

BỘ QUỐC PHÒNG
HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

PHAN NGUYỄN NHUỆ

**NGHIÊN CỨU PHƯƠNG PHÁP VÀ XÂY DỰNG MÔ HÌNH
THIẾT BỊ ĐO CẤU TRÚC HÌNH HỌC BA CHIỀU BỀ MẶT
TẾ VI CỦA CHI TIẾT QUANG CƠ THEO NGUYÊN LÝ
GIAO THOA ÁNH SÁNG TRẮNG**

Chuyên ngành: Kỹ thuật cơ khí

Mã số: 9.52.01.03

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI – NĂM 2020

CÔNG TRÌNH ĐƯỢC HOÀN THÀNH TẠI
HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ - BỘ QUỐC PHÒNG

Người hướng dẫn khoa học:

PGS.TS Lê Hoàng Hải

PGS.TS Dương Chí Dũng

Phản biện 1: PGS.TS Nguyễn Thị Phương Mai

Đại học BK Hà Nội

Phản biện 2: PGS.TS Đinh Văn Trung

Viện HLKH&CN VN

Phản biện 3: TS. Phạm Hồng Tuấn

Bộ Khoa học và Công nghệ

Luận án được bảo vệ tại Hội đồng đánh giá luận án cấp Học viện theo quyết định số 4588/ QĐ-HV ngày 23 tháng 12 năm 2020 của Giám đốc Học viện Kỹ thuật Quân sự, họp tại Học viện Kỹ thuật Quân sự vào hồi ... giờ ... ngày tháng năm 2021

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Học viện Kỹ thuật Quân sự
- Thư viện Quốc gia

A. GIỚI THIỆU LUẬN ÁN

1. Tính cấp thiết của đề tài luận án

Cấu trúc hình học ba chiều (3D) của bề mặt có vai trò quan trọng đến tính chất, chức năng của các thành phần và của hệ thống quang, cơ, điện tử. Thống kê cho thấy 90% các lỗi kỹ thuật có liên quan đến các bề mặt do cơ chế tiếp xúc mài mòn hay do các sai lệch trên bề mặt gây ra. Do đó, cần phải tìm phương pháp đáng tin cậy để đo các thông số hình học 3D và kiểm tra chất lượng bề mặt. Việc đo lường cấu trúc hình học 3D bề mặt là rất cần thiết để đánh giá chất lượng chi tiết trong sản xuất hoặc trong kiểm tra sản phẩm. Ngoài việc cung cấp thông tin đánh giá chất lượng sản phẩm, phép đo cấu trúc 3D bề mặt có ý nghĩa trong việc nghiên cứu thay đổi công nghệ chế tạo, qui trình sản xuất, phân tích định tính, định lượng các tham số cấu trúc bằng dữ liệu 3D.

Những năm gần đây, ngành Quang học được quan tâm phát triển cả về con người và thiết bị, đặc biệt về công nghệ gia công, công nghệ màng mỏng, nghiên cứu vật liệu... Nhu cầu đo lường, kiểm tra chất lượng bề mặt các chi tiết quang học rất cao. Vì vậy, đề tài **“Nghiên cứu phương pháp và xây dựng mô hình thiết bị đo cấu trúc hình học ba chiều bề mặt bề mặt tế vi của chi tiết quang cơ theo nguyên lý giao thoa ánh sáng trắng”** có tính cấp thiết cao cả về khía cạnh ứng dụng và khía cạnh khoa học - công nghệ, đáp ứng nhu cầu trước mắt và cũng phù hợp với xu hướng phát triển các hệ thống đo lường quang học hiện đại.

2. Mục đích và nhiệm vụ nghiên cứu của luận án

Mục đích chính của luận án là nghiên cứu phát triển mô hình thiết bị đo cấu trúc hình học ba chiều của bề mặt tế vi chi tiết quang, cơ trên cơ sở sử dụng giao thoa ánh sáng trắng (WLI).

Nhiệm vụ nghiên cứu cụ thể:

- Nghiên cứu các phương pháp đo cấu trúc 3D bề mặt;
- Phân tích lựa chọn sơ đồ hoạt động và các thành phần, xây dựng mô hình thiết bị;
- Nghiên cứu thuật toán tái tạo cấu trúc hình học 3D bề mặt;
- Thực nghiệm đo đạc, xử lý kết quả.

3. Đối tượng nghiên cứu của luận án

Đối tượng nghiên cứu chính của luận án là phương pháp và thiết bị đo lường cấu trúc hình học 3D của bề mặt chi tiết quang, cơ.

4. Phạm vi nghiên cứu

- Xây dựng mô hình thiết bị đo cấu trúc hình học 3D bề mặt trong phòng thí nghiệm theo kỹ thuật WLI;

- Thiết bị dùng để đo cấu trúc hình học 3D tế vi của bề mặt chi tiết quang, cơ có mẫu mô bề mặt cỡ nanomet đến vài micromet.

5. Phương pháp nghiên cứu

Luận án kết hợp phương pháp nghiên cứu tính toán lý thuyết và thực nghiệm.

6. Cấu trúc của luận án

Luận án bao gồm: phần mở đầu, bốn chương, kết luận, tài liệu tham khảo và phụ lục.

Chương 1: Đo cấu trúc hình học bề mặt, những tiến bộ và tồn tại

Chương 2: Đo cấu trúc hình học ba chiều bề mặt bằng giao thoa ánh sáng trắng - cơ sở lý thuyết và kỹ thuật xử lý

Chương 3: Xây dựng mô hình thiết bị đo cấu trúc hình học ba chiều bề mặt bằng giao thoa ánh sáng trắng

Chương 4: Một số kết quả đo cấu trúc hình học ba chiều bề mặt sử dụng mô hình thiết bị

B. NỘI DUNG CHÍNH CỦA LUẬN ÁN

Chương 1

ĐO CẤU TRÚC HÌNH HỌC BỀ MẶT, NHỮNG TIẾN BỘ VÀ TỒN TẠI

Chương này trình bày tổng quan về lĩnh vực đo cấu trúc hình học bề mặt bao gồm: Lịch sử phát triển, các khái niệm cơ bản về đo lường cấu trúc và các đặc tính bề mặt. Các phương pháp đo cấu trúc hình học 3D của bề mặt chi tiết được thảo luận, bao gồm cả phương pháp tiếp xúc và không tiếp xúc.

1.1. Tổng quan về đo cấu trúc hình học bề mặt

Đo cấu trúc hình học bề mặt là đo lường các đặc điểm hình học tế vi trên bề mặt (Jiang 2007) [79] và được phân tách thành hai giai đoạn:

- Giai đoạn thu nhận dữ liệu cấu trúc bề mặt bằng thiết bị;
- Giai đoạn đặc tính hóa bề mặt.

