔL .

Khi nhiệt độ thay đổi, có rất nhiều các thay đổi khác nhau ảnh hưởng đến kết cấu khí tài quang học. Tuy nhiên, kích thước dọc trục thay đổi ảnh hưởng nhiều nhất đến chất lượng tạo ảnh của hệ quang học, vì vậy bài báo chỉ tập trung đo kiểm thay đổi này sử dụng mô hình giao thoa kế điều biến tần số.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT CỦA GIAO THOA KẾ ĐIỀU BIẾN TẦN SỐ

Sơ đồ nguyên lý của giao thoa kế điều biến tần số khá đơn giản, được xây dựng trên sơ đồ giao thoa kế Michelson:



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý giao thoa kế điều biến tần số.

Bao gồm thành phần chính: 1 nguồn laser, 1 lăng kính chia chùm, 2 nhánh gương: 1 gương tĩnh (nhánh tham chiếu) và 1 gương động (nhánh đo đặc trưng cho đối tượng đo), cảm biến quang (Photodetector) thu lấy tín hiệu giao thoa. Tia laser phát ra từ nguồn đi qua lăng kính chia chùm (Beam Splitter) sẽ được tách ra thành 2 chùm sáng (2 sóng kết hợp) một chùm hướng tới gương tĩnh sau đó phản xạ lại và giao thoa với chùm sáng quay về từ gương động tại lăng kính chia chùm.

Trong đó: LIA1, LIA2 là các bộ khuếch đại Lock-in amplifier; ADC máy tính xử lý (chuyển tín hiệu tương tự sang số để xử lý trên máy tính bằng công cụ lập trình); f_1, f_2, f_m là các hàm chuẩn thêm vào (có thể cài được tần số). Tần số điều biến có dạng [8]:

$$f = f_0 + \Delta f \times \sin 2\pi f_m t \quad (1)$$

Trong đó, f là tần số tức thời, f_0 là tần số sóng mang, Δf là biên độ điều chế và f_m là tần số điều chế. Do vậy, cường độ tín hiệu giao thoa thu được tại cảm biến quang được biểu diễn:

$$\begin{aligned} I &= \langle |E_r(r, t) + E_m(r, t)|^2 \rangle \\ &= \langle E_r(r, t) + E_m(r, t) \rangle \times \langle E_r^*(r, t) + E_m^*(r, t) \rangle \\ &= I_0 \left[1 + \cos \left(\frac{4\pi n}{c} \times (f_0 + \Delta f \times \sin 2\pi f_m t) \times \Delta L \right) \right] \\ &= I_0 \left[1 + \cos \left(\frac{4\pi n f_0}{c} \Delta L + m \times \sin 2\pi f_m t \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

Trong đó, $I_0 = 2|E_{0r}|^2 = 2|E_{0m}|^2$ do năng lượng của chùm sáng được chia đều cho 2 nhánh khi đi qua lăng kính m , ΔL là độ dịch chuyển của gương đo, $m = \frac{4\pi n \Delta f}{c} \Delta L$ là hệ số điều biến. Khi các giá trị $m, \Delta f, n$ xác định, sẽ tính được lượng dịch chuyển ΔL .

Từ phương trình (2) sử dụng phương pháp xây dựng biểu đồ Lissajous [9] với các cặp phần tử điều hòa có pha vuông góc, khai triển theo hàm cosin tổng ta thu được:

$$\begin{aligned} I &= I_0 \left[1 + \cos \left(\frac{4\pi n f_0}{c} \Delta L \right) \times \cos(m \times \sin 2\pi f_m t) \right. \\ &\quad \left. - \sin \left(\frac{4\pi n f_0}{c} \Delta L \right) \times \sin(m \times \sin 2\pi f_m t) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Sử dụng hàm Bessel loại 1 [10] để khai triển phương trình (3), ta thu được:

$$I = I_0 \left\{ 1 + \left\{ \cos\left(\frac{4\pi n f_0}{c} \Delta L\right) \times \left[J_0(m) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(m) \times \cos(2k \times 2\pi f_m t) \right] - \sin\left(\frac{4\pi n f_0}{c} \Delta L\right) \times 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k-1}(m) \times \sin[(2k-1) \times 2\pi f_m t] \right\} \right\} \quad (4)$$

Trong đó, J_n là nghiệm của hàm Bessel loại 1 (hình 2). Tín hiệu tiếp đó sẽ được xử lý bằng kỹ thuật trích xuất đồng bộ Lock-in amplifier (LIA) để thu được các cặp phần tử điều hòa chẵn và lẻ là các tín hiệu có pha vuông góc.

