

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO**

**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**

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT**

**HÀ NỘI – NĂM 2020**

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO**

**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

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT**

**NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:**  
1. PGS. TS LÊ HOÀNG HẢI  
2. PGS. TS DƯƠNG CHÍ DŨNG

**HÀ NỘI – NĂM 2020**

## **LỜI CAM ĐOAN**

Tôi xin cam đoan các kết quả trình bày trong luận án là công trình nghiên cứu của tôi. Các số liệu, kết quả trình bày trong luận án là hoàn toàn trung thực và chưa được công bố trong bất kỳ công trình nào trước đây. Các kết quả sử dụng tham khảo đều được trích dẫn đầy đủ và theo đúng quy định.

*Hà Nội, ngày tháng năm 2020*

Tác giả

**Phan Nguyên Nhuệ**

## LỜI CẢM ƠN

Trong quá trình học tập và nghiên cứu tại Học viện Kỹ thuật Quân sự, để hoàn thành luận án này, tác giả đã nhận được nhiều sự giúp đỡ và đóng góp quý báu của các thầy cô, các nhà khoa học, các nhà quản lý và các đồng nghiệp.

Đầu tiên, tác giả xin bày tỏ lòng cảm ơn sâu sắc tới thầy giáo hướng dẫn PGS.TS Lê Hoàng Hải, PGS.TS Dương Chí Dũng đã tận tình hướng dẫn và giúp đỡ tác giả trong quá trình học tập và nghiên cứu.

Tác giả xin chân thành cảm ơn Phòng Sau Đại học, Bộ môn Khí tài quang học, Khoa Vũ khí - Học viện Kỹ thuật Quân sự đã tạo điều kiện thuận lợi để tác giả hoàn thành nhiệm vụ.

Cuối cùng, tác giả xin bày tỏ lòng cảm ơn đến gia đình, bạn bè, các đồng nghiệp đã luôn động viên, giúp đỡ tác giả vượt qua khó khăn trong suốt quá trình làm luận án.

TÁC GIẢ

## MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN.....	i
LỜI CẢM ƠN.....	ii
MỤC LỤC .....	iii
DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT VÀ KÝ HIỆU.....	vi
DANH MỤC CÁC BẢNG .....	ix
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ.....	x
MỞ ĐẦU .....	1
Chương 1 ĐO CẤU TRÚC HÌNH HỌC BỀ MẶT, NHỮNG TIẾN BỘ VÀ TỒN TẠI.....	10
1.1. Tổng quan về đo cấu trúc hình học bề mặt .....	10
1.2. Sự phát triển thiết bị đo lường cấu trúc hình học bề mặt .....	13
1.3. Cấu trúc hình học bề mặt .....	14
1.4. Các kỹ thuật và thiết bị đo lường cấu trúc hình học bề mặt.....	16
1.4.1. Kỹ thuật đo cấu trúc hình học bề mặt bằng phương pháp tiếp xúc. 16	
1.4.2. Kỹ thuật đo cấu trúc hình học bề mặt bằng phương pháp không tiếp xúc.....	21
1.4.3. So sánh các loại thiết bị đo cấu trúc hình học bề mặt .....	29
1.5. Kết luận chương 1 .....	30
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 .....	31
2.1. Giới thiệu chung về WLI .....	31
2.2. Nguyên lý hoạt động của WLI.....	33
2.3. Nguyên lý tạo tín hiệu giao thoa .....	35
2.4. Hình ảnh WLI .....	37
2.5. Xử lý tín hiệu WLI.....	39

2.5.1. Phương pháp xác định đường bao tín hiệu.....	40
2.5.2. Phương pháp trọng tâm.....	41
2.5.3. Phương pháp ước lượng pha.....	41
2.5.4. Phương pháp kết hợp kỹ thuật ước lượng pha và kỹ thuật xác định đường bao biên điệu.....	42
2.5.5. Phân tích trong miền tần số.....	43
2.6. Một số vấn đề trong kỹ thuật đo kiểm bằng WLI.....	45
2.6.1. Sai số thứ tự vân giao thoa.....	46
2.6.2. Ảnh hưởng của vật liệu mẫu đo đến WLI.....	47
2.6.3. Tăng độ phân giải của WLI.....	47
2.6.4. Vấn đề nguồn sáng trong WLI.....	48
2.7. Kết luận chương 2.....	48
<b>Chương 3 XÂY DỰNG MÔ HÌNH THIẾT BỊ ĐO CẤU TRÚC HÌNH HỌC BA CHIỀU BỀ MẶT BẰNG GIAO THOA ÁNH SÁNG TRẮNG.....</b>	<b>49</b>
3.1. Xây dựng mô hình thiết bị.....	49
3.1.1. Hệ quang học tạo ảnh và chiếu sáng.....	50
3.1.2. Hệ dịch chuyển và điều khiển dịch chuyển.....	62
3.1.3. Phần mềm điều khiển và xử lý dữ liệu.....	64
3.1.4. Mô hình thiết bị thực nghiệm.....	65
3.2. Mô phỏng hoạt động của thiết bị.....	66
3.2.1. Mô phỏng sự hình thành hình ảnh vân WLI.....	66
3.2.2. Tái tạo cấu trúc hình học 3D bề mặt mô phỏng.....	73
3.3. Hiệu chuẩn mô hình thiết bị.....	74
3.3.1. Hiệu chuẩn kích thước ngang.....	75
3.3.2. Hiệu chuẩn dịch chuyển dọc trục.....	77
3.3.3. Tần số cắt của mô hình thiết bị.....	85
3.4. Phát triển kỹ thuật xử lý tín hiệu WLI.....	86