1.2. Sự phát triển thiết bị đo lường cấu trúc bề mặt

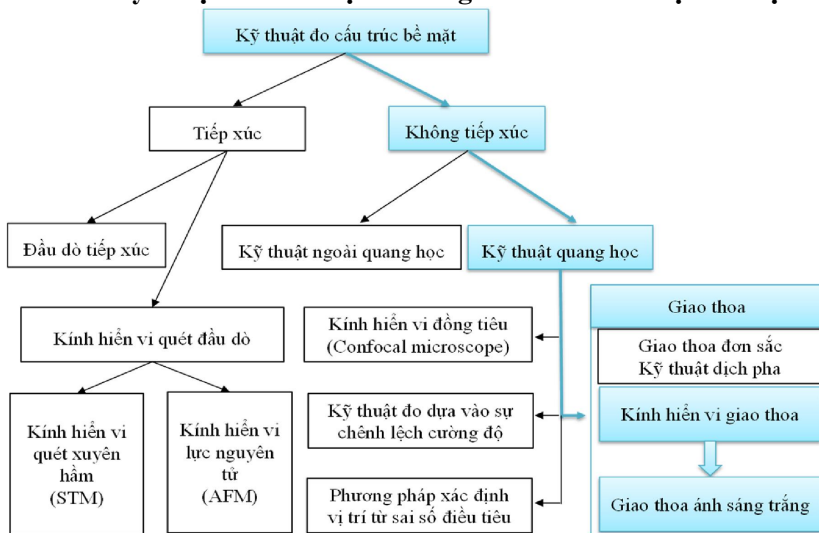
Do các chi tiết được chế tạo ngày càng chính xác, cấu trúc bề mặt càng nhỏ đi, vượt qua khả năng đánh giá định tính bằng phương pháp trực quan nên cần phát triển các thiết bị có thể đo cấu trúc hình học bề mặt. Năm 1919, Tomlinson (Mỹ) phát triển thiết bị sử dụng gương và điện kế để phóng đại cấu trúc bề mặt lên 30 lần [79]. Khoảng năm 1933, thiết bị đo bằng phương pháp tiếp xúc bắt đầu được sử dụng. Năm 1977, Garatt phát triển đầu dò sử dụng giao thoa ánh sáng đầu tiên. Đến nay, một loạt các kỹ thuật đã được phát triển để đo biên dạng bề mặt như: STM, AFM, SEM, TEM, kính hiển vi đồng tiêu, WLI...

1.3. Cấu trúc hình học bề mặt

Đầu tiên, cấu trúc hình học bề mặt được đánh giá bằng một giá trị. Sau đó, cấu trúc bề mặt được đặc tính hóa bằng biểu đồ biên dạng

và dữ liệu cấu trúc 3D kết hợp với các bộ lọc. Đến nay có hàng trăm thông số bề mặt được sử dụng trong các tiêu chuẩn quốc tế, quốc gia.

1.4. Các kỹ thuật và thiết bị đo lường cấu trúc hình học bề mặt



Hình 1.3: Phân loại kỹ thuật đo cấu trúc hình học bề mặt

1.4.1. Kỹ thuật đo cấu trúc hình học bề mặt bằng phương pháp tiếp xúc

Bao gồm: Đầu dò tiếp xúc và kính hiển vi quét đầu dò.

1.4.2. Kỹ thuật đo cấu trúc hình học bề mặt bằng phương pháp không tiếp xúc

Kính hiển vi điện tử (SEM, TEM);

Kính hiển vi đồng tiêu;

Kỹ thuật đo dựa vào sự chênh lệch cường độ;

Kỹ thuật xác định vị trí từ sai số điều tiêu;

Kỹ thuật giao thoa

1.4.3. So sánh các loại thiết bị đo cấu trúc hình học bề mặt

Mỗi thiết bị đo cấu trúc hình học bề mặt có phạm vi và độ phân giải đo khác nhau. Các dụng cụ đo theo phương pháp tiếp xúc phù hợp

cho các phép đo phạm vi lớn. Các kỹ thuật quang học có các phạm vi đo và độ phân giải tương đối cao. Trong khi đó, họ thiết bị AFM đạt độ phân giải cao nhất nhưng phạm vi đo lại rất hạn hẹp.

1.5. Kết luận chương 1

Chương này đã trình bày tổng quan về đo lường cấu trúc hình học 3D bề mặt. Một số kỹ thuật đo cấu trúc hình học 3D bề mặt đã được xem xét và so sánh, bao gồm đại diện cho cả phương pháp tiếp xúc và không tiếp xúc. Qua tìm hiểu về các kỹ thuật đo cấu trúc hình học 3D bề mặt chi tiết, phương pháp WLI đã được lựa chọn làm phương pháp chính để xây dựng thiết bị.

Chương 2

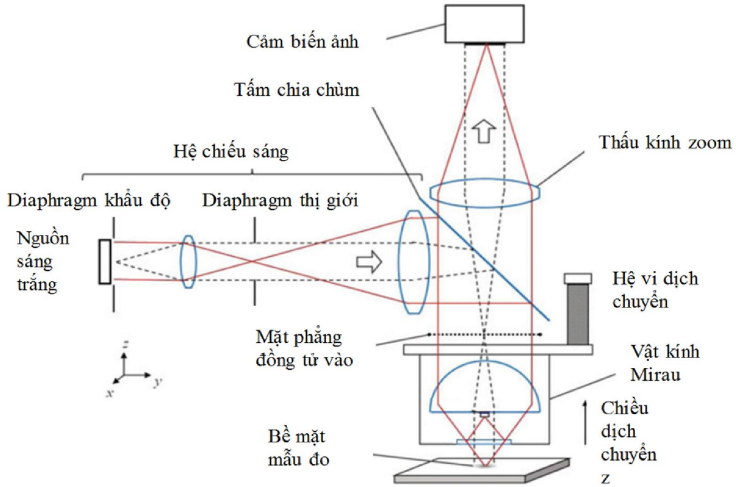
ĐO CẤU TRÚC HÌNH HỌC BA CHIỀU BỀ MẶT BẰNG GIAO THOA ÁNH SÁNG TRẮNG - CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ KỸ THUẬT XỬ LÝ

2.1. Giới thiệu chung về WLI

Phương pháp WLI được sử dụng hiệu quả trong các thiết bị đo cấu trúc 3D bề mặt chi tiết được phát triển đầu tiên bởi Davidson (1987) (với tên gọi: Đầu dò ghi ảnh kết hợp sử dụng sơ đồ Linnik [41]). Kino, Lee (1990) [27, 90] có công bố tiếp theo về hệ thống WLI có tên gọi kính hiển vi quét kết hợp CSI (phát triển từ giao thoa kế Leitz Mirau của Bhusan (1985) [15, 24], sử dụng vật kính hiển vi Mirau). Sau đó là một loạt các nghiên cứu về WLI với các biến thể khác nhau [46, 50, 51, 68, 89, 158].

2.2. Nguyên lý hoạt động của WLI

Sơ đồ quang học của hệ WLI được thể hiện ở Hình 2.1. Hệ WLI sử dụng nguồn sáng trắng và vật kính hiển vi giao thoa. Ý tưởng chính của WLI là sử dụng hình ảnh giao thoa cục bộ tạo ra các đường đồng mức (đồng độ cao) khi so sánh bề mặt mẫu đo với mặt phẳng chuẩn.

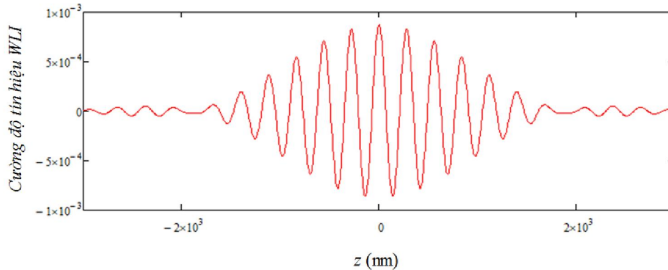


Hình 2.1: Sơ đồ quang học của giao thoa kế ánh sáng trắng

2.3. Nguyên lý tạo tín hiệu giao thoa

Cường độ tín hiệu WLI được tính toán theo công thức (2.7) và được thể hiện ở Hình 2.4.

