

Đo lường 3D bề mặt sử dụng kỹ thuật Holography và phương pháp biến đổi Fourier

Phạm Đức Tuấn¹, Vũ Thanh Tùng^{1*}, Hoàng Anh Tú¹,
Phan Đình Tuấn¹, Phạm Đức Quang², Trần Văn Thực¹

¹Trường Cơ Khí, Đại học Bách khoa Hà Nội, Số 1 Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam;

²Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội, Số 144 Xuân Thủy, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam.

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

Nhận bài: 07/6/2024; Hoàn thiện: 18/9/2024; Chấp nhận đăng: 11/10/2024; Xuất bản: 25/10/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.98.2024.132-138>

TÓM TẮT

Kỹ thuật Holography có vai trò quan trọng trong lĩnh vực đo lường 3D bề mặt nhờ vào khả năng cung cấp đồng thời thông tin về cường độ và pha của bề mặt được đo với một ảnh chụp duy nhất. Trong bài báo này, phương pháp tính toán và thực nghiệm tái tạo bề mặt 3D của mẫu nhám sử dụng kỹ thuật Holography được đề xuất. So với giao thoa ánh sáng trắng, phương pháp được đề xuất có tính ổn định cao do không sử dụng vi dịch chuyển, tốc độ đo nhanh và thông tin bề mặt được trích xuất bằng một khung hình duy nhất và độ phân giải dọc trực đạt cấp độ nanomet. Biến đổi Fourier kết hợp với các kỹ thuật lọc nhiễu được sử dụng để nâng cao độ chính xác của phép đo 3D bề mặt. Bề mặt nhám $Ra = 0,2943 \mu\text{m}$ được xây dựng thành công bằng phương pháp đề xuất với sai lệch $\pm 8 \text{ nm}$ với hệ số phủ bằng 3 so với phép đo trên thiết bị giao thoa ánh sáng trắng. Nghiên cứu này có thể ứng dụng đo kiểm 3D bề mặt có độ chính xác cao, các linh kiện quang học, các cấu trúc vi cơ điện tử.

Từ khoá: Đo lường 3D; Kỹ thuật Holography; Biến đổi Fourier.

1. MỞ ĐẦU

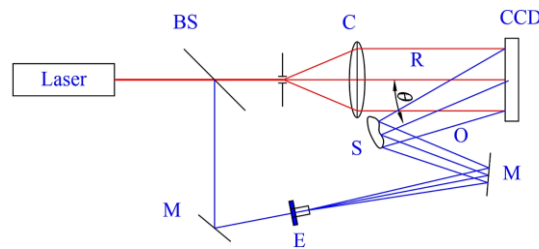
Đo lường 3D bề mặt cấp độ nanomet có vai trò quan trọng trong lĩnh vực bán dẫn, quang điện tử, gia công siêu chính xác, vi cơ điện tử [1-3]. Nhiều phương pháp đo lường 3D được đề xuất để nâng cao độ chính xác cũng như phạm vi đo bao gồm: kính hiển vi lực nguyên tử, kính hiển vi đồng tiêu, kính hiển vi kỹ thuật số, giao thoa ánh sáng trắng và holography [4, 5]. Kính hiển vi lực nguyên tử (AFM) có thể độ phân giải dưới 1 nanomet cho các loại vật liệu, tuy nhiên, giá thành cao, phạm vi đo 3 chiều nhỏ và đòi hỏi điều kiện làm việc nghiêm ngặt [6, 7]. Kính hiển vi đồng tiêu được ứng dụng phổ biến trong lĩnh vực vi cơ điện tử do có độ phân giải cao (đến 1 nm), tốc độ đo nhanh. Tuy nhiên, độ chính xác phép đo phụ thuộc vào chất lượng hệ quang, bề mặt và tính chất quang của vật liệu mẫu đo [8-10]. Giao thoa ánh sáng trắng có độ phân giải cao, tuy nhiên, chịu ảnh hưởng lớn của môi trường và cần hệ siêu dịch chuyển và xử lý dữ liệu lớn [11, 12]. So sánh với các kỹ thuật trên, kỹ thuật được đề xuất có ưu điểm là không tiếp xúc, không phá hủy mẫu đo, không sử dụng hệ siêu dịch chuyển mà thông tin của đối tượng đo được thu nhận đầy đủ với chỉ một ảnh chụp duy nhất cho độ phân giải đo đến cấp nanomet theo chiều dọc trục.