3.4.1. Tái tạo cấu trúc hình học 3D bề mặt bằng kỹ thuật làm khớp tín hiệu .....	86
3.4.2. Tái tạo biên dạng bề mặt sử dụng phối hợp phương pháp tìm cực đại và phương pháp làm khớp tín hiệu WLI .....	91
3.5. Kết luận chương 3.....	95
<b>Chương 4 MỘT SỐ KẾT QUẢ ĐO CẤU TRÚC HÌNH HỌC 3D BỀ MẶT SỬ DỤNG MÔ HÌNH THIẾT BỊ.....</b>	<b>96</b>
4.1. Hình ảnh và tín hiệu giao thoa của một số bề mặt quang cơ thu được từ mô hình thiết bị .....	96
4.2. Đo cấu trúc hình học bề mặt các chi tiết quang .....	98
4.2.1. Đo chiều dày màng mỏng quang học sử dụng một hình ảnh WLI..	98
4.2.2. Đo màng mỏng bằng phương pháp xử lý nhiều ảnh WLI.....	102
4.2.3. Đo cấu trúc hình học 3D bề mặt ma trận vi thấu kính .....	105
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.....	108
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.....	112
4.3. Đo cấu trúc hình học bề mặt các chi tiết cơ khí .....	113
4.3.1. Đo cấu trúc hình học 3D bề mặt quả cầu kim loại .....	113
4.3.2. Đánh giá chất lượng bề mặt .....	114
4.4. Đánh giá sơ bộ độ chính xác của thiết bị .....	118
4.5. Kết luận chương 4.....	120
<b>KẾT LUẬN .....</b>	<b>121</b>
<b>DANH MỤC CÔNG TRÌNH CỦA TÁC GIẢ.....</b>	<b>124</b>
<b>TÀI LIỆU THAM KHẢO .....</b>	<b>125</b>
<b>PHỤ LỤC .....</b>	<b>142</b>

## DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT VÀ KÝ HIỆU

### 1. Chữ viết tắt:

Từ viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
2D	Two-dimensional	Hai chiều
3D	Three-dimensional	Ba chiều
AFM	Atomic Force Microscope	Kính hiển vi lực nguyên tử
CCD	Charge Coupled Device	Cảm biến ảnh tích điện kép
CMM	Coordinate Measuring Machine	Máy đo tọa độ
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor	Chất bán dẫn Ô xít kim loại bổ sung
CPM	Coherence Probe Microscopy	Kính hiển vi đầu dò kết hợp
CSI	Coherence Scanning Interferometry	Giao thoa quét kết hợp
EM	Electron Microscope	Kính hiển vi điện tử
FDA	Frequency Domain Analysis	Kỹ thuật phân tích trong miền tần số
FFT	Fast Fourier Transform	Biến đổi Fourier nhanh
FOV	Field Of View	Thị giới
ISO	International Organization for Standardization	Tổ chức tiêu chuẩn hóa quốc tế
LCI	Low Coherence Interferometry	Giao thoa kết hợp thấp



LD	Laser Diode	Laser đi ốt
LED	Light Emitting Diode	Đi ốt phát quang
LSD	Light Sensitive Diode	Đi ốt phát quang nhạy sáng
MEMS	Microelectromechanical Systems	Hệ thống vi cơ điện tử
MOEMS	Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems	Hệ thống vi cơ quang điện tử
NA	Numerical Aperture	Khẩu độ số
OCP	Optical Coherence Profilometry	Máy đo biên dạng quang học kết hợp
OCT	Optical Coherence Topography	Đo cấu trúc bề mặt quang học kết hợp
OPD	Optical Path Difference	Sai lệch quang trình
PMMA	Polymethyl methacrylate	Nhựa PMMA
PSI	Phase Shifting Interferometry	Giao thoa dịch pha
PWM	Pulse-width Modulation	Điều chế độ rộng xung
PZT	Piezoelectric Translators	Bộ dịch chuyển áp điện
RAM	Random Access Memory	Bộ nhớ truy cập tạm thời
SEM	Scanning Electron Microscope	Kính hiển vi điện tử quét
SPM	Scanning Probe Microscopy	Kính hiển vi quét đầu dò

STM	Scanning Tunneling Microscope	Kính hiển vi quét xuyên hầm
SWLI	Scanning White Light Interferometer	Giao thoa ánh sáng trắng quét
TEM	Transmission Electron Microscope	Kính hiển vi điện tử truyền qua
VSI	Vertical Scanning Interferometry	Giao thoa quét dọc
WLI	White Light Interference	Giao thoa ánh sáng trắng
ZOPD	Zero Optical Path Difference	Sai lệch quang trình bằng 0

**DANH MỤC CÁC BẢNG**

Bảng 1.1: Thông số kỹ thuật của Rodenstock Model RM 600 3-D/C [163] ..	27
Bảng 3.1: Thông số một số loại vật kính hiển vi giao thoa thương mại .....	53
Bảng 3.2: Các thông số của mô hình hệ giao thoa mô phỏng.....	70
Bảng 3.3: Lượng dịch chuyển của PZT ở các mức điện áp khác nhau.....	84
Bảng 4.1: Kết quả đo độ dày màng, $d = 338 \pm 7$ nm .....	100
Bảng 4.2: Kết quả đo độ dày màng bằng phương pháp xử lý một ảnh WLI	101
Bảng 4.3: Kết quả xác định bán kính của vi thấu kính. ....	111
Bảng 4.4 Bảng tổng hợp các kết quả đo sử dụng mô hình thiết bị .....	119

## DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ

Hình 1.1: (a) Hệ thống vi cơ điện tử đa lớp [100], (b) Cấu trúc hình học 3D bề mặt chi tiết gia công trên máy tiện siêu chính xác bằng mũi kim cương, (c) Hình ảnh 3D của bề mặt chi tiết kim phun nhiên liệu của động cơ ô tô [44] .....	11
Hình 1.2: Đường cong Abbott–Firestone .....	15
Hình 1.3: Phân loại kỹ thuật đo cấu trúc hình học bề mặt.....	16
Hình 1.4: Sơ đồ cấu tạo của máy đo và đầu dò tiếp xúc [108] .....	18
Hình 1.5: Sơ đồ nguyên lý của kính hiển vi đồng tiêu .....	22
Hình 1.6: Sơ đồ nguyên lý phương pháp xác định vị trí từ sai lệch cường độ.....	24
Hình 1.7: Sơ đồ nguyên lý xác định vị trí từ phương pháp loạn thị .....	25
Hình 1.8: Sơ đồ nguyên lý của phương pháp góc tới hạn.....	26
Hình 1.9: Sơ đồ nguyên lý của kỹ thuật giao thoa dịch pha .....	28
Hình 1.10: Phạm vi và độ phân giải của các phương pháp đo cấu trúc hình học 3D bề mặt [80].....	29
Hình 2.1: Sơ đồ quang học của giao thoa kế ánh sáng trắng .....	33
Hình 2.2: Sự hình thành tín hiệu WLI: (a) tín hiệu giao thoa của các bước sóng riêng lẻ và (b) tín hiệu WLI .....	34
Hình 2.3: Mô hình hình thành tín hiệu giao thoa bên trong vật kính Mirau... ..	35
Hình 2.4: Kết quả tính toán tín hiệu WLI sử dụng vật kính Mirau.....	37
Hình 2.5: Vân giao thoa của cách tử thu được khi sử dụng (a) nguồn sáng đỏ, (b) nguồn ánh sáng trắng [108].....	38
Hình 2.6: Hình ảnh giao thoa quan sát được ở mặt phẳng (x,y), (x,z) khi đo bề mặt cầu bằng WLI .....	39
Hình 2.7: Mô tả kỹ thuật phân tích tín hiệu giao thoa trong miền tần số .....	44
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.....	49
Hình 3.2: Một số loại vật kính hiển vi sử dụng trong thiết bị WLI .....	51

Hình 3.3: Vật kính Mirau 20X.....	54
Hình 3.4: Sơ đồ hệ chiếu sáng Köhler sử dụng trong hệ hiển vi giao thoa.....	57
Hình 3.5: Phổ phát xạ của nguồn sáng LED trắng.....	59
Hình 3.6: Mô phỏng hệ chiếu sáng bằng phần mềm Zemax .....	60
Hình 3.7: Kết quả tính phân bố độ rọi của chùm chiếu sáng tại mặt phẳng mẫu bằng phần mềm Zemax.....	61
Hình 3.8: Ảnh chụp hệ chiếu sáng thực nghiệm.....	61
Hình 3.9: (a) Sơ đồ nguyên lý và (b) ảnh chụp mô đun dịch chuyển đàn hồi đơn khối .....	63
Hình 3.10: Bộ điều khiển Piezo K-Cube (KPZ101) .....	64
Hình 3.11: Ảnh chụp mô hình hiển vi WLI thực nghiệm.....	65
Hình 3.12: Ảnh chụp tổng thể thiết bị đo biên dạng 3D của bề mặt chi tiết...	66
Hình 3.13: (a) Phổ phát xạ của LED trắng (đo bằng máy quang phổ CCS200); (b) Phổ độ nhạy của cảm biến MN34110PA .....	68
Hình 3.14: Cường độ tín hiệu giao thoa của các thành phần màu theo độ cao .....	69
Hình 3.15: Hình ảnh vân giao thoa với mẫu là mặt phẳng đặt nghiêng.....	71
Hình 3.16: Hình ảnh vân giao thoa với mẫu là chòm cầu.....	71
Hình 3.17: Kết quả mô phỏng hoạt động của thiết bị. ....	73
Hình 3.18: (a) Thước chuẩn OMO, (b) Thang đo và sai số của thước chuẩn theo tiêu chuẩn GOST 7513-55 .....	76
Hình 3.19: Ảnh của thước chuẩn thu nhận được từ hệ thí nghiệm (a) chiều x (b) chiều y.....	76
Hình 3.20: Sơ đồ thí nghiệm khảo sát dịch chuyển của PZT.....	78
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.....	79

Hình 3.22: Xác định tần số vân giao thoa theo trục x khi dùng nguồn sáng LED trắng và laser He-Ne với mẫu là mặt phẳng nghiêng.....	81
Hình 3.23: (a), (b) hình ảnh vân giao thoa thu được ở vị trí A và B, (c), (d) cường độ giao thoa theo hướng x của ảnh vân giao thoa cho vị trí A và B và các đường cong làm khớp tương ứng .....	82
Hình 3.24: (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. ....	83
Hình 3.25: (a) Các hình ảnh giao thoa được ghi lại theo các vị trí z. (b) Tín hiệu WLI tại điểm P(x,y), (c) Cấu trúc hình học bề mặt tái tạo từ kỹ thuật xử lý WLI .....	87
Hình 3.26: Ví dụ về làm khớp tín hiệu WLI.....	89
Hình 3.27: Cấu trúc hình học 3D của bề mặt một khu vực nhỏ của cách tử Ronchi 40 vạch/mm được tái tạo bằng kỹ thuật làm khớp tín hiệu WLI.....	89
Hình 3.28: Biên dạng 2D của bề mặt cách tử Ronchi đo được khi áp dụng kỹ thuật làm khớp tín hiệu WLI.....	90
Hình 3.29: (a) Biểu đồ màu thể hiện nhấp nhô bề mặt, (b) Biên dạng 2D của cách tử Ronchi 40 vạch/mm được đo bằng máy giao thoa kế ánh sáng trắng ZeGage của hãng Zygo. ....	90
Hình 3.30: Lưu đồ thuật toán xử lý ảnh WLI kết hợp tìm cực đại với làm khớp .....	93
Hình 3.31: Cấu trúc hình học 3D của bề mặt cách tử Ronchi 40 vạch/mm được tái tạo từ kỹ thuật kết hợp tìm cực đại với làm khớp .....	94
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. ....	97
Hình 4.2: (a) Hình ảnh giao thoa của mẫu cách tử Ronchi 40 vạch/mm. ....	97