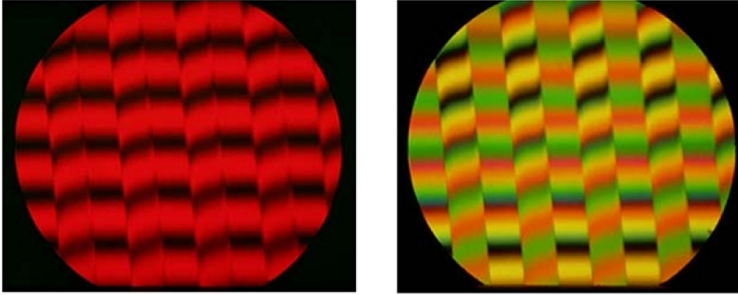
$$I_{AB}(z) = 4\pi AB |U|^2 \int_{\text{bandwidth } 0}^{\theta_0} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \times \left\{ \cos \left[\frac{4\pi}{\lambda} (z - z_0) \cos \theta + \phi \right] \sin \theta \cos \theta d\theta \right\} d\lambda \quad (2.7)$$



Hình 2.4: Kết quả tính toán tín hiệu WLI sử dụng vật kính Mirau

2.4. Hình ảnh WLI

Khác với giao thoa ánh sáng đơn sắc, WLI chỉ xuất hiện trong phạm vi vài micromet hoặc vài chục micromet xung quang vị trí $OPD = 0$. (Hình 2.5)



(a)

(b)

Hình 2.5: Vân giao thoa của cách tử thu được khi sử dụng (a) nguồn sáng đỏ, (b) nguồn ánh sáng trắng [108]

2.5. Xử lý tín hiệu WLI

Cấu trúc hình học 3D của đối tượng được dựng lại bằng cách xác định vị trí đỉnh của các đường bao tín hiệu giao thoa ở mỗi điểm đã được ghi lại trong quá trình quét dọc trục. Một số kỹ thuật xử lý tín hiệu WLI điển hình:

2.5.1. Phương pháp xác định đường bao tín hiệu

2.5.2. Phương pháp trọng tâm

2.5.3. Phương pháp ước lượng pha

2.5.4. Phương pháp kết hợp kỹ thuật ước lượng pha và kỹ thuật xác định đường bao biến điệu

2.5.5. Phân tích trong miền tần số

2.6. Một số vấn đề trong kỹ thuật đo kiểm bằng WLI

Mặc dù có những lợi thế đáng kể, WLI vẫn có một vài hạn chế. Những hạn chế chủ yếu phát sinh từ sự tương tác giữa ánh sáng với bề mặt mẫu hoặc do phương pháp tái tạo cấu trúc hình học 3D bề mặt. Sự phát triển của kỹ thuật WLI chủ yếu dựa vào việc giải quyết các hạn chế này đồng thời nâng cao độ chính xác và tốc độ đo. Có thể kể đến một số vấn đề liên quan đến nội dung giải quyết của luận án bao gồm:

2.6.1. Sai số thứ tự vân giao thoa

2.6.2. Ảnh hưởng của vật liệu mẫu đo đến WLI

2.6.3. Tăng độ phân giải của WLI

2.6.4. Vấn đề nguồn sáng trong WLI

2.7. Kết luận chương 2

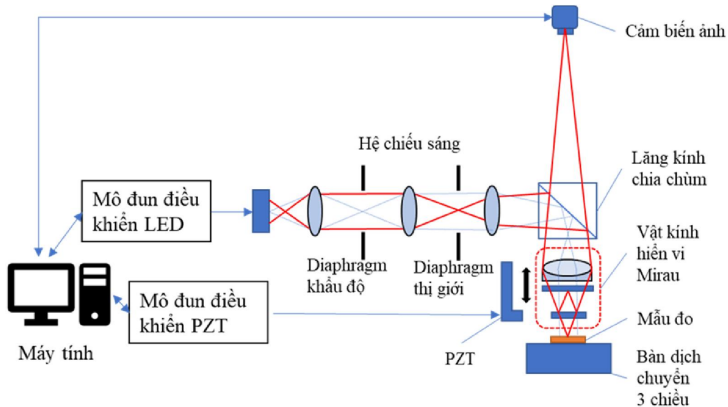
Trong chương này, nguyên lý hoạt động và thành phần cấu tạo của WLI đã được thảo luận chi tiết bao gồm nguyên lý tạo tín hiệu WLI, hình ảnh giao thoa và các kỹ thuật xử lý tín hiệu. Cuối chương, một số vấn đề trong kỹ thuật WLI có liên quan đến luận án được đề cập.

Chương 3

XÂY DỰNG MÔ HÌNH THIẾT BỊ ĐO CẤU TRÚC HÌNH HỌC BA CHIỀU BỀ MẶT BẰNG GIAO THOA ÁNH SÁNG TRẮNG

Chương này trình bày việc xây dựng trong phòng thí nghiệm một mô hình thiết bị WLI phù hợp với yêu cầu đo cấu trúc hình học 3D bề mặt tế vi của chi tiết.

3.1. Các thành phần và hoạt động của mô hình hệ thống WLI



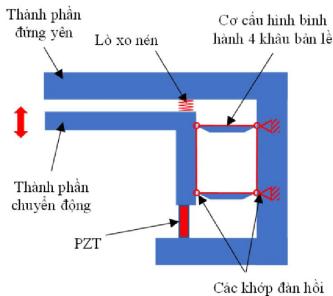
Hình 3.1: Sơ đồ hệ thống hiển vi giao thoa ánh sáng trắng để đo cấu trúc hình học ba chiều của bề mặt.

Hình 3.1 thể hiện sơ đồ hệ thống đo lường. Đầu tiên máy tính sẽ điều khiển để dịch chuyển vật kính hiển vi theo chiều dọc (z) và ghi lại một loạt hình ảnh giao thoa tương ứng với các vị trí dọc trục. Sử dụng kỹ thuật xử lý WLI, ta trích xuất được vị trí tín hiệu giao thoa cực đại từ đó tính toán được độ cao tương đối của từng điểm ảnh. Xử lý tương tự ở tất cả các điểm trên ảnh WLI ta thu được cấu trúc hình học 3D của bề mặt cần đo.

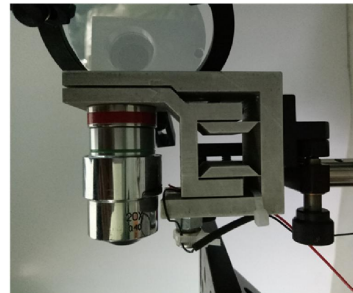
3.1.1. Hệ quang học tạo ảnh và chiếu sáng

Hệ quang học tạo ảnh giao thoa và hệ chiếu sáng về cơ bản tương tự các thành phần trong kính hiển vi quang học phản xạ. Các thành phần trong hệ tạo ảnh được phân tích, lựa chọn đáp ứng được các yêu cầu đo cấu trúc hình học của chi tiết quang cơ cấp chính xác cao bao gồm vật kính hiển vi Mirau 20X và cảm biến ảnh màu ảnh màu MN4110PA loại CMOS kết nối USB của hãng Panasonic. Hệ chiếu sáng được lựa chọn sử dụng trong mô hình thiết bị là hệ chiếu sáng Köhler với nguồn sáng LED trắng. Các thành phần của hệ chiếu sáng được tính toán, lựa chọn từ những linh kiện có sẵn.

3.1.2. Hệ dịch chuyển và điều khiển dịch chuyển



(a)



(b)

Hình 3.9: (a) Sơ đồ nguyên lý và (b) ảnh chụp mô đun dịch chuyển đàn hồi đơn khối

Trong luận án này, chúng tôi đã chế tạo một bộ dịch chuyển áp điện chính xác cao. Khả năng dịch chuyển của bộ áp điện đã được

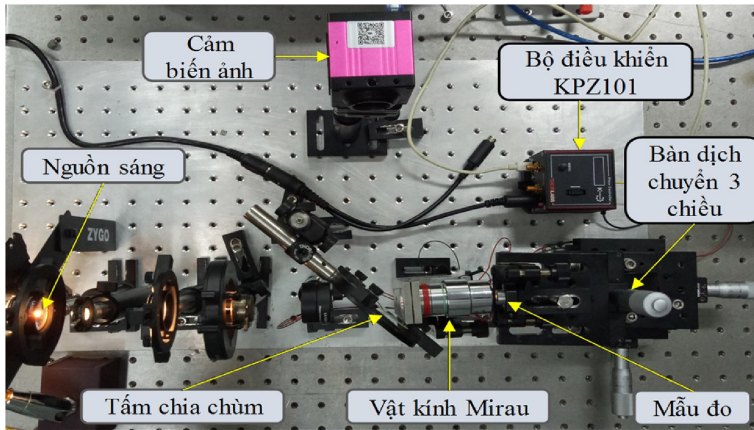
kiểm chứng với phạm vi dịch chuyển là $7\ \mu\text{m}$, mỗi bước dịch chuyển có thể được điều khiển trong khoảng $10\ \text{nm}$ [120]. Điểm đặc biệt của hệ vi dịch chuyển là được chế tạo theo kiểu mô đun đàn hồi đơn khối theo cơ cấu hình bình hành, đảm bảo tỷ lệ truyền là 1:1. Hình 3.9 (b) là hình ảnh mô đun đàn hồi đã được chế tạo.