Ảnh hologram không chỉ mang thông tin về cường độ sáng của vật thể (ảnh 2D) mà còn mang thông tin về pha của vật thể (chiều cao đối tượng đo) trong một ảnh duy nhất [13, 14]. Dựa trên biến đổi Fourier có thể khôi phục được ảnh cường độ và pha của đối tượng đo từ đó xây dựng biên dạng 3D của bề mặt vật thể. Trong phần 2, chúng tôi đưa ra cơ sở lý thuyết, sơ đồ đo và các tính toán cần thiết để xây dựng hệ đo biên dạng 3D của vật thể. Trong phần 3, chúng tôi tiến hành đo bề mặt gương có độ phẳng tốt hơn $\lambda/10$ và mẫu nhám có độ nhám nhỏ hơn $\lambda/2$. Kết quả đo được so sánh với kết quả đo trên thiết bị đo bề mặt ba chiều ZeGage™ Pro để đánh giá khả năng đo của hệ đo. Trong phần cuối, chúng tôi đưa ra các nhận định về kết quả, đề xuất hướng nghiên cứu mới để nâng cao độ phân giải, phạm vi đo và độ chính xác của phép đo cũng như khả năng ứng dụng của kỹ thuật này trong thực tế đo lường 3D.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT CỦA ĐO LƯỜNG 3D BẰNG KỸ THUẬT HOLOGRAM

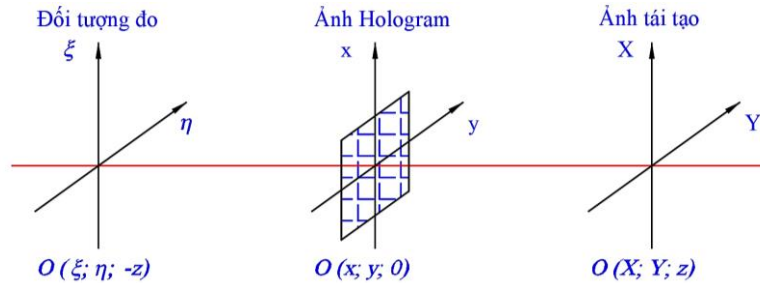
2.1. Nguyên lý đo lường 3D sử dụng kỹ thuật Hologram

Trong nghiên cứu này, kỹ thuật Hologram ngoài trục (Off-axis Hologram) được sử dụng để khắc phục hiện tượng ảnh đôi được tạo ra trong quá trình tái tạo ảnh hologram [15]. Sơ đồ của nguyên lý của hệ Hologram ngoài trục được thể hiện trên hình 1. Nguồn ánh sáng kết hợp Laser được tách thành sóng tham chiếu và sóng vật bằng bộ tách chùm tia BS. Một phần Laser được truyền thẳng qua hệ chuẩn trực C tạo thành sóng tham chiếu R và đi đến đầu thu CCD. Một phần Laser được phản xạ tại bề mặt của BS đến gương M1, qua hệ mở rộng chùm tia E, được gương M2 phản xạ và chiếu vào đối tượng đo S. Sóng tán xạ O từ đối tượng đo được bố trí lệch một góc θ so với sóng tham chiếu R. Trên đầu thu CCD, thu được hình ảnh giao thoa tạo bởi sóng tham chiếu R và sóng tán xạ O từ bề mặt của đối tượng đo. Đầu thu kỹ thuật số được kết nối với máy tính sử dụng phần mềm để tái tạo ảnh biên độ và pha của đối tượng đo.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý Holography kỹ thuật số ngoài trục.
BS: Bộ tách chùm tia; C: Hệ chuẩn trực; M1, M2: Gương phản xạ;
E: Hệ mở rộng chùm tia; S: Đối tượng đo; CCD: Đầu thu.

2.2. Phương pháp tái tạo 3D bề mặt đối tượng đo



Hình 2. Hệ trục tọa độ tái tạo ảnh Hologram.