Hình 4.3: (a) Hình ảnh giao thoa của mẫu bề mặt viên bi kim loại trên vòng đo của cầu kế. (b) Tín hiệu giao thoa của một điểm ảnh. ....	97
Hình 4.4: (a) Hình ảnh giao thoa của bề mặt mẫu chuẩn độ nhám N3-Flat lapping. (b) Tín hiệu giao thoa của một điểm ảnh. ....	98
Hình 4.5: Sơ đồ nguyên lý xử lý một ảnh để tính độ dày lớp màng.....	98
Hình 4.6: (a) Hình ảnh WLI thu được tại biên lớp màng mỏng (b) Hình ảnh WLI đã được xoay để lấy mẫu, (c), (d) Tín hiệu giao thoa và đường cong làm khớp của các đường AA và BB .....	99
Hình 4.7: Hình ảnh giao thoa thu được tại biên lớp màng dày 1200 nm.....	101
Hình 4.8: Kết quả đo cấu trúc hình học 3D của biên lớp màng $MgF_2$ dày 200 nm (a) Hình ảnh giao thoa thực nghiệm, (b) cấu trúc hình học 3D và (c) đường cắt ngang của biên lớp màng. ....	103
Hình 4.9: Kết quả đo cấu trúc hình học 3D của biên lớp màng $MgF_2$ dày 500 nm (a) Hình ảnh giao thoa thực nghiệm, (b) cấu trúc hình học 3D và (c) đường cắt ngang của biên lớp màng. ....	104
Hình 4.10: Kết quả đo bề mặt ma trận vi thấu kính MLA150-7AR, (a) Các thông số hình học do nhà sản xuất công bố, (b) Kết quả đo cấu trúc hình học 3D của hai vi thấu kính và (c) của một vi thấu kính bằng mô hình thiết bị của chúng tôi, (d) đường cắt ngang qua đỉnh của hai vi thấu kính.....	105
Hình 4.11: Biên dạng cắt ngang bề mặt ma trận vi thấu kính MLA150-7AR, được đo bằng máy Alpha Step D500.....	106
Hình 4.12: Kết quả đo cấu trúc hình học 3D bề mặt ma trận vi thấu kính MLA150 - 7AR bằng giao thoa kế ánh sáng trắng ZeGage (hãng Zygo), (a) Hình ảnh cấu trúc hình học 3D, (b) Cấu trúc hình học một vi thấu kính được trích xuất từ dữ liệu 3D, (c) Kết quả xác định đường kính thông quang và (d) độ cao chòm cầu của một vi thấu kính.....	107

Hình 4.13: Cấu trúc hình học 3D của bề mặt mặt nạ pha gia công bằng phương pháp SPDT.....	112
Hình 4.14: Biên dạng đường cắt ngang bề mặt chi tiết mặt nạ pha .....	113
Hình 4.15: Kết quả đo cấu trúc hình học 3D và mặt cắt ngang qua đỉnh của chỏm cầu (a, b) bằng thuật toán tìm cực đại, (c, d) bằng thuật toán kết hợp. ....	113
Hình 4.16: Bộ mẫu độ nhám tiêu chuẩn .....	115
Hình 4.17: Kết quả đo cấu trúc hình học 3D bề mặt mẫu N2-Grinding .....	115
Hình 4.18: Một lát cắt ngang bề mặt mẫu chuẩn độ nhám N2-Grinding.....	116
Hình 4.19: Kết quả tính độ nhám Ra của bề mặt mẫu N2-Grinding theo các mặt cắt ngang khác nhau.....	116
Hình 4.20: (a) Ảnh chụp bề mặt và (b) cấu trúc hình học 3D bề mặt mẫu chuẩn độ nhám N3 - Flat lapping thu được từ thực nghiệm.....	117
Hình 4.21: Biên dạng đường cắt ngang bề mặt mẫu chuẩn độ nhám N3- Flat lapping tại hai vị trí khác nhau .....	118



## MỞ ĐẦU

### 1. Tính cấp thiết của đề tài

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 [40, 44]. Thống kê cho thấy 90% các lỗi kỹ thuật có liên quan đến các bề mặt do cơ chế tiếp xúc mài mòn, ăn mòn hay do các sai lệch trên bề mặt gây ra [20]. Đối với các chi tiết quang, các bề mặt được sử dụng để thay đổi đường truyền của chùm sáng trong hệ thống. Đây là những thành phần cơ bản ảnh hưởng đến hoạt động và chất lượng của hệ thống quang học. Bên cạnh đó, các hệ thống vi cơ điện tử (MEMS) phát triển mạnh mẽ và được chế tạo ngày càng tinh vi. Điều quan trọng trong sản xuất các thành phần này là kiểm soát được kích thước, đánh giá chất lượng bề mặt từ đó xác định các đặc tính làm việc tĩnh và động của chúng. Do đó, cần phải tìm phương pháp đáng tin cậy để đo các thông số hình học ba chiều và kiểm tra chất lượng bề mặt.

Những tiến bộ trong công nghệ sản xuất và các phương pháp kỹ thuật số đã đặt ra nhu cầu kiểm soát tốt hơn cấu trúc bề mặt [78]. Các công nghệ tiên tiến như tiện siêu chính xác hoặc phay bằng mũi kim cương, công nghệ nano, công nghệ màng mỏng... cho phép chế tạo ra các bề mặt có cấu trúc tùy chỉnh hay những cấu trúc phức tạp với kích thước ngang từ 10 mm đến nhỏ hơn micromet, và sai lệch chiều cao nhỏ hơn một nanomet [32, 44, 59, 62]. Nhìn vào cấu trúc bề mặt, người ta có thể đánh giá chất lượng chi tiết ở nhiều khía cạnh như: khả năng bôi trơn, bám dính, ma sát, ăn mòn, mài mòn...