Giả sử cặp tín hiệu điều hòa chứa phần tử thứ $J_{2k-1}(m)$ và $J_{2k}(m)$ với các tín hiệu tham chiếu là $(2k-1)\omega_m$ và $2k\omega_m$. Cặp tín hiệu điều hòa chứa phần tử chẵn-lẻ mong muốn:

$$I_{2k-1} = -I_0 J_{2k-1}(m) \sin\left(\frac{4\pi n f_0}{c} \Delta L\right) \quad (5)$$

$$I_{2k} = I_0 J_{2k}(m) \cos\left(\frac{4\pi n f_0}{c} \Delta L\right) \quad (6)$$

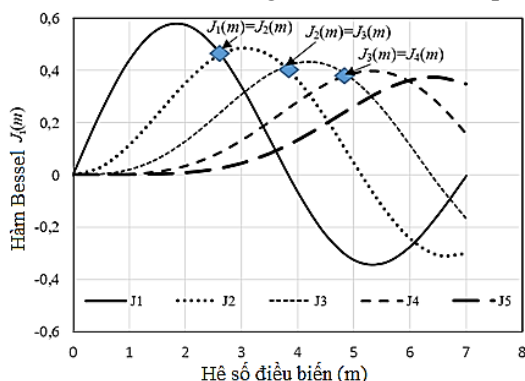
Phương trình (5), (6) có thể thấy 2 phần tử chẵn và lẻ của chuỗi hàm điều hòa là 2 tín hiệu có pha vuông góc. Do đó, có thể xây dựng lược sơ đồ Lissajous xác định độ dịch pha, chiều chuyển động của đối tượng đo. Độ dịch chuyển ΔL khi đó sẽ được tính như sau:

$$\Delta L = \frac{c}{4\pi n f_0} \times \tan^{-1} \frac{I_{2k-1} \times J_{2k}(m)}{I_{2k} \times J_{2k-1}(m)} \quad (7)$$

Phương trình (7) cho thấy độ dịch chuyển ΔL phụ thuộc vào cường độ của phần tử điều hòa $(2k-1)$, $2k$, 2 nghiệm $J_{2k}(m)$, $J_{2k-1}(m)$ của hàm Bessel loại 1. Sự biến động cường độ của nguồn laser sẽ làm giảm độ chính xác của phép đo, do vậy việc sử dụng tỉ số cường độ sẽ loại bỏ được hạn chế này. Để triệt tiêu ảnh hưởng của hệ số điều biến ta chọn các giá trị chỉ số điều biến m (hình 2) của hàm Bessel tại giá trị đặc biệt để triệt tiêu ảnh hưởng từ hàm Bessel ở phương trình (7), độ dịch chuyển ΔL trở thành:

$$\Delta L = \frac{c}{4\pi n f_0} \times \tan^{-1} \left(\frac{I_{2k-1}}{I_{2k}} \right) \quad (8)$$

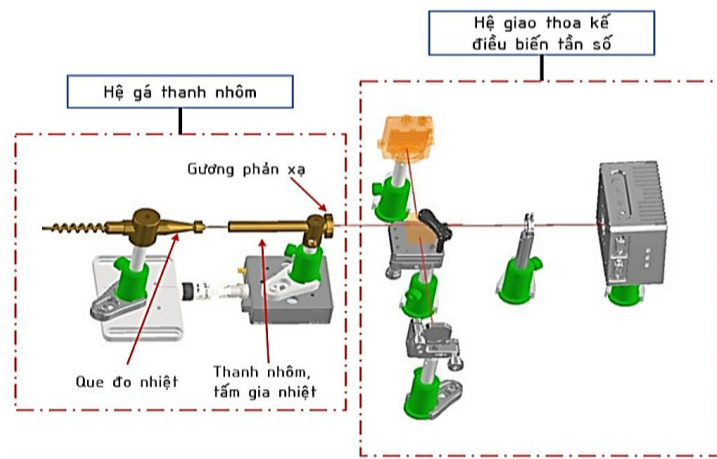
Phương trình (8) chỉ ra rằng độ dịch chuyển ΔL chỉ phụ thuộc vào dịch pha, loại bỏ được ảnh hưởng từ hệ số điều biến m của hàm Bessel, nâng cao độ chính xác phép đo.



