

# Nghiên cứu phát triển hệ đo độ dày vật liệu thủy tinh nhiều lớp dựa trên công nghệ giao thoa ánh sáng xung lược

Bành Quốc Tuấn<sup>1\*</sup>, Phạm Đức Quang<sup>1</sup>, Nguyễn Quốc Đạt<sup>2</sup>,  
Trương Công Tuấn<sup>3,4</sup>, Shioda Tatsutoshi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Phòng thí nghiệm Nghiên cứu phát triển ứng dụng fiber laser, Viện Ứng dụng Công nghệ  
<sup>2</sup>Trung tâm Ươm tạo công nghệ và Doanh nghiệp khoa học công nghệ, Viện Ứng dụng Công nghệ  
<sup>3</sup>Viện Sau đại học về khoa học và kỹ thuật, Đại học Saitama, Nhật Bản  
<sup>4</sup>Viện Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

Ngày nhận bài 5/11/2018; ngày chuyển phản biện 8/11/2018; ngày nhận phản biện 11/12/2018; ngày chấp nhận đăng 21/12/2018

## **Tóm tắt:**

Phương pháp đo biên dạng bề mặt (surface profile) và đo cắt lớp độ dày vật liệu (tomograms) dựa trên giao thoa ánh sáng phổ rộng được phát triển trong nghiên cứu này. Bộ cộng hưởng Fabry-Perot được sử dụng để tạo ra một nguồn sáng phát tần số xung lược nhằm mở rộng khoảng đo theo chiều sâu. Cách tử nhiễu xạ (diffraction grating) được đặt bên trong bộ giao thoa ánh sáng, cho phép thực hiện các phép đo biên dạng bề mặt và đo cắt lớp độ dày vật liệu trong không gian 2 chiều chỉ với một khung ảnh trên camera CCD. Các vân giao thoa với các bậc vân riêng biệt tương ứng với bậc của tần số xung lược được ghi lại bởi một CCD camera trong thời gian thực. Thông tin biên dạng và độ dày các lớp của mẫu vật là các lớp (tấm thủy tinh nhiều lớp) có thể được tính toán từ vị trí của vân giao thoa trên CCD camera và bậc tương ứng của các vân. Trong hệ đo này, độ phân giải của phép đo cắt lớp độ dày và đo biên dạng lần lượt đạt được là 8  $\mu\text{m}$  và 0,7  $\mu\text{m}$ ; phạm vi đo của hệ có thể đạt được là 30 mm.

**Từ khóa:** ảnh giao thoa ánh sáng, chụp cắt lớp, đo biên dạng, giao thoa ánh sáng.

**Chỉ số phân loại:** 2.2

## **Đặt vấn đề**

Đo bề mặt và đo bên trong bề mặt là bài toán được đặt ra trong rất nhiều lĩnh vực, bao gồm cả y học, sinh học và công nghiệp. Điển hình như trong sinh học, một số công nghệ như siêu âm, X-quang [1], công hưởng từ [2] đã được phát triển và sử dụng rộng rãi để đo, kiểm tra các dị vật bên trong cơ thể người, mang lại lợi ích rất to lớn trong việc khám chữa bệnh. Trong công nghiệp, việc đánh giá chất lượng bề mặt cũng như bên trong sản phẩm cũng rất quan trọng. Các phương pháp như kính hiển vi điện tử (optical microscope [3]), máy quét đầu dò (scanning probe microscope) hoặc máy quét xử lý pha laser (phase shifting microscope [4]) đang được sử dụng rất phổ biến.