Trong nhiều trường hợp, bề mặt làm việc của chi tiết có thể gồm nhiều lớp trong suốt [31, 60]. Cấu trúc hình học bề mặt cũng như độ dày của mỗi lớp màng quyết định đến tính năng làm việc của nó. Đối với những chi tiết này nhu cầu đo cấu trúc hình học 3D không những ở bề mặt bên ngoài mà còn cấu trúc

hình học bên dưới của một hoặc nhiều lớp màng khác nhau, cũng như nhu cầu không chế, kiểm soát độ dày giữa các lớp.

Như vậy, 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 hình học 3D bề mặt có ý nghĩa trong việc nghiên cứu thay đổi công nghệ chế tạo, quy trình sản xuất, phân tích định tính, định lượng các tham số cấu trúc hình học bằng dữ liệu 3D.

Phương pháp đo cấu trúc hình học bề mặt chi tiết sử dụng thiết bị đo đầu dò tiếp xúc được đưa vào tiêu chuẩn trong đo biên dạng bề mặt [74-76]. Tuy nhiên, trong những năm gần đây do sự phát triển của các công nghệ mới như máy tính tốc độ cao, các linh kiện trạng thái rắn và nhu cầu phải kiểm tra chính xác các bề mặt kỹ thuật, lĩnh vực đo lường bề mặt đã phát triển bùng nổ cả về công nghệ và phạm vi ứng dụng. Những tiến bộ trong phát triển các nguồn sáng, các cảm biến và các thiết bị quang điện tử nói chung đã thúc đẩy sự phát triển của một loạt các thiết bị có thể đo được cấu trúc hình học 3D bề mặt bằng nhiều kỹ thuật khác nhau. Các kỹ thuật và công nghệ tiên tiến đã làm tăng phạm vi đo, đối tượng đo, thậm chí có thể đo được các bề mặt có độ dốc cao hoặc các bề mặt bậc, bề mặt các rãnh sâu [54, 157], hay các bề mặt chi tiết chế tạo từ các vật liệu khác nhau [115]. Nhiều kỹ thuật đo cấu trúc hình học bề mặt đã được phát triển, đặc biệt là kỹ thuật quang học không tiếp xúc.

Lịch sử phát triển kỹ thuật quang học đo cấu trúc hình học 3D bề mặt không tiếp xúc bắt đầu bằng kỹ thuật không giao thoa và phát triển mạnh hơn về sau là kỹ thuật sử dụng giao thoa ánh sáng. Ban đầu một số đầu dò laser không tiếp xúc theo phương pháp xác định tọa độ của từng điểm trên bề mặt được phát triển nhưng tốc độ đo cũng chỉ tương đương với phương pháp sử

dụng đầu dò tiếp xúc. Để cải thiện tốc độ đo, cần thực hiện đo đa điểm. Srinivasan và cộng sự đã phát triển hệ thống đo ba chiều bề mặt đa điểm bằng phương pháp chiếu mẫu [144], tuy nhiên độ phân giải thấp và khả năng áp dụng để đo các bề mặt chi tiết tế vi bị hạn chế. Kỹ thuật đồng tiêu dựa vào phương pháp quét mẫu dọc trục cho phép đo đa điểm bề mặt [142]. Mặc dù kỹ thuật đồng tiêu không quét mẫu cũng đã được đề xuất, nhưng hệ thống phức tạp do phải sử dụng những ma trận vi thấu kính, một trong những linh kiện quang học khó chế tạo với độ chính xác cao [147]. Bên cạnh những kỹ thuật không giao thoa như sử dụng đầu dò laser, phương pháp chiếu mẫu bằng ánh sáng cấu trúc, kính hiển vi đồng tiêu, kỹ thuật giao thoa được quan tâm nghiên cứu phát triển gần đây. Kỹ thuật giao thoa cho phép đo ba chiều đa điểm với độ phân giải và độ chính xác cao hơn, và do đó chúng được áp dụng nhiều hơn cho đo cấu trúc hình học 3D bề mặt ở cấp độ micromet hoặc nanomet. Giao thoa kế đơn sắc là một kỹ thuật phát triển sớm và được sử dụng nhiều trong đo lường, bởi vì ánh sáng đơn sắc có thể tạo ra vân giao thoa chất lượng cao một cách dễ dàng [159]. Trong xử lý tín hiệu giao thoa đơn sắc kỹ thuật biến đổi pha hoặc biến đổi Fourier thường được sử dụng để tính toán pha đầu từ đó lập nên cấu trúc hình học 3D của bề mặt. Tuy nhiên, giá trị pha tính toán được luôn nằm trong khoảng  $-\pi$  đến  $+\pi$ . Để có được giá trị pha thực tế, liên quan trực tiếp đến cấu trúc hình học của bề mặt cần đo, ta phải sử dụng kỹ thuật gỡ pha. Tuy nhiên, đối với những bề mặt có chênh lệch độ cao lớn hơn  $2\pi$ , kỹ thuật gỡ pha không thực hiện được. Do đó, giao thoa kế đơn sắc chỉ được sử dụng cho các bề mặt trơn, liên tục mà không phù hợp trong đo lường các bề mặt gồ ghề, các bề mặt bậc hoặc các bề mặt đứt gãy. Điều này là do hiện tượng “mơ hồ pha” và là yếu tố không thể tránh khỏi trong giao thoa kế dùng ánh sáng đơn sắc. Để khắc phục hiện tượng “mơ hồ pha”, một số kỹ thuật giao thoa khác được phát triển, Creath và cộng sự (1988) đã phát triển hệ giao thoa hai bước sóng [33, 83]; Cheng và

Wyant (1985) phát triển kỹ thuật giao thoa đa bước sóng [26] và kỹ thuật giao thoa quét bước sóng của Suematsu và Takeda phát triển năm 1991 [145]; Kuwamura và Yamaguchi phát triển năm 1997 [93]. Tuy nhiên, các hệ thống đo này rất cồng kềnh do phải dùng đến những nguồn sáng đặc biệt, đắt tiền.