3.1.3. Phần mềm điều khiển và xử lý dữ liệu

Phần mềm điều khiển đo và xử lý dữ liệu có chức năng điều khiển hoạt động của các thành phần một các đồng bộ để thực hiện phép đo. Thực tế phần mềm bao gồm các mô đun điều khiển hoạt động của nguồn sáng, cảm biến ảnh, bộ vi dịch chuyển và mô đun thu nhận xử lý tín hiệu.

3.1.4. Mô hình thiết bị thực nghiệm

Trên cơ sở phân tích, lựa chọn các thành phần như trên, chúng tôi đã xây dựng một hệ WLI trong phòng thí nghiệm như trên Hình 3.11.



Hình 3.11: Ảnh chụp mô hình hiển vi WLI thực nghiệm

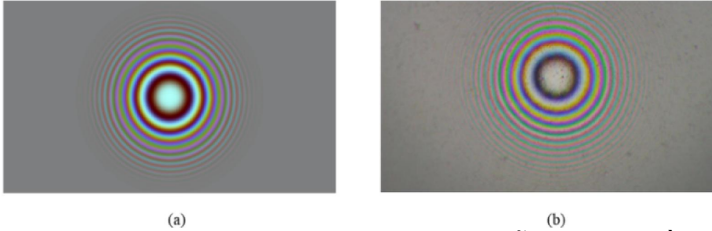
3.2. Mô phỏng hoạt động của thiết bị

3.2.1. Mô phỏng sự hình thành hình ảnh vân WLI

Với mô hình thiết bị đã xây dựng, luận án tiến hành mô phỏng sự hình thành hình ảnh vân WLI theo sơ đồ hiển vi giao thoa Mirau.

Những thông số cơ bản của các thành phần trong sơ đồ giao thoa đều được đưa vào mô hình toán học để tính toán xây dựng hình ảnh WLI.

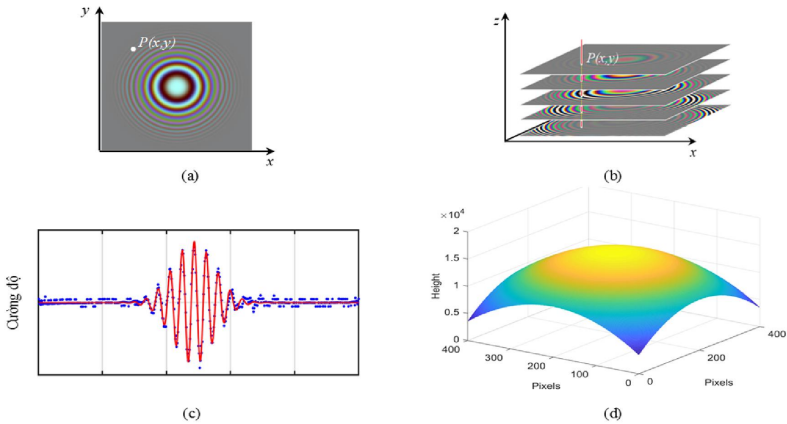
Kết quả, hình ảnh WLI mô phỏng và hình ảnh thu được từ thực nghiệm của cùng đối tượng đo có sự phù hợp tốt về cả phân bố và màu sắc của vân giao thoa. Hình 3.14 thể hiện hình ảnh vân WLI mô phỏng và hình ảnh thu được từ thực nghiệm với mẫu là chỏm cầu.



Hình 3.16 Hình ảnh vân giao thoa với mẫu là chỏm cầu
(a) hình ảnh mô phỏng; (b) ảnh thực nghiệm

3.2.2. Tái tạo cấu trúc hình học 3D bề mặt mô phỏng

Sử dụng các hình ảnh mô phỏng, chúng tôi đã tái tạo cấu trúc hình học 3D của bề mặt bằng kỹ thuật tìm cực đại tín hiệu. Quá trình mô phỏng tái tạo cấu trúc 3D bề mặt cầu thể hiện ở Hình 3.15



Hình 3.17: Kết quả mô phỏng hoạt động của thiết bị.

(a) Hình ảnh vân giao thoa mô phỏng tại một vị trí, (b) Tập hợp các ảnh giao thoa ở các vị trí khác nhau theo chiều z, (c) Tín hiệu giao thoa theo chiều z ứng với điểm P trên mẫu đo, (d) cấu trúc hình học 3D của mặt cầu được tái tạo từ các hình ảnh giao thoa mô phỏng

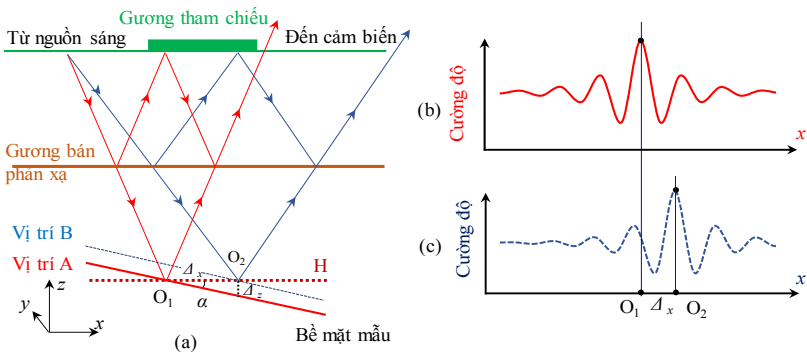
3.3. Hiệu chuẩn mô hình thiết bị

3.3.1. Hiệu chuẩn kích thước ngang

Hiệu chuẩn kích thước ngang của mô hình thiết bị được thực hiện như đối với kính hiển vi thông thường. Sử dụng thước chuẩn OMO với các bước 0,01 mm và chiều dài 1 mm để hiệu chuẩn, chúng tôi đã xác định được hệ số chuyển đổi kích thước ngang của mô hình thiết bị là $K = (240 \pm 8) \text{ nm/pixel}$.

3.3.2. Hiệu chuẩn dịch chuyển dọc trục

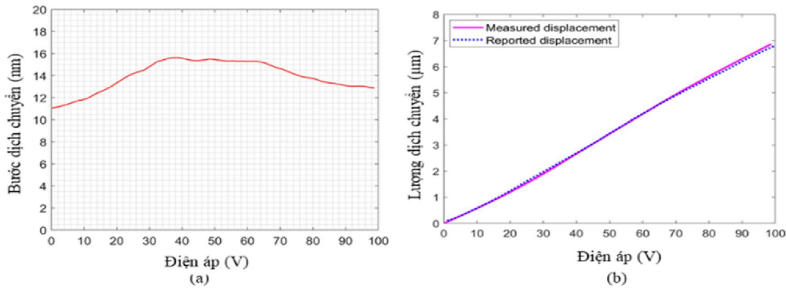
Hiệu chuẩn dịch chuyển dọc trục cho các hệ thống đo WLI thực chất là xác định độ chính xác đo theo chiều z của hệ thống. Chúng tôi đã đề xuất và thực hiện một kỹ thuật đo dịch chuyển mới sử dụng chính hệ kính hiển vi WLI Mirau, kết hợp với một mặt phẳng nghiêng mà không cần thêm thiết bị nào khác, qua đó xác định được $\lambda_0 = 578 \text{ nm}$ và khảo sát dịch chuyển của PZT.