Mỗi phương pháp có những ưu nhược điểm và phạm vi ứng dụng riêng. Phương pháp siêu âm có ưu điểm là dải đo lớn, tốc độ đo nhanh, tuy nhiên độ chính xác không cao nên hạn chế trong sử dụng để đo các đối tượng có kích thước nhỏ (<100  $\mu\text{m}$ ) [4, 5]. Trong 2 thập kỷ gần đây, phương pháp chụp giao thoa quang học (optical coherent tomography - OCT [2, 3]) đang thu hút nhiều sự quan tâm

của các nhà nghiên cứu trên thế giới vì độ chính xác cao (~1  $\mu\text{m}$ ) và không phá hủy mẫu. Thêm vào đó, sự phát triển nhanh chóng của công nghệ vật liệu, công nghệ bán dẫn, điện tử kết hợp với công nghệ chế tạo sợi quang cho phép tạo ra rất nhiều nguồn sáng (từ đơn sắc laser đến dải rộng và siêu rộng), có thể sử dụng trong các máy đo OCT thế hệ mới. Nhiều phiên bản đo OCT đã được nghiên cứu và phát triển [4, 5] phục vụ trong nhiều lĩnh vực. Tuy nhiên, hiện nay các máy đo OCT vẫn có những hạn chế lớn về tốc độ đo, khó ứng dụng trong công nghiệp, nơi mà ngoài tiêu chí về độ chính xác cao thì tốc độ cao và không phá hủy mẫu là yếu tố rất quan trọng, quyết định hiệu suất làm việc và khả năng ứng dụng thực tế của cả hệ thống.

Một số nghiên cứu đã giới thiệu giải pháp để giải quyết bài toán tốc độ đo của máy OCT như sử dụng laser xung lược [5] hoặc ánh sáng dải siêu rộng (super-continuum light [5]). Tốc độ đo và độ phân giải được cải thiện, nhưng thiết bị đắt tiền và hệ thống trở nên rất phức tạp. Trong những nghiên cứu trước của nhóm, chúng tôi cũng đã phát triển hệ thống đo giao thoa ánh sáng trong thời gian thực sử dụng

\*Tác giả liên hệ: Email: tuan@sevensix.co.jp

# Research and development of multi-layer glass plate thickness measurement system using optical frequency comb interferometry

Quoc Tuan Banh<sup>1\*</sup>, Duc Quang Pham<sup>1</sup>,  
Quoc Dat Nguyen<sup>2</sup>, Cong Tuan Truong<sup>3,4</sup>,  
Shioda Tatsutoshi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratory for Optical Fiber Laser Research Development and Application,  
National Center for Technological Progress

<sup>2</sup>Nacentech Technology and Business Incubator,  
National Center for Technological Progress

<sup>3</sup>Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, Japan

<sup>4</sup>School of Mechanical Engineering,  
Hanoi University of Science and Technology

Received 5 November 2018; accepted 21 December 2018

## Abstract:

We proposed a measurement system for surface profile and tomography using incoherent optical frequency comb interferometry and spatial phase modulation (a diffraction grating). By employing a spatial phase modulator to an interferometer, the axial and lateral information of a sample were simultaneously obtained in one-shot capture. An incoherent optical frequency comb, which was generated by a Fabry-Perot etalon and super continuum (SC) light source, was also installed to extend the axial measurement range of the system. The interference fringes, which belong to the interference comb orders, were rapidly monitored on the CCD camera. Surface profile and thickness of multi-layer glass plates could be derived from the position of the inference fringes on the CCD and their calculated fringe order. Resolutions of tomography and profilometry were achieved at 8  $\mu\text{m}$  and 0.7  $\mu\text{m}$ , respectively. The measurement range could be extended up to 30 mm by using the optical frequency comb technology.

**Keywords:** interferometric imaging, interferometry, profilometry, tomography.

**Classification number:** 2.2

phương pháp mã hóa không gian pha kết hợp với bộ cộng hưởng VIPA (virtually imaged phase array) [5]. Hệ thống này đáp ứng được yêu cầu về đo thời gian thực.