Hình 2. Hàm Bessel và các giá trị đặc biệt (mũi tên vuông).

Để đo thay đổi dọc trục của hợp kim nhôm khi nhiệt độ thay đổi bằng sơ đồ nguyên lý của giao thoa kế điều biến tần số thì vị trí của gương động (hình 1) được thay thế bằng hệ giá thanh hợp kim nhôm hình 3. Thanh nhôm được điều chỉnh nhiệt độ tăng và giảm dần đều nhờ cảm biến nhiệt và

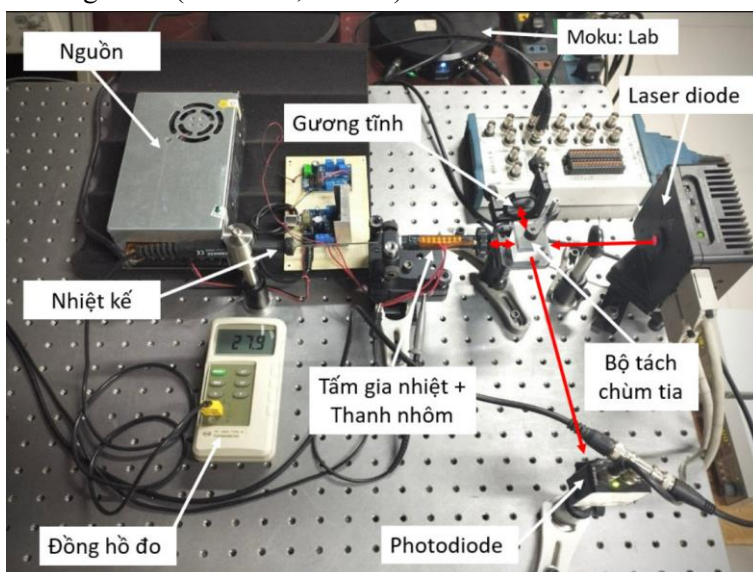
tấm gia nhiệt. Lượng dịch chuyển ΔL (biến dạng) dọc trục của thanh nhôm đo được theo nhiệt độ được tính toán thông qua tín hiệu giao thoa và hệ thống xử lý dữ liệu. Mô hình sơ đồ bố trí thí nghiệm như hình 3.



Hình 3. Sơ đồ thí nghiệm đo biến dạng thanh nhôm bằng giao thoa kế điều biến tần số.

3. THỰC NGHIỆM VÀ KẾT QUẢ

Thực nghiệm lắp đặt (hình 4), nguồn laser diode (LD) (HL6344G, hãng Thorlabs Inc) tần số LD được điều biến trực tiếp bằng điều biến dòng bơm. Gương phản xạ, thanh nhôm, tấm gia nhiệt (HT10K, Thorlabs Inc) liên kết với nhau bằng đồ gá và keo đặc biệt hình 5, thay đổi nhiệt độ của thanh nhôm được thực hiện bằng cách thay đổi nhiệt độ của tấm HT10K theo trở kháng. Một cảm biến nhiệt độ chính xác cao đo sự thay đổi nhiệt độ của thanh nhôm theo thời gian thực và hiển thị giá trị trên đồng hồ. Tín hiệu giao thoa thu được bởi photodetector (PDA36A-EC, Thorlabs Inc) được chuyển đến hệ thống thu thập dữ liệu (Moku:Lab and Moku:Go, Liquid Instruments Inc.), hệ thống này là sự kết hợp hơn 12 thiết bị trong một nền tảng gồm bộ tạo hàm, LIA, hộp lọc kỹ thuật số và máy phân tích phổ. Tín hiệu đầu ra của bộ LIA chứa biên độ các harmonic (tín hiệu điều hòa) được số hóa bằng ADC (PCI 6259, NI Inc.).