Hình 3.21: (a) Nguyên lý đo dịch chuyển dọc bằng xử lý ảnh vân giao thoa của mặt phẳng nghiêng tại hai vị trí liền kề, (b) và (c) cường độ tín hiệu giao thoa theo hướng x của hai ảnh tại hai vị trí A và B tương ứng

Nguyên lý xác định dịch chuyển dọc trục được thể hiện ở Hình 3.21. Ở đây, lượng dịch chuyển dọc Δ_z được xác định bằng lượng dịch chuyển ngang O_1O_2 của đỉnh vân giao thoa ánh WLI.

Kết quả hiệu chuẩn được thể hiện ở Hình 3.23. Như vậy, hệ vi dịch chuyển sử dụng trong mô hình thiết bị có phạm vi dịch chuyển 7000 nm và bước dịch nhỏ nhất có thể đến 10 nm.



Hình 3.23 (a) Bước dịch chuyển của PZT với sự tăng điện áp từ 0 V đến 100 V, bước tăng là 0,2 V. (b) So sánh lượng dịch chuyển đo được từ thực nghiệm với công bố của nhà sản xuất.

3.3.3. Tần số cắt của mô hình thiết bị

Tần số cắt của mô hình thiết bị được tính toán dựa vào các thông số của các thành phần sử dụng trong mô hình. Qua tính toán: tần số cắt quang học: $1,47 \mu\text{m}^{-1}$, tần số cắt dụng cụ: $2,08 \mu\text{m}^{-1}$. Như vậy, độ phân giải ngang của hệ thống là $0,68 \mu\text{m}$.

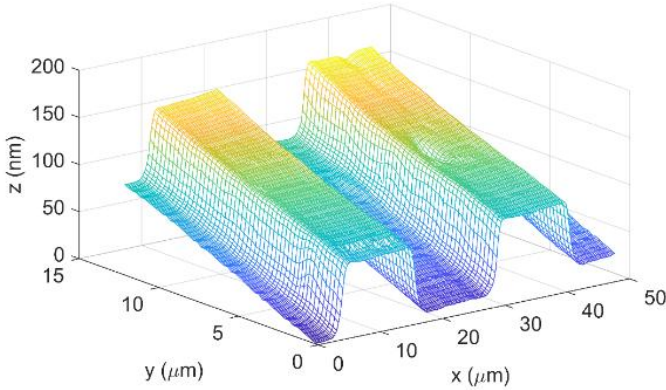
3.4. Phát triển kỹ thuật xử lý tín hiệu WLI

3.4.1. Tái tạo cấu trúc hình học 3D bề mặt bằng kỹ thuật làm khớp tín hiệu

Chúng tôi đã đề xuất một kỹ thuật mới để tái tạo cấu trúc hình học 3D của bề mặt đó là phương pháp làm khớp tín hiệu giao thoa với hàm lý thuyết để truy xuất độ cao bề mặt. Tín hiệu giao thoa tại một điểm trên bề mặt được làm khớp với hàm lý thuyết công thức (3.14) để tìm ra vị trí z_0 .

$$I(z) = I_B + \gamma I_B \exp \left[- \left(\frac{z - z_0}{l_c} \right)^2 \right] \cos \left[\frac{4\pi}{\lambda_0} (z - z_0) + \varphi \right] \quad (3.14)$$

Hình 3.27 thể hiện cấu trúc 3D của bề mặt cách tử Ronchi 40 vạch/mm được tái tạo bằng kỹ thuật làm khớp đã đề xuất. So với kết quả đo từ máy đo WLI thương mại ZeGage, kết quả đo từ mô hình thiết bị có sự phù hợp tốt về khoảng cách và chiều cao của các vạch.

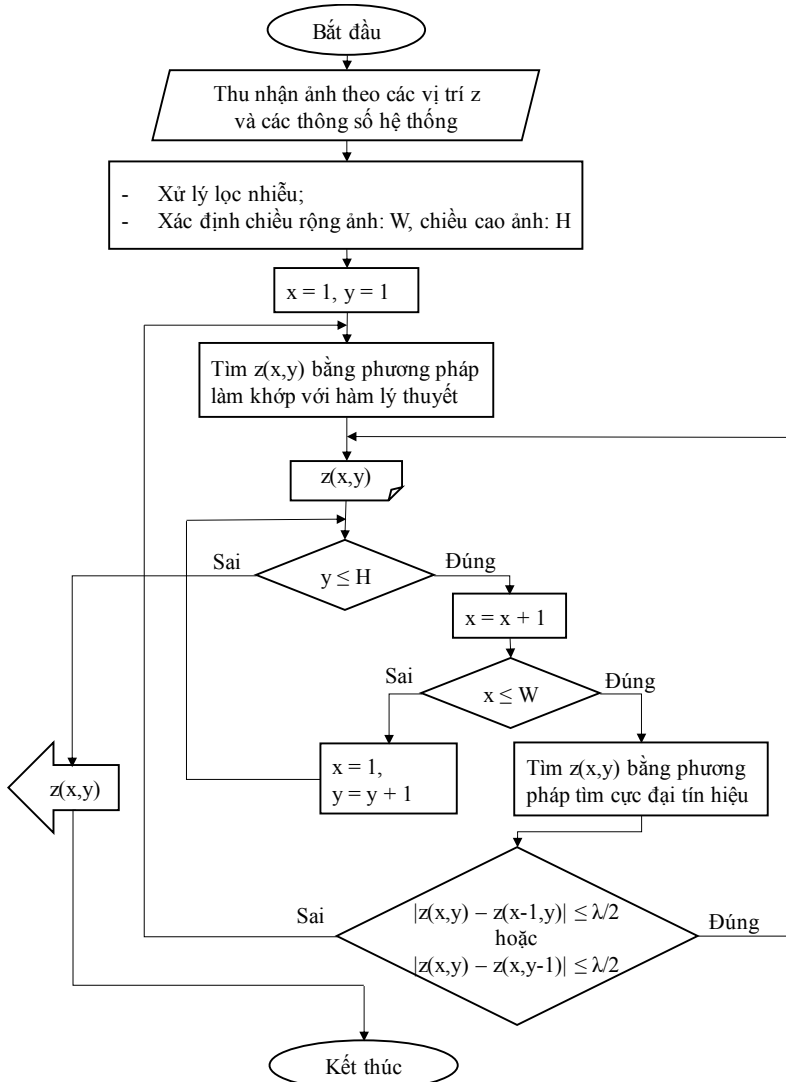


Hình 3.27: Cấu trúc hình học 3D của bề mặt một khu vực nhỏ của cách tử Ronchi 40 vạch/mm tái tạo bằng kỹ thuật làm khớp tín hiệu WLI

3.4.2. Tái tạo biên dạng bề mặt sử dụng phối hợp phương pháp cực đại và phương pháp làm khớp tín hiệu WLI

Nhằm khắc phục hạn chế về tốc độ của phương pháp làm khớp tín hiệu WLI, chúng tôi đề xuất sử dụng kết hợp phương pháp tìm cực đại với phương pháp làm khớp tín hiệu WLI để vừa tận dụng được độ chính xác và khả năng chống nhiễu của phương pháp làm khớp, vừa tận dụng được tốc độ xử lý của phương pháp cực đại.

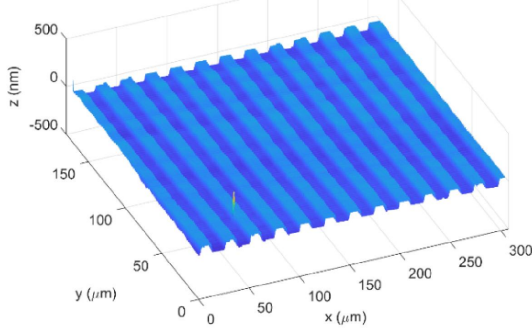
Lưu đồ thuật toán của kỹ thuật này được thể hiện ở Hình 3.30. Theo thuật toán này, các tọa độ độ cao được xác định theo phương pháp tìm cực đại tín hiệu, chỉ những điểm nghi ngờ mới sử dụng phương pháp làm khớp tín hiệu.