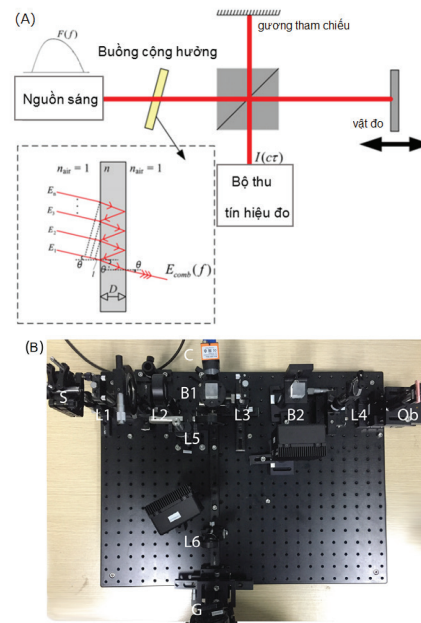
Nghiên cứu này hướng tới việc phát triển thiết bị đo chính xác bề dày các lớp thủy tinh với tốc độ đo nhanh, đáp ứng được tốc độ dây chuyền sản xuất của các nhà máy sản xuất thủy tinh. Chúng tôi đề xuất một nghiên cứu mới sử dụng nguồn sáng dải siêu rộng và kỹ thuật mã hóa không gian pha kết hợp cộng hưởng. Phương pháp được đề xuất nhằm mục đích đo bề dày các lớp mẫu trong thời gian thực, không gian 2 chiều, độ phân giải  $\sim 8 \mu\text{m}$ , khoảng cách đo  $\sim 30 \text{ mm}$ . Hệ thống có khả năng đo bề mặt của vật liệu trong thời gian thực và xây dựng hình ảnh 3D bề mặt vật liệu tán xạ ánh sáng cao thông qua việc ghép nhiều ảnh 2D thu được từ máy đo.

## Phương pháp

Một nguồn sáng độ kết hợp thấp (low-coherent) có phổ lược tần số (frequency comb) được tạo ra một cách đơn giản bằng việc sử dụng một bộ cộng hưởng Fabry-Perot và một nguồn sáng dải rộng. Phổ công suất của nguồn sáng lược tần số được miêu tả bởi công thức [4]:

$$E_{comb}(f) \propto F(f)[G(f) \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \delta(f - mFSR)] \quad (1)$$

trong đó: FSR (free spectral range),  $f$ ,  $F(f)$ ,  $G(f)$  và  $m$  lần lượt là khoảng cách giữa các tần số xung lược, tần số ánh sáng, phổ tần số ánh sáng của nguồn sáng dải rộng, phổ của nguồn xung lược tần số và bậc của xung lược tần số.



Hình 1. (A) Sơ đồ hệ thống giao thoa sử dụng nguồn sáng xung lược, và (B) Hình ảnh hệ thống trong thực tế, trong đó S là nguồn sáng; L1, L2, L3, L4, L5, L6 là các thấu kính; B1 là bộ chia quang; Ob là vật; C là CCD camera; B1, B2 là bộ tách tia, G là cách tử nhiễu xạ.

Trong miền thời gian, tia sáng từ bộ cộng hưởng đi ra là biến đổi fourier ngược của  $E_{comb}(f)$  được miêu tả bởi:

$$I(t) = F^{-1}[E_{comb}(f)] \cong g(t)e^{i2\pi f_0 t} [f(t) * \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \delta(t - m \frac{1}{FSR})] \quad (2)$$

trong đó  $I(t)$ ,  $t, f_0, g(t)$  và  $f(t)$  là cường độ chùm sáng đi ra từ bộ cộng hưởng, thời gian, tần số trung tâm của nguồn sáng, biến đổi fourier ngược của  $G(f)$  và  $F(f)$  [4]. Các tần số xung lược (thỏa mãn điều kiện cộng hưởng) lần lượt đi ra khỏi bộ cộng hưởng với một khoảng thời gian trễ nhất định. Trong trường hợp bộ cộng hưởng quang được đặt trước hệ thống giao thoa, các thành phần sóng ánh sáng sẽ giao thoa với nhau theo một tỷ lệ cường độ giữa sóng ánh sáng phản xạ từ mẫu vật và sóng ánh sáng nhiễu xạ từ nhánh tham chiếu. Tỷ lệ này thường được chọn sao cho độ tương phản của các vân giao thoa trên cảm biến của camera là lớn nhất.