Hình 4. Thí nghiệm đo dịch chuyển dọc trục thanh hợp kim nhôm theo nhiệt độ bằng giao thoa kế điều biến tần số.

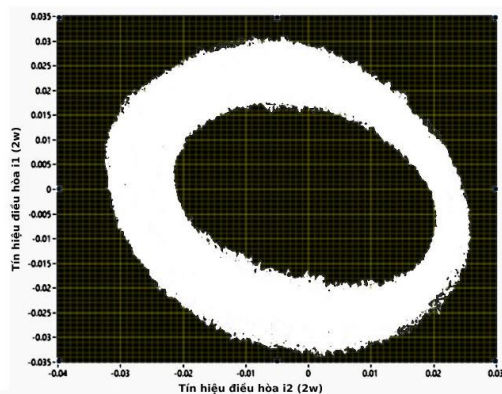


Hình 5. Gá lắp thanh nhôm và tấm gia nhiệt bằng các thiết bị của hãng Thorlabs:
1. Gương phản xạ ME-G01; 2. Thanh nhôm; 3. Tấm nhiệt HT10K; 4. Cơ cấu gá MH25.

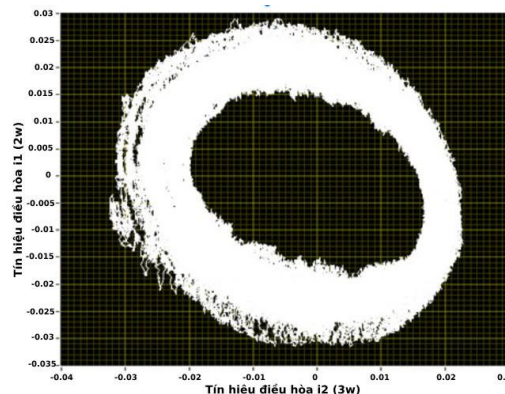
Bảng 1. Điều kiện thí nghiệm của giao thoa kế điều biến tần số.

Tần số điều biến của laser di-op	50 kHz
Bước sóng laser	633 nm
Tần số cắt của bộ lọc thông thấp	50 Hz
Giới hạn nhiệt độ	27 – 57 °C
Điện áp đầu vào	$V_{pp} = 16 \text{ V}, f = 17 \text{ Hz}$
Bước thay đổi nhiệt độ theo thời gian	1 s/0,15 độ
Thời gian lấy mẫu	200 s

Lượng thay đổi ΔL của thanh hợp kim nhôm khi nhiệt độ thay đổi theo thời gian thu được bởi giao thoa kế (thông qua các công cụ thu thập và xử lý dữ liệu) được thể hiện trên phần mềm LabView (hình 7, 8). Kết quả dữ liệu thu được từ bộ LIA là cặp chuỗi điều hòa bậc 1 và 2 có pha vuông góc theo phương trình (5) và (6), qua biểu đồ Lissajous (hình 6) để theo dõi chiều biến dạng của thanh nhôm khi tăng, giảm nhiệt độ cũng như tính toán sự thay đổi về pha qua sự thay đổi góc của sơ đồ và tính được độ dịch chuyển ΔL như phương trình (8). Nếu góc dịch ngược chiều kim đồng hồ nghĩa là kích thước thanh nhôm (ΔL) đang tăng và ngược lại.



a) Quá trình tăng nhiệt độ cho thanh nhôm.