Ảnh Hologram thu được trên CCD có thể được biểu thị bằng phương trình (1) [16]:

$$\begin{aligned} \Gamma(x, y) &= |\varphi_0(x, y) + \varphi_r e^{jk_0 \sin \theta x}|^2 \\ &= |\varphi_0(x, y)|^2 + |\varphi_r|^2 + \varphi_0(x, y) \varphi_r^* e^{-jk_0 \sin \theta x} + \varphi_0^* e^{jk_0 \sin \theta x} \end{aligned} \quad (1)$$

hoặc

$$\Gamma(x, y) = |\varphi_0(x, y)|^2 + |\varphi_r|^2 + 2|\varphi_0^*(x, y) \varphi_r| \cos [2\pi f_x x + \phi(x, y)] \quad (2)$$

Trong đó, $\varphi_0(x, y)$ và $\varphi_r e^{jk_0 \sin \theta x}$ lần lượt là biên độ phức của sóng vật O và sóng tham chiếu R. Ảnh Hologram thu được có $\phi(x, y)$ là góc pha của $\varphi_0^*(x, y) \varphi_r$ và $f_x = \sin \theta / \lambda$ được gọi là tần số sóng mang không gian của ảnh hologram với λ là bước sóng tạo ảnh Hologram. $|\varphi_0(x, y)|^2 + |\varphi_r|^2$ thể hiện chùm sáng bậc 0, $\varphi_0(x, y) \varphi_r^* e^{-jk_0 \sin \theta x}$ thể hiện chùm sáng bậc 1 và $\varphi_0^* e^{jk_0 \sin \theta x}$ thể hiện chùm sáng bậc -1.

Phổ góc của $\Gamma(x, y)$ có thể được viết bởi biến đổi Fourier là [17]:

$$\mathcal{F}(k_x, k_y) = FFT[\Gamma(x, y)] \quad (3)$$

Trong đó, k_x và k_y là tần số không gian theo phương Ox và Oy tương ứng, FFT là phép biến đổi Fourier.

Thực hiện biến đổi Fourier ngược thành phần phổ bậc 1 hoặc -1 của phổ thu được sẽ tái tạo được trường phức ban đầu:

$$\hat{F}(X, Y) = FFT^{-1}\{Filt[\mathcal{F}(k_x, k_y)]\} \quad (4)$$

Trong đó, $Filt$ là hàm lọc lấy phổ bậc 1 hoặc -1 và FFT^{-1} là phép biến đổi Fourier ngược.

Việc lọc phổ này sẽ loại bỏ được nhiễu nền hoặc nhiễu kết hợp không mong muốn khi tái tạo ảnh Hologram [18, 19]. Khi k_x và k_y nhỏ thì nhiễu được lọc tốt hơn nhưng nếu nhỏ quá sẽ làm mất thông tin của đối tượng.

Ảnh cường độ sau khi tái tạo thu được [20]:

$$I = |\hat{F}(X, Y)|^2 \quad (5)$$

Bản đồ pha của đối tượng được tái tạo là [20]:

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{Im[\hat{F}]}{Re[\hat{F}]} \quad (6)$$

Trong đó, $Im[.]$ và $Re[.]$ là phần ảo và phần thực của $\hat{F}(X, Y)$.

Chiều cao của bề mặt đối tượng đo theo Oz được tính theo công thức [21]:

$$d_z(x, y) = \frac{\varphi(x, y)}{2\pi(n - n_0)} \lambda \quad (7)$$

Trong đó, λ là bước sóng, n là chiết suất của đối tượng và n_0 là chiết suất của môi trường.

Giá trị pha thu được $|\varphi(x, y)| \leq \pi$ nên $|d_z(x, y)| \leq \lambda/2$. Để đo được các bề mặt có chiều cao lớn hơn $\lambda/2$ cần tiến hành mở khóa pha $\varphi(x, y)$ [22].

Từ công thức 5 và công thức 7 thấy rằng việc tái tạo ảnh Hologram trên cơ sở sử dụng biến đổi Fourier sẽ tái tạo được ảnh cường độ và ảnh pha của đối tượng. Từ ảnh cường độ sẽ xác định được vị trí của đối tượng trong mặt phẳng OXY và từ ảnh pha tính được chiều cao của đối tượng (theo chiều Oz), do đó, bề mặt đối tượng đo sẽ được tái tạo trong không gian 3D.

Độ phân giải ngang (theo phương OX và OY) phụ thuộc vào độ phân giải của đầu thu được tính theo công thức $\Delta x = \lambda d/N_x$ và $\Delta y = \lambda d/N_y$ [23]. Trong đó, N_x và N_y là kích thước theo phương Ox và Oy của đầu thu, d là khoảng cách từ vật đến đầu thu hoặc từ đầu thu đến ảnh tái tạo được $d' = d \times M$ trong trường hợp sử dụng kính hiển vi có độ phóng đại là M . Do đó, khoảng cách d cần đáp ứng $d \geq \max\left[\frac{N_x p_x}{\lambda}, \frac{N_y p_y}{\lambda}\right]$ [23]. Trong đó, p_x và p_y là kích thước pixel theo hai chiều Ox , Oy của đầu thu. Phạm vi đo phụ thuộc vào kích thước của đầu thu và hệ số phóng đại M của vật kính hiển vi sử dụng.