Hình 3.30: Lưu đồ thuật toán xử lý ảnh WLI kết hợp

Sử dụng thuật toán trên, biên dạng bề mặt của cách tử Ronchi 40 vạch/mm trên toàn bộ thị giới của hệ ($308 \mu\text{m} \times 173 \mu\text{m}$) đã được tái

tạo với tốc độ cải thiện rất nhiều (với cùng một tập ảnh giao thoa, và vùng xử lý $50 \text{ pixel} \times 200 \text{ pixel}$, tốc độ cải thiện 2650 lần).



Hình 3.31: Biên dạng 3D của bề mặt cách tử Ronchi 40 vạch/mm được khôi phục từ kỹ thuật kết hợp

3.5. Kết luận chương 3

Chương 3 đã đạt được những kết quả chính sau:

Đã phân tích các yêu cầu, lựa chọn các thành phần và từ đó xây dựng thành công một hệ thiết bị hiển vi WLI sử dụng vật kính Mirau có thông số cơ bản sau: Độ phóng đại 20X, thị giới $308 \mu\text{m} \times 173 \mu\text{m}$, độ phân giải ngang $0,68 \mu\text{m}$ tương ứng với tần số cắt thiết bị là $1,47 \mu\text{m}^{-1}$. Hệ vi dịch chuyển sử dụng gốm áp điện PZT có phạm vi dịch chuyển 7000 nm , sai số 2%, bước dịch chuyển nhỏ nhất cỡ 10 nm .

Đã đề xuất mô hình toán học và mô phỏng hình ảnh giao thoa và hoạt động của thiết bị.

Đã hiệu chuẩn trục ngang, trục dọc và xác định tần số cắt của thiết bị, đặc biệt đã đề xuất phương pháp mới và thực hiện thành công việc hiệu chuẩn dọc trục của hệ thống bằng kỹ thuật giao thoa.

Đã đề xuất và kiểm nghiệm kỹ thuật xử lý tín hiệu WLI mới. Đó là kỹ thuật làm khớp tín hiệu WLI với hàm lý thuyết và đề xuất phương pháp kết hợp với phương pháp tìm cực đại tín hiệu để tăng tốc độ xử lý.

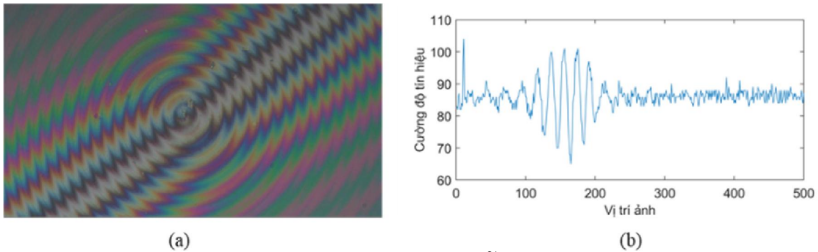
Chương 4

MỘT SỐ KẾT QUẢ ĐO CẤU TRÚC HÌNH HỌC 3D BỀ MẶT SỬ DỤNG MÔ HÌNH THIẾT BỊ

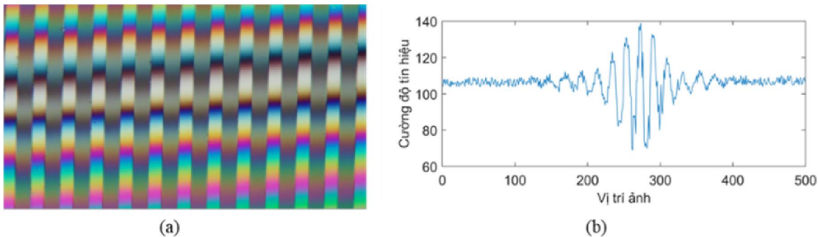
Trên cơ sở thiết bị WLI, kỹ thuật xử lý, phần mềm đã đạt được ở Chương 3, chương này sẽ ứng dụng để đo cấu trúc hình học 3D bề mặt một số chi tiết quang, cơ. Các phép đo này, một mặt để đánh giá khả năng hoạt động của mô hình thiết bị, mặt khác để chứng tỏ khả năng ứng dụng của mô hình thiết bị đã xây dựng.

4.1. Hình ảnh và tín hiệu giao thoa của một số bề mặt quang cơ thu được từ mô hình thiết bị

Mô hình thiết bị WLI đã xây dựng được sử dụng để thu nhận hình ảnh giao thoa và tín hiệu giao thoa theo vị trí ảnh của một số mẫu bề mặt khác nhau như thể hiện ở các Hình 4.1 - 4.2.



Hình 4.1: (a) Hình ảnh giao thoa của mẫu mặt nạ pha gia công theo phương pháp tiện siêu chính xác bằng mũi kim cương trên vật liệu nhựa PMMA. (b) Tín hiệu giao thoa của một điểm ảnh.



Hình 4.2: (a) Hình ảnh giao thoa của mẫu cách tử Ronchi 40 vạch/mm. (b) Tín hiệu giao thoa của một điểm ảnh.

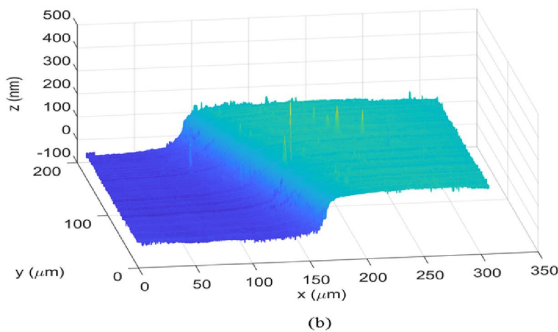
4.2 Đo cấu trúc hình học bề mặt các chi tiết quang

4.2.1 Đo chiều dày lớp màng mỏng quang học sử dụng một hình ảnh WLI

Trong phần này, một kỹ thuật xác định chiều dày lớp màng chỉ dựa vào một hình ảnh WLI duy nhất. Tương tự như phương pháp xác định dịch chuyển dọc trục đã công bố trong Chương 3, chiều dày lớp màng được tính toán thông qua sự dịch chuyển ngang của hai hệ vân xuất hiện ở mặt trên lớp màng và bề mặt đế.

Kết quả xác định chiều dày của hai màng MgF_2 dày 338 ± 88 nm và 1200 ± 100 nm (đo bằng Alpha Step D500) được đo bằng kỹ thuật đề xuất cho kết quả lần lượt là 338 ± 7 nm và 1219 ± 12 nm.

4.2.2. Đo màng mỏng bằng phương pháp xử lý nhiễu ảnh WLI



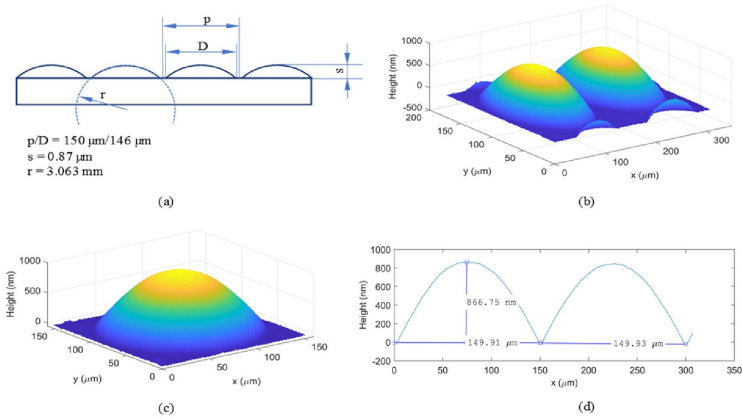
Hình 4.8 b: Kết quả tái tạo cấu trúc 3D của biên lớp màng MgF_2 dày 200 nm

Áp dụng kỹ thuật xử lý đã đề xuất, luận án xử lý và tái tạo cấu trúc hình học 3D của biên lớp màng MgF_2 . Độ dày các màng lần lượt khoảng 500 nm và 200 nm được kiểm soát bằng tinh thể thạch anh trong quá trình bốc bay màng trong buồng chân không. Hình 4.8b thể hiện cấu trúc bề mặt 3D của biên lớp màng MgF_2 dày 200nm.