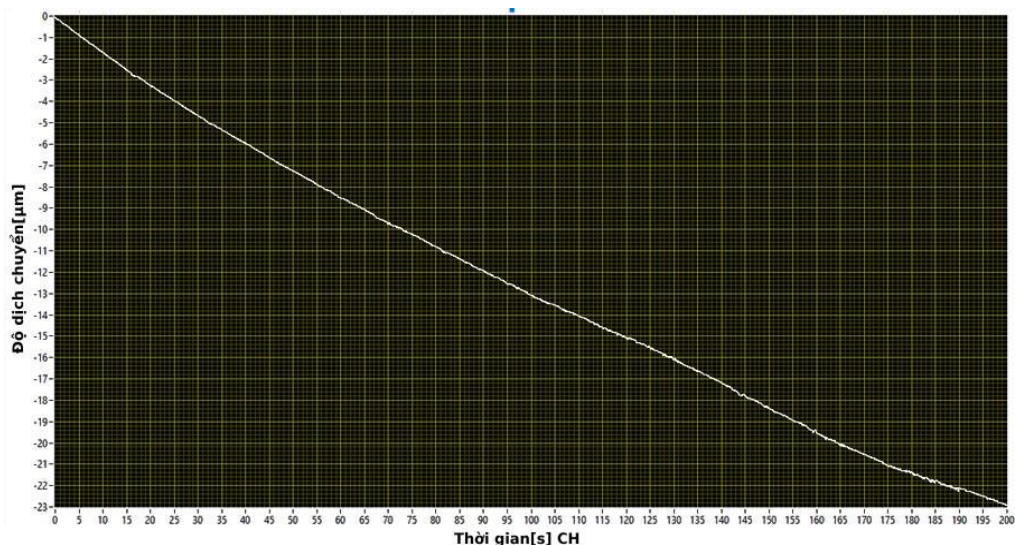
b) Quá trình giảm nhiệt độ cho thanh nhôm.

Hình 6. Biểu đồ Lissajous tín hiệu điều hòa bậc 1 và 2.

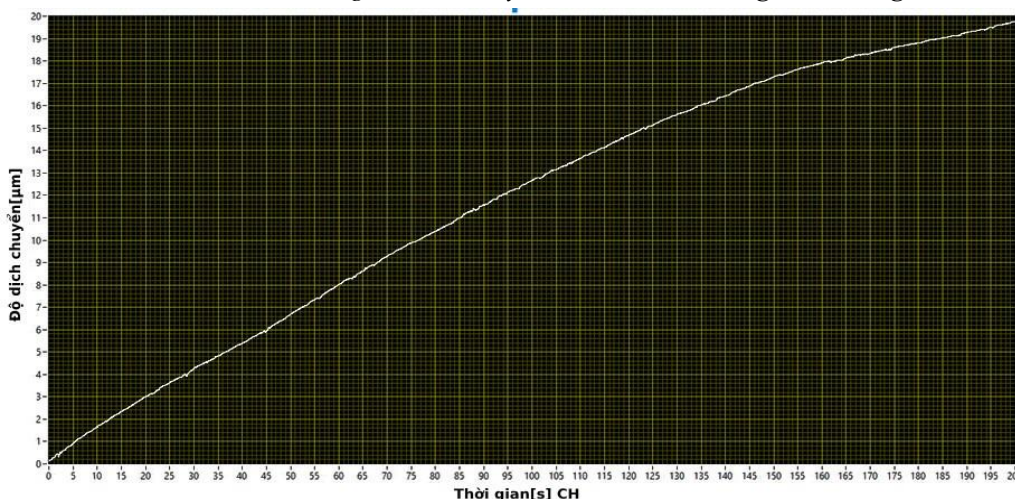
Kết quả đo được trong thời gian lấy mẫu 200 s, nhiệt độ tăng từ (27÷57) °C, thanh hợp kim nhôm thay đổi tăng kích thước ΔL dọc trục so với ban đầu 23 μm theo hình 8. Khi nhiệt độ giảm từ (57÷27) °C, kích thước thanh nhôm giảm ΔL gần 20 μm hình 8. Độ chính xác của kết quả đo sơ bộ được đánh giá thông qua các giá trị thay đổi nhỏ tuyến tính của thanh nhôm theo thời gian khi nhiệt độ thay đổi. Từ giá trị ΔL đo được, hoàn toàn có thể xác định được hệ số giãn nở nhiệt theo (9) [11], từ đó, xác định được vật liệu sử dụng:

$$L = L_0 (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (9)$$

Với α , ΔT , L , L_0 lần lượt là hệ số giãn nở nhiệt, sự thay đổi nhiệt độ, chiều dài tức thời, chiều dài ban đầu của thanh hợp kim nhôm.



Hình 7. Đồ thị labview giá trị ΔL thay đổi khi nhiệt độ tăng theo thời gian.