Độ phân giải theo chiều cao (Oz) có thể lên đến hàng nanomet và phụ thuộc vào một số thông số kết cấu của các linh kiện quang học được sử dụng và có thể kiểm soát được [24] như: Kích thước nguồn sáng (lỗ chiếu sáng- d_{PH}) sẽ quyết định đến tần số không gian và góc chiếu sáng của nguồn sáng; Khẩu độ số (NA) được xác định bằng kích thước và vị trí của phương tiện ghi (CCD, CMOS); Độ phân giải của phương tiện ghi sẽ quyết định đến độ phân giải khi ghi lại vân giao thoa; Bước sóng tạo giao thoa.

Góc lớn nhất giữa chùm sáng tham chiếu và sóng tán xạ từ đối tượng quan sát được xác định theo công thức $\theta_{max} = 2\arcsin(\lambda/(4 \times \max[p_x, p_y]))$ [25]. Như vậy, góc lớn nhất giữa sóng tham chiếu và chùm sóng vật phụ thuộc vào độ phân giải của đầu thu.

3. THỰC NGHIỆM VÀ KẾT QUẢ

3.1. Xây dựng thí nghiệm

Bằng việc sử dụng nguồn sáng là Led chiếu sáng (nguồn sáng có chiều dài kết hợp nhỏ) nhiều kết hợp trong kính hiển vi ba chiều kỹ thuật số sẽ được giảm xuống [26]. Tuy nhiên, trong hệ thống được đề xuất, việc sử dụng nguồn sáng là Led không đưa lại kết quả cao do chiều dài kết hợp nhỏ dẫn đến khó hiệu chỉnh đối với mẫu sử dụng có chiều cao mẫu lớn và bề mặt có tính phản xạ. Do đó, nguồn sáng chuẩn được lựa chọn là laser He-Ne ($\lambda=632,8$ nm) có độ dài kết hợp vào khoảng 30 cm [27]. Độ dài kết hợp này đảm bảo cho quá trình bố trí, hiệu chỉnh hệ thống nhưng nhược điểm sẽ tạo ra các vân giao thoa không mong muốn khi thu nhận ảnh.

Đường kính của lỗ chiếu sáng khi sử dụng nguồn chiếu sáng laser thường có kích thước cỡ bước sóng để đảm bảo tính kết hợp và mặt sóng cầu. Đường kính này tăng sẽ làm giảm tính kết hợp của sóng ánh sáng và giảm góc chiếu sáng của bậc 0 được sử dụng để tạo sự kết hợp trong quá trình giao thoa. Để tăng được độ phân giải cần giảm đường kính lỗ chiếu sáng. Lỗ chiếu sáng có nhiệm vụ giữ lại bậc 0 của chùm Gaussian để đảm bảo cho chùm tia tạo ra không bị thay đổi cường độ không gian. Tại lỗ chiếu sáng chỉ có bậc 0 của chùm Gaussian được truyền qua. Kích thước của lỗ chiếu sáng hay nguồn điểm được xác định theo công thức [28]: $d_{PH} = \frac{\lambda f_{MO}}{r_l}$. Trong đó: λ là bước sóng nguồn sáng; f_{MO} là tiêu cự của vật kính hội tụ (thường là vật kính hiển vi) dùng để hội tụ chùm sáng; r_l là bán kính chùm tia vào được xác định tại điểm $1/e^2$. Vật kính hiển vi được sử dụng có độ phóng đại 60x và tiêu cự $f_{MO}=2,8$ mm. Nguồn laser He-Ne có bước sóng $\lambda=632,8$ nm có đường kính chùm tia $d=0,46$ mm tại điểm $1/e^2$. Đường kính lỗ được xác định là $d_{PH} \approx 7,7$ μm . Thông thường, đường kính của lỗ được chọn lớn hơn khoảng 30% giá trị tính được tức là $d_{PH} = 10$ μm [29]. Lúc này, bán kính chùm tia sau khi chuẩn trực là $r_O = 8,2$ mm với vật kính chuẩn trực có tiêu cự $f_{CL}=100$ mm. Loại đầu thu được sử dụng có kích thước đầu thu là 1/3 inches (đường chéo là $\Phi 6$ mm) nên các thông số trên đáp ứng được yêu cầu sử dụng.