Giao thoa ánh sáng trắng (WLI) ra đời khắc phục được các hạn chế về “mơ hồ pha” và thiết bị gọn nhẹ hơn. Do đặc tính không phá hủy, độ phân giải và độ chính xác cao, kỹ thuật WLI được áp dụng rộng rãi cho nhiều phép đo cấu trúc hình học bề mặt khác nhau, như bề mặt kim loại sau gia công [77], bề mặt cách tử [103], bề mặt bậc [157], bề mặt ở đầu sợi quang [128], bề mặt linh kiện quang học kích thước bé như ma trận vi thấu kính, các bề mặt cảm biến ảnh đa phần tử...

Với những ưu điểm vượt trội, kỹ thuật WLI được quan tâm nghiên cứu và ngày càng được ứng dụng rộng rãi. Ban đầu, kỹ thuật WLI được sử dụng để kiểm tra bề mặt nhẵn trong các ứng dụng bán dẫn [38, 89] và sau đó mở rộng để đo bề mặt có cấu trúc nhấp nhô cao như các thiết bị vi cơ điện tử (MEMS) và vi cơ quang điện tử (MOEMS) [15, 23, 24, 36, 66, 89, 115, 146]. Cùng với việc đo bề mặt nhẵn, một số nhà nghiên cứu đã áp dụng nó để đo các bề mặt thô khi các bề mặt này tạo ra các nhiễu đốm ngẫu nhiên [51, 65]. De Groot và Deck (1995) đã áp dụng kỹ thuật giao thoa ánh sáng trắng trong phép đo cấu trúc sinh học. Đó là đo cấu hình ba chiều bề mặt bên ngoài của mắt bướm, có cấu trúc hình học bề mặt giống ma trận vi thấu kính [49]. Năm 1999, Windecker và Tiziani đã đề xuất một phương pháp dựa vào kỹ thuật WLI để đo bề mặt sau gia công, trong đó độ nhám của bề mặt thu được bằng cách phân tích các mẫu vân WLI, sau đó đánh giá chất lượng bề mặt [156]. Ngoài ra, có rất nhiều công bố về việc sử dụng WLI trong đo cấu trúc hình học 3D của nhiều dạng bề mặt khác nhau, như bề mặt màng mỏng, chiều dày màng, cấu trúc bên trong của vật liệu, ...

Rõ ràng, WLI là phương pháp có nhiều ưu điểm nổi bật để đo cấu trúc hình học ba chiều của bề mặt chi tiết tế vi. Tuy nhiên, không dễ để xây dựng được một thiết bị WLI hoàn chỉnh. Có rất nhiều vấn đề còn tồn tại xung quanh kỹ thuật này. Năm 1990, Hillmann [72] đã chỉ ra rằng các kết quả thu được bằng cách sử dụng các phương pháp WLI để đo cấu trúc hình học bề mặt một mẫu dạng bậc khác với kết quả đo được bằng công cụ đầu dò tiếp xúc (sự sai khác này được giải thích là do sự thay đổi pha khác nhau khi ánh sáng phản xạ trên các bề mặt vật liệu khác nhau). Sau đó, một số nhà nghiên cứu khác đã chỉ ra một số vấn đề liên quan đến WLI [34, 67-69] như: sai số thứ tự vân giao thoa, hiện tượng bước ma, hiệu ứng cánh dơi, ảnh hưởng của độ nghiêng mẫu, ảnh hưởng của vật liệu và hiệu ứng đa tán xạ. Ngoài ra, còn nhiều nguyên nhân khác, bao gồm quang sai của hệ quang và nhiễu xạ bởi vật kính, nhiễu trong quá trình đo... [54, 55]. Do đó, cho đến gần đây vẫn có nhiều nghiên cứu về WLI nhằm nâng cao độ chính xác và tốc độ đo.

Đến nay, một số hãng thiết bị đo lường đã sản xuất và thương mại hóa thiết bị đo biên dạng ba chiều dựa theo kỹ thuật WLI như Polytec, Taylor Hobson, Veeco, Fogale, Zygo, Mitutoyo... Trong khi đó, ở nước ta, chủ đề nghiên cứu phương pháp và thiết bị đo kiểm theo hướng này vẫn còn mới mẻ. Một số cơ sở nghiên cứu và sản xuất ở nước ta đã nhập những hệ thống giao thoa hiện đại, nhưng chỉ đo sai số hình dạng của bề mặt chi tiết dạng phẳng và cầu với diện tích bề mặt lớn. Trong khi đó, với những chi tiết cơ khí chính xác và quang học sau gia công, các thông số bề mặt cần đạt được các yêu cầu cao về độ nhám, độ sóng bề mặt, sai lệch hình dạng nhỏ... [9, 10, 25, 53, 167] lại chưa được đo. Để đánh giá, đo đạc các thông số cấu trúc hình học bề mặt của chi tiết trên cần các thiết bị đo đắt tiền, kết quả thu được thường là số liệu trung bình hoặc chỉ là biên dạng hai chiều bề mặt mẫu [25], nhưng để phân tích ảnh hưởng của công nghệ gia công đến chất lượng bề mặt chi tiết cần dựng lại cấu

trúc hình học 3D của bề mặt, điều này đặc biệt có ý nghĩa đối với các chi tiết quang. Phương pháp quang học sử dụng WLI là phương pháp khả thi nhất có thể thực hiện điều này.