Hình 8. Đồ thị labview giá trị ΔL thay đổi khi nhiệt độ giảm theo thời gian.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã thành công trong việc xây dựng mô hình thí nghiệm thực tế giao thoa kế điều biến tần số đo biến dạng rất nhỏ cỡ μm của hợp kim nhôm. Đặc biệt, giao thoa kế điều biến tần số được đề xuất có kết cấu đơn giản, kỹ thuật xử lý tín hiệu mới với bộ LIA được sử dụng để trích xuất tín hiệu điều hòa thứ 1 và thứ 2 với pha vuông góc một cách hoàn hảo, hiệu quả và ổn định với sự thay đổi của môi trường. Độ chính xác của kết quả thu được có thể được đánh giá thông qua việc so sánh kết quả với bộ cảm biến điện dung sẽ được tác giả đề xuất trong các nghiên cứu sau này.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được thực hiện nhờ sự hỗ trợ kinh phí của Đề tài cấp Bộ Giáo dục và Đào tạo năm 2023-2024, mã số B2023-BKA-03.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. “Инфракрасные системы “смотрящего” типа”. М: Логос, (2004).
- [2]. G. Muyo and A. R. Harvey. “Wavefront Coding for Athermalization of Infrared Imaging Systems”, Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications, pp. 227–235, (2004).
- [3]. Hoàng Anh Tú, Trần Quốc Tuấn, Lê Văn Đại, Đỗ Doanh Điện, “Nghiên cứu, tính toán sự thay đổi của

-
- chất lượng tạo ảnh của vật kính ảnh nhiệt khi nhiệt độ thay đổi và giải pháp chủ động cơ điện bù nhiệt*”, Tạp chí Nghiên cứu KH&CN QS, số đặc san VĐT, (2020).
- [4]. L M Barker, R E Hollenbach, "Interferometer Technique for Measuring the Dynamic Mechanical Properties of Materials," Review of Scientific Instruments, vol. 36, no. 11, pp. 1617-1620, (1965).
- [5]. N A Massie, R D Nelson, S Holly, "High-performance real-time heterodyne interferometry," Applied Optics, vol. 18, no. 11, pp. 1797-1803, (1979).
- [6]. Anh Tu Hoang, Thanh Tung Vu, Duc Quang Pham, Toan Thang Vu, Thanh Dong Nguyen, Van Huong Tran, "High precision displacement measuring interferometer based on the active modulation index control method" Measurement, vol 214, pages 112819-6, (2023).
- [7]. M. L. Meade, "Lock-In Amplifiers: Principles and Applications", Inst of Engineering & Technology, (1983).
- [8]. Vu, T. T., Maeda, Y., & Aketagawa, M. "Sinusoidal frequency modulation on laser diode for frequency stabilization and displacement measurement". Measurement, 94, 927-933, (2016).
- [9]. S. Cho, "Chapter 5 Lissajous Figures," in Numerical Calculation for Physics Laboratory Projects Using Microsoft EXCEL, Morgan & Claypool, (2019).
- [10]. W. W. Bell, "Special Functions for Scientists and Engineers", Massachusetts: Courier Corporation, (2004).
- [11]. https://vi.wikipedia.org/wiki/Độ_giãn_nở_nhiệt

ABSTRACT

Research for the application of frequency modulation Interferometer to measure the deformation of aluminum alloy when temperature changes in optical devices

This article presents the theoretical foundation and application of a new method to measure the deformation of aluminum alloys due to temperature changes using a frequency-modulated interferometer (FMI). Aluminum alloys are important components, often used in manufacturing and mounting lenses for optical devices. When the temperature changes, the thickness and axial dimensions change according to the thermal expansion coefficient of the material, causing defocus that reduces the image quality of the optical device. Because the exact material used is often unknown in practice, it becomes difficult to precisely calculate the change caused by the thermal expansion coefficient. Therefore, a method to directly measure the material's actual deformation caused by temperature change is necessary to implement a temperature compensation solution from the design stage. The proposed FMI offers a simple structure and a new signal processing technique that can measure the small deformations of aluminum alloy with high accuracy under varying temperatures.

Keywords: Frequency-modulated Interferometer; Deformation of materials; Aluminum alloy.