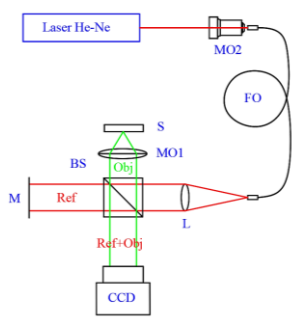
Sơ đồ thí nghiệm được xây dựng như trên hình 3 theo nguyên lý của kỹ thuật Off-axis Hologram được áp dụng cho đối tượng đo có bề mặt phản xạ. Nguồn sáng tham chiếu được tạo ra từ laser He-Ne kết hợp với vật kính hiển vi (MO_2) được hội tụ vào sợi quang (FO). FO có đường kính 10 μm đóng vai trò như lỗ chiếu sáng, có một đầu đặt tại tiêu điểm của MO_2 , một đầu đặt tại tiêu điểm của vật kính chuẩn trực (L). Ánh sáng phát ra từ FO được L tạo ra chùm sóng ánh sáng chuẩn. Chùm sáng này được lăng kính chia (BS) chia thành hai chùm: một chùm phản xạ vuông góc đi đến vật kính hiển vi (MO_1), hội tụ và tán xạ trên bề mặt đối tượng đo (S) được đặt tại tiêu diện của MO_1 sau đó đi trở lại BS được gọi là chùm sóng vật (Obj); một chùm đi qua BS đến gặp gương chuẩn (M) thì phản xạ lại BS được gọi là chùm sóng tham chiếu (Ref). Góc nghiêng của M tạo ra góc lệch θ giữa chùm sóng vật và chùm tham chiếu. Chùm sóng vật và sóng tham chiếu giao thoa với nhau tạo thành ảnh Hologram và được đầu thu (CCD) thu nhận. Đầu thu được kết nối với máy tính để tái tạo và xử lý hình ảnh Hologram thu được. Các thành phần này được bố trí cụ thể trên bàn quang học chống rung LTB4-1208 như hình 4 với bộ gá và bộ dịch chuyển ba chiều phù hợp với yêu cầu hiệu chỉnh từng thành phần trong quá trình thí nghiệm.

Camera được sử dụng là CS165MU1 có số điểm ảnh 1440 x 1080, kích thước điểm ảnh là 3,45 μm x 3,45 μm . Từ đó, độ phân giải ngang tối đa đạt được tương ứng theo hai chiều O_x , O_y với $d = 100$ mm, vật kính hiển vi có độ phóng đại $M = 40\times$ có $NA = 0,65$ lần lượt là 0,22 μm và 0,3 μm . Độ phân giải này nhỏ hơn độ phân giải của vật kính hiển vi nên độ phân giải ngang của hệ là độ phân giải của vật kính hiển vi theo Rayleigh là 0,6 μm . Phạm vi đo theo trục O_x và O_y lần lượt là 85 μm và 64 μm .

Quá trình xử lý hình ảnh được mô tả tóm tắt như sau: ảnh thu được từ CCD được biến đổi Fourier theo công thức (3), chọn thành phần phổ bậc 1 (hoặc -1) và dịch chuyển vào tâm và biến đổi ngược vùng này theo công thức (4), ảnh tái tạo cường độ được tính theo công thức (5) và bản đồ pha theo công thức (6), chiều cao bề mặt được tính theo công thức (7).

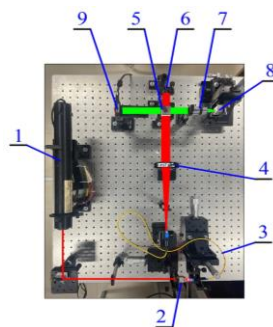
Một số nguồn gây ra độ không đảm bảo đo của hệ thống có thể kể đến như: Chất lượng chùm tia laser được tạo ra; Độ phẳng và độ đồng nhất của chùm sóng ánh sáng chuẩn trực được tạo bởi sợi quang và thấu kính chuẩn trực; Ảnh hưởng của tác động bên ngoài như nhiệt độ, độ ẩm, độ rung; Sai số gây ra bởi các linh kiện quang học (gương, lăng kính chia, vật kính hiển vi). Ngoài ra, còn có nhiều giao thoa không mong muốn được tạo ra do độ dài kết hợp của nguồn laser He-Ne lớn hơn khoảng cách giữa các thành phần được bố trí.