4.2.3. Đo cấu trúc hình học 3D bề mặt ma trận vi thấu kính

Sử dụng mô hình thiết bị đã xây dựng, chúng tôi tiến hành thực nghiệm đo cấu trúc bề mặt của một ma trận vi thấu kính thương mại

MLA150-7AR của hãng Thorlab (Anh). So với kết quả đo bằng phương pháp tiếp xúc sử dụng máy đo Alpha Step D500 (hãng KLA) và phương pháp WLI sử dụng máy GeGage (hãng Zygo), kết quả đo bằng mô hình thiết bị có sự tương đồng tốt.



Hình 4.10: Kết quả đo thông số của ma trận vi thấu kính MLA150-7AR

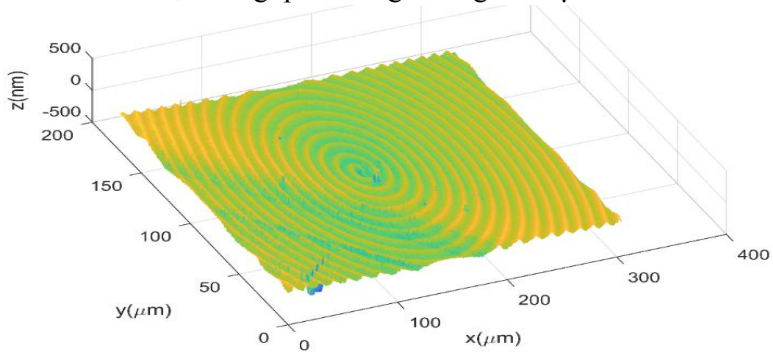
4.2.4. Xác định bán kính cong của vi thấu kính bằng thuật toán làm khớp dữ liệu cấu trúc hình học 3D bề mặt chỏm cầu

Áp dụng thuật kỹ thuật làm khớp dữ liệu 3D của bề mặt chỏm cầu của các vi thấu kính với mặt cầu lý tưởng, chúng tôi đã xác định bán kính của vi thấu kính: $r_m = 3,088 \pm 0,026 \text{ mm}$, khá phù hợp với giá trị công bố của nhà sản xuất là $r = 3,063 \text{ mm}$.

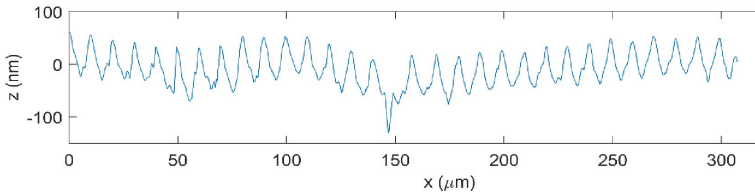
4.2.5. Đo cấu trúc hình học 3D bề mặt chi tiết quang gia công bằng phương pháp tiện sử dụng mũi kim cương đơn điểm

Với mô hình thiết bị WLI, cấu trúc hình học 3D và 2D của bề mặt mặt nạ pha chế tạo bằng phương pháp tiện sử dụng mũi kim cương đơn điểm trên vật liệu PMMA được tái tạo như thể hiện ở Hình 4.13 và Hình 4.14. Rõ ràng, cấu trúc hình học 3D của mặt nạ pha cho thấy

các vết gia công xoắn ốc do dao tiện để lại có mấp mô xấp xỉ 80 nm. Bước của dao tiện trong quá trình gia công là 10 μm .



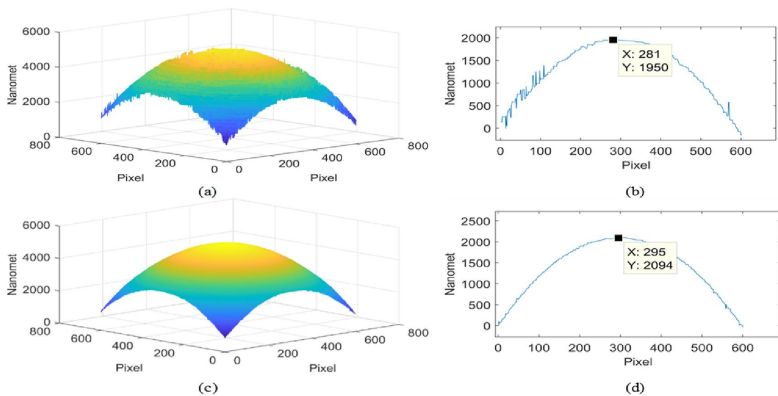
Hình 4.13: Cấu trúc hình học 3D của bề mặt mặt nạ pha



Hình 4.14: Biên dạng đường cắt ngang bề mặt chi tiết mặt nạ pha

4.3. Đo cấu trúc hình học bề mặt các chi tiết cơ khí

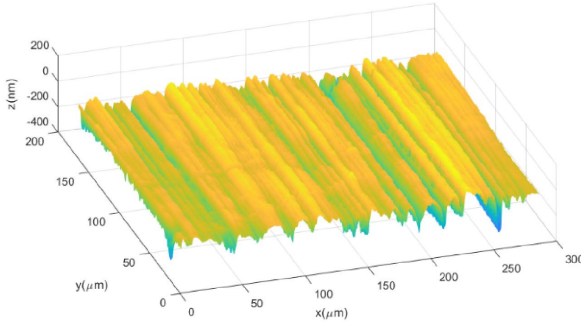
4.3.1 Đo cấu trúc hình học 3D bề mặt quả cầu kim loại



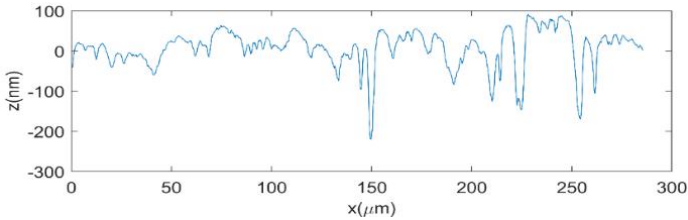
Hình 4.15: Kết quả tái tạo cấu trúc 3D và đường cắt ngang qua đỉnh

của chòm cầu (a, b) bằng thuật toán tìm cực đại, (c, d) bằng thuật toán kết hợp.

4.3.2. Đánh giá chất lượng bề mặt



Hình 4.17: Kết quả đo cấu trúc hình học 3D bề mặt mẫu N2-Grinding



Hình 4.18: Một lát cắt ngang bề mặt mẫu chuẩn độ nhám N2-Grinding

4.4. Đánh giá sơ bộ độ chính xác của thiết bị

Cho đến nay chưa có công bố về độ không bảo đảm đo của thiết bị WLI, mặc dù nhiều nguồn sai số riêng lẻ đã được xác định và định lượng. Các nhà sản xuất thiết bị dựa trên các tuyên bố về độ lặp lại của phép đo mẫu chiều cao để đánh giá độ chính xác của thiết bị và đánh giá mức độ phù hợp với người dùng khi ứng dụng thiết bị WLI để đo các mẫu tương tự.

Do điều kiện thực nghiệm trong nước gặp nhiều khó khăn, việc đánh giá độ chính xác của mô hình thiết bị sử dụng các mẫu chiều cao chuẩn chưa thực hiện được. Luận án chỉ sơ bộ đánh giá về độ chính

xác của mô hình thiết bị thông qua việc đo cấu trúc hình học ba chiều của một số bề mặt mẫu và đối chứng kết quả đo từ các thiết bị thương mại. Một số kết quả đo cấu trúc hình học 3D các bề mặt chi tiết khác nhau được tổng hợp cho thấy, mô hình thiết bị có độ chính xác tương đương với thiết bị WLI thương mại và một số thiết bị đo khác với sai lệch cỡ 1%.