Sơ đồ hệ thống giao thoa được miêu tả trong hình 1(A). Nguồn sáng xung lược tần số độ kết hợp thấp được tạo ra từ một nguồn sáng phổ rộng và một bộ cộng hưởng quang. Ánh sáng truyền tại một tần số riêng lẻ từ bộ cộng hưởng là tổng của tất cả các chùm đa phản xạ, quang lộ của mỗi chùm đa phản xạ có giá trị khác nhau sau mỗi lần phản xạ trên hai bề mặt của bộ cộng hưởng quang. Hàm truyền của bộ cộng hưởng quang được biểu diễn bởi:

$$T = t_1 t_2 \sum_{m=0}^{\infty} (r_1 r_2)^m e^{-i(2\pi f/c)[(2m+1)nL - ml]} \quad (3)$$

trong đó  $t_1, t_2, r_1$  và  $r_2$  là hệ số truyền qua và phản xạ của mặt trước và mặt sau của bộ cộng hưởng quang,  $c$  và  $f$  là vận tốc ánh sáng trong chân không và tần số của ánh sáng,  $n$  và  $L$  là chiết suất của vật liệu bên trong bộ cộng hưởng quang và khoảng cách giữa 2 mặt của bộ cộng hưởng,  $l$  là hiệu quang lộ giữa 2 tia liên tiếp trước khi đi vào bộ cộng hưởng quang. Từ công thức (2), biên độ sóng ánh sáng truyền qua bộ cộng hưởng được viết lại theo công thức:

$$T = t_1 t_2 e^{-i(2\pi f n L/c)} \sum_{m=0}^{\infty} (r_1 r_2)^m e^{-i\Delta\phi m} \approx \frac{t_1 t_2 e^{-i(2\pi f n L/c)}}{1 - r_1 r_2 e^{-i\Delta\phi}} \quad (4)$$

trong đó  $\Delta\phi$  là pha bị thay đổi khi tia sáng phản xạ trong bộ cộng hưởng quang [4, 5].

Cường độ của tia sáng truyền qua được tính bởi công thức:

$$I = TT^* = \frac{(t_1 t_2)^2}{1 + (r_1 r_2)^2 - 2r_1 r_2 \cos(\Delta\phi)} \quad (5)$$

và  $\Delta\phi$  được tính theo công thức:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi f n D}{c} \cos[\sin^{-1}(\sin \theta / n)] \quad (6)$$

trong đó,  $D$  và  $\theta$  là chiều rộng của bộ cộng hưởng quang và góc giữa bề mặt của bộ cộng hưởng quang và tia ánh sáng tới.

Cường độ của tia sáng truyền qua bộ cộng hưởng đạt giá trị lớn nhất khi  $\Delta\phi$  là bội số của  $2\pi$ . Tần số thỏa mãn điều

kiện cộng hưởng của cộng hưởng quang được tính bởi:

$$f_r = m \frac{c}{2nd \cos[\sin^{-1}(\sin \theta / n)]} \quad (7)$$

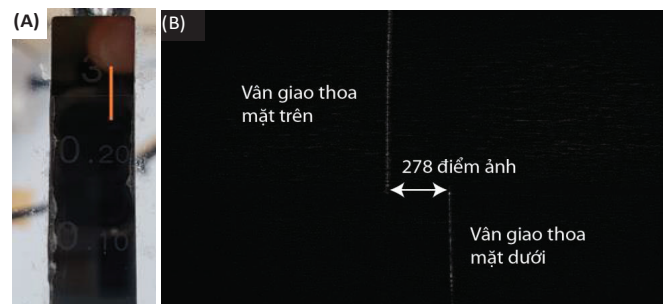
ở đây  $m$  là số nguyên tố dương,  $m = 1, 2, 3, \dots$

Khi tia sáng có phổ tần số xung lược được tạo ra bởi bộ cộng hưởng quang được sử dụng như nguồn sáng trong hệ giao thoa, vì các tần số lặp lại của bộ cộng hưởng ở tần số rất cao, giao thoa tạo ra tín hiệu xung xuất hiện liên tục dọc theo đường truyền của tia sáng trong hệ giao thoa. Mỗi tín hiệu giao thoa trong hệ giao thoa có một thứ tự vân nhất định, và dựa vào thứ tự vân mà thu được từ hệ giao thoa có thể nội suy ra được thông tin về vật (optical path length)  $nL$ .