Chất lượng của chùm sáng (nguyên nhân 1 và 2) được kiểm tra bằng thiết bị đo bề mặt sóng WFS31-5C - Shack-Hartmann WFS đảm bảo cho chùm sóng luôn là phẳng. Thí nghiệm được bố trí trên bàn quang học chống rung LTB4-1208 và trong điều kiện ổn định về nhiệt độ, độ ẩm của phòng nên phần nào khắc phục được nguyên nhân thứ 3. Ảnh hưởng của nhiễu nền trong đó có nhiễu kết hợp được khắc phục bằng cách lọc phổ theo công thức 4.



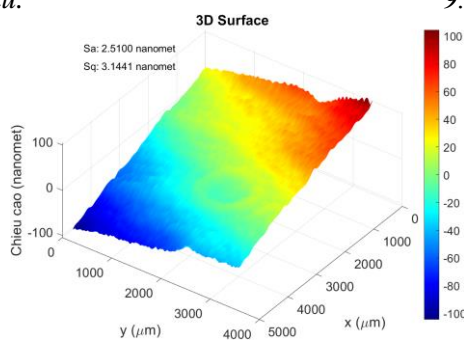
Hình 3. Sơ đồ thí nghiệm.

MO1, MO2: Vật kính hiển vi; FO: Sợi quang;
L: Vật kính chuẩn trực; BS: Lăng kính chia
chùm tia; M: Gương; S: Đối tượng đo;
CCD: Đầu thu.



Hình 4. Bố trí thí nghiệm.

1. Laser He-Ne; 2. Vật kính hiển vi 60x; 3.
Sợi quang; 4. Vật kính; 5. Lăng kính BS; 6.
Gương; 7. Vật kính hiển vi 40x; 8. Mẫu đo;
9. Đầu thu

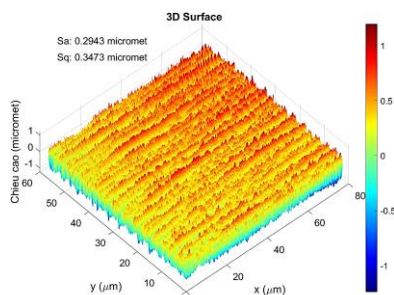


Hình 5. Kết quả đo gương phẳng.

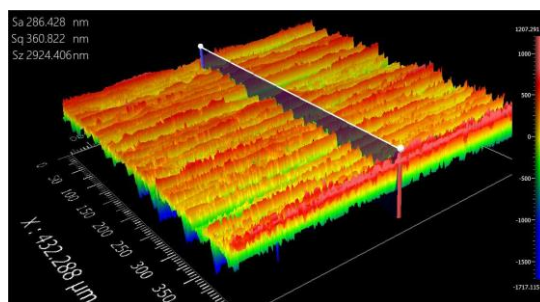
Gương phẳng được thay vào vị trí của đối tượng cần đo để hiệu chuẩn hệ thống để khắc phục nguyên nhân sai số và các yếu tố không đảm bảo đo khác. Bản đồ pha thu được từ gương phẳng được bù vào kết quả thu được khi đo. Hình 5 thể hiện kết quả đo 3D bề mặt gương phẳng có độ nhám $Sa = 2,92 \text{ nm}$ và $Sq = 3,64 \text{ nm}$. Các giá trị này ở cấp độ nanomet nên có thể được coi là chấp nhận được. Đây là giá trị của hai gương được bố trí giống nhau nên thực tế sai số khi sử dụng một gương sẽ nhỏ hơn giá trị trên.

3.2. Kết quả thực nghiệm

Hình 6 thể hiện kết quả đo mẫu nhám là $Sa = 0,2943 \text{ μm}$; $Sq = 0,3473 \text{ μm}$. Kết quả được so sánh với thiết bị đo bề mặt ba chiều ZeGage™ Pro (Zygo) cho kết quả là $Sa = 0,2864 \text{ μm}$ và $Sq = 0,3608 \text{ μm}$ (hình 7). Kết quả đo tương đương với kết quả đo bằng thiết bị ZeGage™ Pro có độ phân giải dọc trục 0,15 nm, độ phân giải ngang 0,52 μm sử dụng đầu thu 1 triệu điểm ảnh dựa trên kỹ thuật giao thoa ánh sáng trắng. Lập lại phép đo xác định được sai lệch $\pm 8 \text{ nm}$ với hệ số phủ bằng 3.