4.5. Kết luận chương 4

Chương 4 đã đạt được các kết quả chính sau:

Đã khảo sát hoạt động của thiết bị WLI mà luận án xây dựng bao gồm: thu nhận được hình ảnh giao thoa và tái tạo biên dạng 3D bề mặt của một số chi tiết quang, cơ. Ngoài kỹ thuật xử lý tín hiệu WLI đã đề xuất ở chương 3 được áp dụng, chương 4 còn đề xuất và áp dụng phương pháp xác định thông số chiều cao của lớp màng mỏng (hoặc bề mặt bậc) chỉ bằng một hình ảnh giao thoa, áp dụng thuật toán làm khớp với mặt cầu để tìm thông số bán kính mặt cầu. Tất cả các kết quả khảo sát thực nghiệm đều chứng tỏ mô hình thiết bị đã xây dựng hoạt động tốt, cho kết quả sát với kết quả đo bằng thiết bị đo thương mại khác.

KẾT LUẬN

Luận án đã đạt được các mục tiêu đề ra là nghiên cứu phát triển mô hình thiết bị đo cấu trúc hình học 3D của bề mặt chi tiết quang, cơ trên cơ sở sử dụng WLI. Luận án đã có những đóng góp chính sau:

1. Đã phát triển mô hình toán và phương pháp mô phỏng hình ảnh vân giao thoa ánh sáng trắng có tính tới ảnh hưởng của phổ nguồn sáng và độ nhạy màu của cảm biến ảnh.

2. Đã đề xuất và thực hiện thành công kỹ thuật đo vi dịch chuyển trên cơ sở giao thoa ánh sáng trắng kết hợp với mặt phẳng nghiêng.

Kỹ thuật này được áp dụng để hiệu chỉnh dọc trục cho mô hình thiết bị đạt độ chính xác cao.

3. Đã phát triển và áp dụng thành công hai phương pháp mới để xử lý hình ảnh vân giao thoa và tái tạo biên dạng 3D bề mặt mẫu đo là: (1) Phương pháp làm khớp tín hiệu WLI với hàm lý thuyết; (2) Phương pháp kết hợp kỹ thuật tìm cực đại tín hiệu và kỹ thuật làm khớp đường cong tín hiệu giao thoa. Với kỹ thuật này, kết quả tái tạo cấu trúc hình học 3D bề mặt vừa đảm bảo độ chính xác, vừa rút ngắn thời gian xử lý.

4. Trên cơ sở vật kính hiển vi giao thoa, cảm biến ảnh và khối dẫn động áp điện thương mại, luận án đã xây dựng thành công trong phòng thí nghiệm một mô hình thiết bị WLI có các thông số chính sau:

- Hệ hiển vi tạo ảnh sử dụng vật kính giao thoa Mirau độ phóng đại 20X; khẩu độ số 0,4; thị giới ngang $308 \mu\text{m} \times 173 \mu\text{m}$; độ phân giải ngang $0,68 \mu\text{m}$ tương ứng với tần số cắt thiết bị là $1,47 \mu\text{m}^{-1}$; số lượng điểm dữ liệu: 1280×720 pixel. Hệ số chuyển đổi kích thước điểm ảnh và kích thước thật $K = 0,240 \pm 0,008 \mu\text{m}/\text{pixel}$.

- Hệ chiếu sáng Köhler dùng nguồn sáng LED trắng;

- Cơ cấu vi dịch chuyển một chiều dẫn động bằng gốm áp điện có phạm vi dịch chuyển 7000 nm , bước dịch chuyển cỡ 10 nm , sai số lớn nhất trong phạm vi dịch chuyển là 2%.

Theo thông tin mà chúng tôi có, đây là hệ đo WLI đầu tiên được xây dựng trong nước, cho phép đo không tiếp xúc cấu trúc hình học 3D tế vi của bề mặt chi tiết quang sau đánh bóng.

5. Đã ứng dụng mô hình thiết bị này để đo đạc, khảo sát cấu trúc hình học 3D bề mặt một số chi tiết quang cơ điển hình, độ chính xác cao như: ma trận vi thấu kính, cách tử, mặt nạ pha, bề mặt cầu kim loại, mẫu độ nhám,... cho kết quả phù hợp tốt so với các phương pháp

đo khác. Độ chính xác đo đạt tương đương với thiết bị WLI thương mại và một số thiết bị đo khác với sai lệch cỡ 1%.

6. Đã đề xuất và áp dụng thành công 2 phương pháp trích xuất thông tin: (1) đo độ dày màng mỏng chỉ sử dụng một hình ảnh WLI; (2) xác định bán kính mặt cầu từ dữ liệu 3D bề mặt bằng thuật toán làm khớp với mặt cầu lý tưởng.

KIẾN NGHỊ

Kết quả nghiên cứu của luận án chứng tỏ tính khả thi của việc tự xây dựng một thiết bị WLI hoàn chỉnh để đo cấu trúc hình học 3D của bề mặt chi tiết. Tuy nhiên, còn nhiều khía cạnh cần được tiếp tục nghiên cứu phát triển và khảo sát thêm nhằm nâng cao hiệu năng của thiết bị như: nâng cao độ phân giải, độ chính xác, phạm vi đo, độ lặp lại, khả năng tự động của hệ thống...

Nội dung nghiên cứu tiếp theo có thể kể đến:

- Tăng tốc độ chụp ảnh để giảm thiểu tác động của nhiễu môi trường, như nhiễu loạn không khí, sự thay đổi nhiệt độ, sự rung động;
- Hoàn thiện tích hợp tất cả các hoạt động của thiết bị vào một chương trình ứng dụng duy nhất. Việc xử lý có thể được tăng tốc bằng cách sử dụng các thuật toán song song và máy tính cấu hình cao nhằm hiện thực hóa phép đo thời gian thực;
- Tiếp tục nghiên cứu phân tích đánh giá độ không bảo đảm đo của thiết bị như một hệ thống đo lường hoàn chỉnh. Kiểm tra chi tiết hơn các sai số liên quan đến quy trình hiệu chuẩn và nghiên cứu giảm thiểu những sai số này bằng cách sử dụng những linh kiện có đặc tính kỹ thuật tốt hơn giúp cải thiện độ chính xác của hệ thống đo lường.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CỦA TÁC GIẢ

1. Phan Nguyên Nhuệ, Lê Hoàng Hải, Dương Chí Dũng (2017), “Khảo sát đặc tính dịch chuyển của bộ truyền động piezo dạng đĩa bằng phương pháp xử lý ảnh vân giao thoa,” Hội nghị cơ học toàn quốc lần thứ X, Tập 1, p410-415.
2. Lê Duy Tuấn, Lê Hoàng Hải, Phan Nguyên Nhuệ (2017), “Xây dựng thuật toán và phần mềm xử lý ảnh giao thoa dùng trong đánh giá chất lượng hệ thống và chi tiết quang học,” Những tiến bộ trong Quang học, Quang tử, Quang phổ và ứng dụng IX, p389-393.
3. Phan Nguyên Nhuệ, Lê Hoàng Hải, Dương Chí Dũng (2018), “Mô phỏng hình ảnh vân giao thoa theo sơ đồ hiển vi giao thoa Mirau sử dụng nguồn sáng LED trắng và cảm biến CCD màu,” Những tiến bộ trong Quang học, Quang tử, Quang phổ và ứng dụng X, p386-392.
4. Phan Nguyen Nhue, Le Hoang Hai, Duong Chi Dung (2019), “Measuring optical coating thickness using a single shot white light interference pattern”, Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật, Học viện KTQS, Số 198, p19-27.
5. Nhue Nguyen Phan, Hai Hoang Le, Dung Chi Duong, and Duong Van Ta (2019), “Measurement of nanoscale displacements using a Mirau white-light interference microscope and an inclined flat surface,” Optical Engineering, 58(6), 064106
6. Nhue Nguyen Phan, Hai Hoang Le, and Dung Chi Duong (2019), “Surface curvature measurement of microlenses using a white-light interference microscope and fast geometric fit algorithm,” Optical Engineering, 58(12), 124105