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, việc nghiên cứu phương pháp và xây dựng mô hình thiết bị đo lường cấu trúc hình học ba chiều bề mặt chi tiết quang cơ có ý nghĩa lớn, góp phần thúc đẩy việc thiết kế chế tạo các hệ thống đo lường hiện đại phục vụ cho đo kiểm trong cơ khí, quang học và trong các ngành sản xuất. Chính vì vậy, đề tài “**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**” 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 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 WLI. Để thực hiện được điều này, luận án cần thực hiện các nhiệm vụ cụ thể sau:

- Nghiên cứu phương pháp xác định các thông số bề mặt chi tiết quang, cơ thông qua đo lường cấu trúc hình học ba chiều bề mặt của chi tiết;
- Phân tích lựa chọn sơ đồ nguyên lý đo phù hợp và các thành phần để xây dựng mô hình thiết bị đo; thiết kế chế tạo một số thành phần và đề xuất phương pháp hiệu chỉnh phù hợp;

- Nghiên cứu thuật toán tái tạo cấu trúc hình học 3D của bề mặt từ hình ảnh giao thoa hai chiều. Ứng dụng thuật toán tái tạo cấu trúc hình học 3D của một số dạng chi tiết quang học và cơ khí khác nhau;

- Thực nghiệm đo đạc, xử lý kết quả, so sánh với lý thuyết rút ra các kết luận làm cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo. Phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến đặc tính và hoạt động của mô hình thiết bị.

### **3. Đối tượng nghiên cứu của luận án**

- Đối tượng nghiên cứu chính của luận án là phương pháp và thiết bị đo cấu trúc hình học 3D của bề mặt chi tiết quang, cơ. Trong đó, luận án tập trung vào phương pháp và thiết bị WLI gồm nguyên lý đo, các thành phần trong hệ thống, các yếu tố ảnh hưởng đến hoạt động và độ chính xác của thiết bị, các thuật toán tái tạo cấu trúc hình học 3D bề mặt chi tiết;

- Đối tượng đo mà luận án tập trung là cấu trúc hình học 3D bề mặt tế vi của chi tiết quang và chi tiết cơ cấp chính xác cao.

### **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 của bề mặt chi tiết quang, cơ có mẫu mô bề mặt cỡ nanomet đến vài micromet.

### **5. Phương pháp nghiên cứu của luận án**

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

- Nghiên cứu lý thuyết tập trung vào: Bản chất vật lý của phương pháp WLI, tính toán mô phỏng hình ảnh giao thoa khi giả định bề mặt chi tiết và các thông số cấu hình thiết bị. Từ đó, xây dựng kỹ thuật tái tạo cấu trúc hình học

bề mặt chi tiết từ các hình ảnh giao thoa mô phỏng, so sánh kết quả mô phỏng với các kết quả thu được từ thiết bị khác; các phương pháp thu nhận và xử lý số liệu;

- Phương pháp thực nghiệm tập trung vào: Xây dựng, hiệu chỉnh và đánh giá thực nghiệm đặc tính kỹ thuật của thiết bị giao thoa sử dụng trong đo lường cấu trúc hình học 3D của bề mặt chi tiết quang cơ; khảo sát, đo đạc một số mẫu và so sánh kết quả đo từ mô hình thiết bị với kết quả đo bằng các thiết bị khác để đánh giá độ chính xác.

## **6. Cấu trúc của luận án**

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

**Mở đầu:** Trình bày tính cấp thiết của đề tài, mục đích nghiên cứu, đối tượng và phạm vi nghiên cứu, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài nghiên cứu.

### **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 3D bề mặt bao gồm: lịch sử phát triển, các khái niệm cơ bản về đo cấu trúc hình học 3D bề mặt. Các phương pháp đo được thảo luận, bao gồm cả phương pháp tiếp xúc và không tiếp xúc. Nội dung chương 1 làm cơ sở để luận án lựa chọn kỹ thuật đo phù hợp trong phát triển thiết bị đo.

### **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**

Trong chương 2, cấu trúc vật lý và nguyên tắc làm việc của WLI được thảo luận bao gồm: nguyên lý tạo tín hiệu giao thoa ánh sáng trắng, hình ảnh giao thoa và các kỹ thuật xử lý ảnh. Phần cuối chương trình bày về một số vấn



đề trong kỹ thuật WLI đang là chủ đề cần tiếp tục nghiên cứu hiện nay. Chương 2 là cơ sở để thực hiện nội dung nghiên cứu lựa chọn các thành phần cho việc xây dựng thiết bị đo cấu trúc hình học ba chiều bề mặt ở Chương 3.

### **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 lựa chọn các thành phần và xây dựng mô hình thiết bị đo bằng WLI phù hợp với yêu cầu đo cấu trúc hình học 3D bề mặt chi tiết tế vi trong phòng thí nghiệm. Chương này cũng trình bày mô hình toán học và kết quả mô phỏng sự hình thành vân giao thoa, mô phỏng tái tạo cấu trúc hình học 3D của bề mặt giả định. Các nội dung nghiên cứu hiệu chỉnh thiết bị và các thuật toán tái tạo cấu trúc hình học 3D của bề mặt được đề xuất và chứng minh.

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

Trên cơ sở thiết bị WLI và các kỹ thuật xử lý đã xây dựng ở chương 3, luận án tiến hành khảo sát, đánh giá thực nghiệm hoạt động của toàn bộ mô hình thiết bị. Kết quả đo cấu trúc hình học 3D của các bề mặt chi tiết quang cơ được trình bày và phân tích. Cuối chương là những bàn luận về một số yếu tố ảnh hưởng đến hoạt động và đánh giá sơ bộ độ chính xác của mô hình thiết bị.