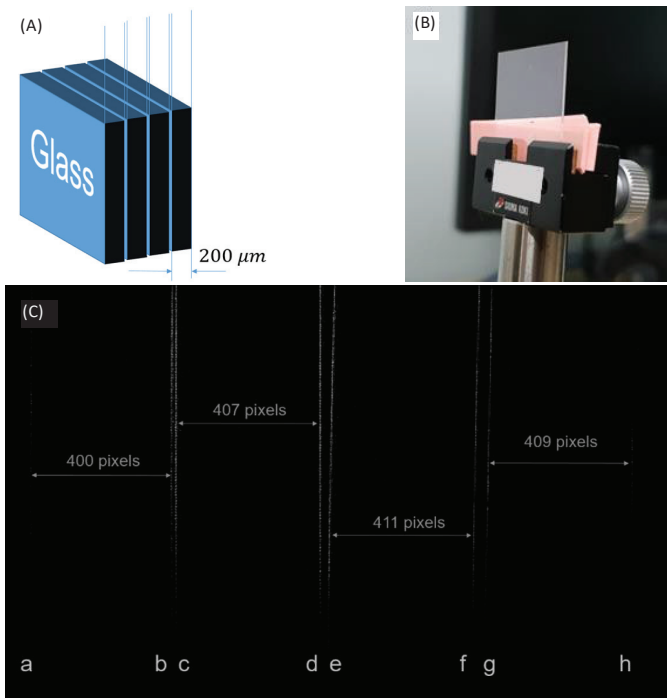
### Kết quả và thảo luận

Để xác nhận tính khả thi của phương pháp đo trong phần này, một hệ thống như hình 1(B) được xây dựng để đo mẫu vật. Ánh sáng từ nguồn sáng phổ rộng được chuẩn trực tạo thành tia sáng song song, được hội tụ bởi hệ thấu kính có tiêu cự nhỏ 10 mm và 100 mm. Tín hiệu giao thoa được tạo bởi sóng phản xạ từ vật và từ bộ mã hóa pha (cách tử quang) được ghi nhận bởi camera.

Để xác định độ chính xác của hệ đo, một vật mẫu có bề dày biết trước cấu tạo bởi 3 Gauge block ghép vào với nhau như trong hình 2(A) được sử dụng. Vân giao thoa của sóng ánh sáng phản xạ từ vật và từ cách tử quang được ghi nhận như trong hình 2(B). Do khoảng cách giữa hai bề mặt của mẫu có kích thước biết trước là 200  $\mu\text{m}$  và khoảng cách giữa 2 vân giao thoa tạo bởi 2 bề mặt của mẫu được ghi nhận trên camera tính theo điểm ảnh là 278 điểm, điều này có nghĩa là mỗi điểm ảnh của camera tương ứng với một khoảng cách là 0,719  $\mu\text{m}$ . Từ ảnh vân giao thoa giữa gương tham chiếu và các bề mặt từ vật, ta có thể xác định được khoảng cách thực tế giữa các bề mặt của vật một cách dễ dàng thông qua vị trí của các vân này. Từ hình 2(B), ta cũng có thể thấy rằng, bề rộng của vân giao thoa tính từ vị trí nửa vân có cường độ lớn nhất (Full Width Half Maximum - FWHM) là 11 điểm ảnh, vì vậy độ phân giải của mỗi phép đo biên dạng bề mặt của vật là xấp xỉ 0,7  $\mu\text{m}$ ; độ phân giải phép đo cắt lớp độ dày của vật là xấp xỉ 8  $\mu\text{m}$ .



Hình 2. (A) Vật mẫu được sử dụng để xác định tính chính xác của hệ đo và (B) Vân giao thoa giữa sóng ánh sáng phản xạ từ vật và sóng tham chiếu phản xạ từ cách tử quang.



Hình 3. (A) Mô hình và (B) Vật thực tế được đo bởi hệ thống, (C) Vị trí vân giao thoa giữa sóng phản xạ từ vật và sóng tham chiếu phản xạ từ cách tử quang được đánh dấu bởi các ký tự từ a tới h.