Hình 6. Kết quả đo nhám.



Hình 7. Kết quả đo mẫu nhám bằng thiết bị đo bề mặt ba chiều ZeGage™ Pro.

Có sự sai khác này là do vị trí, kích thước vùng đo có thể khác nhau giữa các lần đo cũng và còn tồn tại một số nguyên nhân như: Tồn tại nhiễu mà quá trình lọc phổ không lọc triệt để được và việc chọn vùng phổ là không giống nhau giữa các lần đo; Bù pha bằng bản đồ pha của gương phẳng chỉ là một phần của các biện pháp bù pha trong kỹ thuật Hologram.

4. KẾT LUẬN

Đo lường 3D bề mặt áp dụng kỹ thuật Holography và phương pháp biến đổi Fourier đã được xác minh bằng thực nghiệm với sai khác đạt cấp độ nanomet so với phương pháp đo bằng giao thoa ánh sáng trắng. Phương pháp được đề xuất có kết cấu hệ đơn giản, dễ dàng triển khai ở các phòng thí nghiệm thông thường. Kết quả đạt được của nghiên cứu đã chứng minh cho những ưu điểm vượt trội của kỹ thuật Hologram là một kỹ thuật đo toàn trường, không tiếp xúc, không phá hủy mẫu và không cần đến sự dịch chuyển vi cơ khí. Tuy nhiên, kết quả nghiên cứu chưa tốt như kỳ vọng do còn tồn tại nhiều nguyên nhân được xác định là bản chất của hệ thống như nhiễu kết hợp, sai sóng cũng như ảnh hưởng của các yếu tố tác động của môi trường. Điều này thúc đẩy nghiên cứu tiếp theo để giảm thiểu các ảnh hưởng này, một kết cấu đơn giản được đề xuất là hệ đo có chùm chiếu đến và phản xạ từ đối tượng đo là chùm song song để khắc phục các sai sóng tổng hợp trong các nghiên cứu tiếp theo. Ngoài ra, thuật toán mở khóa pha để đo chiều cao dọc trục lớn hơn $\lambda/2$ và đánh giá về không đảm bảo đo là một vấn đề không thể thiếu trong các nghiên cứu tiếp theo này. Kết quả của nghiên cứu đã đặt nền móng cho các hướng nghiên cứu mới có thể đánh giá được chất lượng bề mặt của các linh kiện quang học sau gia công, chiều dày lớp mạ.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Bách khoa Hà Nội trong đề tài mã số T2023-PC-009.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. B. Dong, Y. Ma, Z. Ren, and C. Lee, "Recent progress in nanoplasmonics-based integrated optical micro/nano-systems" J. Phys. Appl. Phys, **Vol. 53**, No. 21, pp. 213001, (2020).
- [2]. T. Namazu, "Mechanical Property Measurement of Micro/Nanoscale Materials for MEMS: A Review" IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, **Vol. 18**, No. 3, pp. 308–324, (2023).
- [3]. Y. Li and M. Hong, "Parallel Laser Micro/Nano-Processing for Functional Device Fabrication," Laser & Photonics Reviews, **Vol. 14**, No. 3, pp. 1900062, (2020).
- [4]. A. G. Marrugo, F. Gao, S. Zhang, "State-of-the-art active optical techniques for three dimensional surface metrology: a review". Journal of the Optical Society of America A. **Vol. 37**, No. 9, (2020).
- [5]. Maged Aboali, Nurulfajar Abd Manap, Abd Majid Darsono, and Zulkalnain Mohd Yusof, "Review on Three Dimensional (3-D) Acquisition and Range Imaging Techniques", International Journal of Applied Engineering Research, **Vol. 12**, Number 10, pp. 2409-2421, (2017).
- [6]. Akhtar et al., "Three-dimensional atomic force microscopy for ultra-high-aspect-ratio imaging," Applied Surface Science, **Vol. 469**, pp. 582–592, (2019).
- [7]. B. Voigtländer, "Atomic Force Microscopy", NanoScience and Technology. Cham: Springer International Publishing, (2019).
- [8]. D. Lange, H. Jennings, and S. Shah, "Analysis of Surface Roughness Using Confocal Microscopy" Journal of Materials Science, **Vol. 28**, pp. 3879–3884, (1993).