Trong thí nghiệm tiếp theo, hệ thống sẽ được áp dụng vào việc đo chiều dày của một vật thực. Vật được tạo ra bằng cách ghép nhiều tấm kính mỏng lại với nhau như trong hình 3(A) và (B). Chiều dày của mỗi lớp kính vào khoảng 200  $\mu\text{m}$ , các bề mặt được lựa chọn có hệ số phản xạ giống nhau. Vì có 4 tấm kính nên sẽ có 8 bề mặt và vân giao thoa tương ứng với vị trí của 8 bề mặt được chỉ ra trên hình 3(C). Vị trí tương ứng của các bề mặt được chỉ định bởi các ký tự tương ứng từ a tới h. Từ ảnh vân giao thoa của mỗi bề mặt của vật ta có thể tính được chiều dày quy đổi của các bề mặt a~b, b~c, c~d, e~f và g~h lần lượt là 191,7  $\mu\text{m}$ , 195,1  $\mu\text{m}$ , 197  $\mu\text{m}$  và 196  $\mu\text{m}$ . Chú ý rằng chiết suất của thủy tinh là 1,5. Tương tự, khoảng cách các khe giữa các tấm thủy tinh b~c, d~e, f~g tính tại vị trí đường cắt ngang giữa của ảnh vân giao thoa lần lượt là 16 điểm ảnh, 30 điểm ảnh và 38 điểm ảnh tương ứng với khoảng cách thực tế giữa các tấm thủy tinh là 11,5  $\mu\text{m}$ , 21,6  $\mu\text{m}$  và 27,3  $\mu\text{m}$ .

## Kết luận

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã giới thiệu một kỹ thuật mới cho phép đo chiều dày của các lớp vật liệu thủy tinh sử dụng giao thoa nguồn sáng phổ xung lược được tạo ra bởi một cộng hưởng tinh thể. Phương pháp có khả năng thực hiện phép đo vật theo 2 chiều (2D) hoặc 3 chiều (3D) chính xác với độ phân giải cao và tốc độ đo cao trong thời gian thực. Phạm vi đo của hệ thống được mở rộng tới hơn 30 lần so với các phương pháp đo truyền thống, trong khi độ phân giải không thay đổi. Kỹ thuật được đề xuất trong nghiên cứu này đáp ứng được các yêu cầu công nghiệp như: độ chính xác cao (<10  $\mu\text{m}$ ), thời gian đo nhanh, có thể quan sát và lưu kết quả đo trong thời gian thực, khoảng cách có thể đo lớn, bề dày mẫu >30 mm, khoảng cách từ đầu đo đến mẫu lớn, thuận lợi khi thiết kế, cài đặt và không tiếp xúc trực tiếp hay phá hủy mẫu. Với phạm vi và độ phân giải đạt được của hệ thống, việc đo chất lượng bề mặt và phát hiện các khuyết tật bên trong (bên dưới) bề mặt vật liệu trong công nghiệp, y sinh và các lĩnh vực công nghệ khác là hoàn toàn có thể thực hiện được.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M.C. Tan, et al. (2016), “Ultrasonically treated foams and cakes using X-ray tomography and X-ray microtomography”, *Journal of Food Engineering*, **83**, pp.9-15.
- [2] M.R. Gold, et al. (2015), “Full-Body MRI in Patients With an Implantable Cardioverter-Defibrillator: Primary Results of a Randomized Study”, *Journal of the American College of Cardiology*, **65**, pp.2581-2588.
- [3] D. Huang, et al. (1991), “Optical Coherent Tomography”, *Science*, **254**, p.1178.
- [4] T. Shioda, et al. (2012), “Two-dimensional single-shot tomography using a virtually imaged phased array and a spatial phase modulator”, *Applied Optics*, **51**, p.5224.
- [5] B.Q. Tuan, et al. (2013), “Development of an incoherent optical frequency comb interferometer for long-range and scanless profilometry and tomography”, *Optics Communications*, **296**, pp.1-8.