- [9]. X. Teng, F. Li, and C. Lu, "Visualization of materials using the confocal laser scanning microscopy technique," Chem. Soc. Rev., **Vol. 49**, No. 8, pp. 2408–2425, (2020).
- [10]. D. Elliott, "Confocal Microscopy: Principles and Modern Practices," Current Protocols in Cytometry, **Vol. 92**, No. 1, pp. 68, (2020).
- [11]. Y. Huang, J. Gao, L. Zhang, H. Deng, and X. Chen, "Fast template matching method in white-light scanning interferometry for 3D micro-profile measurement," Appl. Opt., AO, **Vol. 59**, No. 4, pp. 1082–1091, (2020).
- [12]. Q. Vo, F. Fang, X. Zhang, and H. Gao, "Surface recovery algorithm in white light interferometry based on combined white light phase shifting and fast Fourier transform algorithms," Appl. Opt., AO, **Vol. 56**, No. 29, pp. 8174–8185, (2017).
- [13]. Gabor, D, "A new microscopic principle". Nature, **Vol 161**, pp. 777–778, (1948).
- [14]. Viktor Petrov, Anastsiya Pogoda, Vladimir Sementin, Alexander Sevryugin, Egor Shalymov, Dmitrii Venediktov and Vladimir Venediktov, "Review Advances in Digital Holographic Interferometry", Imaging, **Vol. 8**, pp. 196, (2022).
- [15]. P. Hariharan, "Basics of Holography", Cambridge University Press, Cambridge, pp.6, (2002).
- [16]. Sina Baya, Mustapha Bahich, and Lahsen Boulmane, "Comparative study of phase retrieval algorithms for surface shape measurement by optical profilometry," Opt. Continuum, **Vol. 3**, pp. 859-870, (2024).
- [17]. Y. Liu, Z. Wang, J. Li, J. Gao, and J. Huang, "Phase based method for location of the centers of side bands in spatial frequency domain in off-axis digital holographic microscopy," Optics and Lasers in Engineering, **Vol. 86**, pp. 115–124, (2016).
- [18]. Y. Liu, Z. Wang, and J. Huang, "Recent Progress on Aberration Compensation and Coherent Noise Suppression in Digital Holography," Applied Sciences, **Vol. 8**, No. 3, (2018).
- [19]. U. Schnars and W. Juptner, "Digital Holography", Springer, p. 47-48, (2005).
- [20]. E. Cuche, F. Bevilacqua, and C. Depeursinge, "Digital holography for quantitative phase-contrast imaging," Opt. Lett. **Vol. 24**, p. 291–293, (1999).
- [21]. Su and W. Chen, "Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review," Optics and Lasers in Engineering, **Vol. 42**, No. 3, pp. 245–261, (2004).
- [22]. E. Cuche, P. Marquet, and C. Depeursinge, "Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms", App.Opt. 38, (1999).
- [23]. Myung K Kim, "Principles and techniques of digital holographic microscopy", Journal of Photonics for Energy 1(1):8005.
- [24]. T. Kreis, "Holographic Interferometry: Principles and Methods", Springer, p.64, (1996).
- [25]. Yuanbo Deng & Daping Chu, "Coherence properties of different light sources and their effect on the image sharpness and speckle of holographic displays", Scientific Reports, **Vol. 7**, 5893, (2017).
- [26]. https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=10776.
- [27]. Hecht, E. "Optics, 5th ed", Pearson Education India: London, UK; pp. 398-456, (2002).
- [28]. https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=14350

ABSTRACT

3D measurement of surface profile using Holography technique and Fourier transform method

Holography has an important role in the field of 3D surface measurement due to its ability to simultaneously provide intensity and phase information of the measured surface with a single image. In this article, a computational and experimental method for 3D surface reconstruction of rough samples using Holography technique is proposed. Compared with white light interferometry, the proposed method has high stability due to no micro-displacement, fast measurement speed, and surface information extracted by a single frame and axial resolution reaching nanometer level. Fourier transform combined with noise filtering techniques is used to improve the accuracy of 3D surface measurement. The rough surface $R_a = 0.2943 \mu\text{m}$ is successfully constructed by the proposed method with a deviation of $\pm 8 \text{ nm}$ with a coverage factor of 3 compared with the measurement on white light interferometry. This study can be applied to high-precision 3D surface measurement, optical components, and micro-electromechanical structures.

Keywords: 3D Measurement; Holography; Fourier transform.