### **Kết luận và kiến nghị**

## **Chương 1**

# **ĐO CẤU TRÚC HÌNH HỌC BỀ MẶT, NHỮNG TIỀN BỘ VÀ TỒN TẠI**

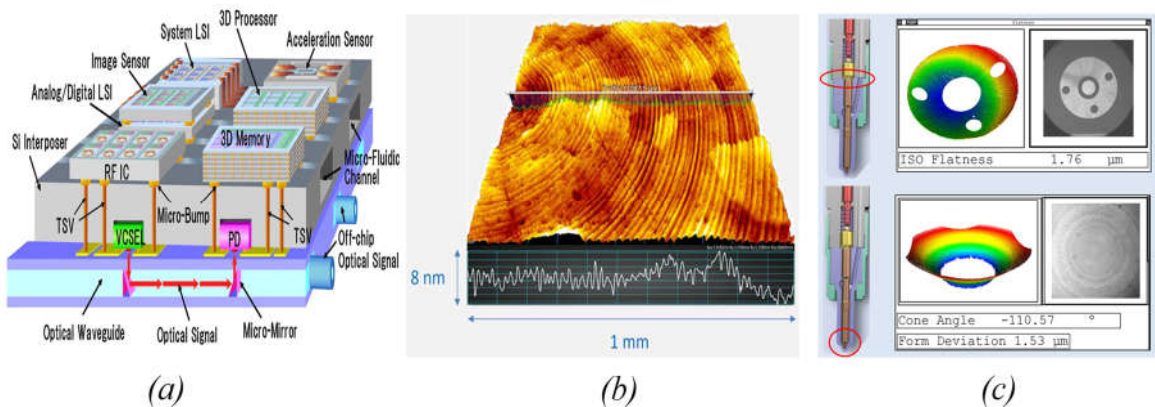
Chương này trình bày tổng quan về lĩnh vực đo cấu trúc hình học bề mặt bao gồm: lịch sử phát triển, các khái niệm cơ bản về đo cấu trúc hình học và các đặc tính bề mặt. Các phương pháp đo cấu trúc hình học 3D của bề mặt chi tiết được thảo luận, bao gồm cả phương pháp tiếp xúc và không tiếp xúc. Ngoại trừ kỹ thuật WLI được trình bày kỹ hơn ở chương sau.

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

Cấu trúc hình học 3D của bề mặt chi tiết hoặc bề mặt sản phẩm là đối tượng phản ánh tốt nhất các tính chất, chất lượng đồng thời đánh giá hiệu quả của quá trình công nghệ chế tạo ra nó. Phép đo cấu trúc hình học 3D bề mặt vì vậy có ý nghĩa lớn.

Các linh kiện hoặc các chi tiết có bề mặt làm việc, như bề mặt IC, bề mặt MEMS, bề mặt các vi thấu kính, các gương siêu nhỏ... là những bề mặt có độ chính xác cao cả về hình dạng, kích thước và có yêu cầu đặc biệt về cấu trúc hình học bề mặt. Các thông số đặc trưng như kích thước, hình dạng, độ nhám bề mặt liên quan trực tiếp đến chức năng, độ tin cậy và độ ổn định của nó. Việc sản xuất những chi tiết như vậy cần được đảm bảo kiểm soát ở nhiều khâu từ quy trình sản xuất, qui trình kiểm tra chất lượng lúc gia công đến lúc thành phẩm. Đo lường và phân tích đặc tính cấu trúc hình học bề mặt tế vi của chi tiết là một công việc không thể thiếu để đảm bảo chất lượng, chức năng, hoạt động của các bề mặt này. Với sự phát triển công nghệ gia công ngày nay, cấu trúc hình học bề mặt được gia công với sai lệch đạt đến cỡ micromet hoặc nanomet và cấu trúc hình học tế vi của từng thành phần đơn lẻ được sắp xếp ngày càng

tinh vi hơn. Ví dụ, hệ thống vi cơ điện tử đa lớp kích thước bé như ở Hình 1.1 (a) là một hệ thống chứa rất nhiều linh kiện quang, cơ học, điện tử khác nhau với kích thước rất bé. Những hệ thống hoặc linh kiện quang học này không những yêu cầu độ chính xác bề mặt, hình dạng của từng thành phần mà còn yêu cầu độ chính xác vị trí của chúng. Hay Hình 1.1 (b) là cấu trúc hình học 3D của bề mặt chi tiết được tiện bằng mũi dao kim cương. Nhìn vào cấu trúc này, người ta có thể đánh giá chất lượng chi tiết ở nhiều khía cạnh như: khả năng bôi trơn, bám dính, ma sát, ăn mòn, mài mòn. Hình 1.1 (c) là hình ảnh kim phun nhiên liệu trong động cơ ô tô. Hình dạng, kết cấu, chất lượng bề mặt ở một số vị trí trên chi tiết này có ý nghĩa vô cùng quan trọng đối với hoạt động của nó. Chỉ cần một sai số nhỏ có thể làm giảm đáng kể hiệu suất, tuổi thọ của thiết bị thậm chí thiết bị không hoạt động được. Một trong những sai số thường được quan tâm là sai số hình dạng bao gồm độ lệch tâm, sai số bán kính, sai số vị trí, sai số góc... và cả độ nhám bề mặt. Đối với những chi tiết như vậy, sai số kích thước, hình dạng, sai lệch vị trí dưới micromet [44].



Hình 1.1: (a) Hệ thống vi cơ điện tử đa lớp [100], (b) Cấu trúc hình học 3D bề mặt chi tiết gia công trên máy tiện siêu chính xác bằng mũi kim cương, (c) Hình ảnh 3D của bề mặt chi tiết kim phun nhiên liệu của động cơ ô tô [44]

Các ví dụ trên cho thấy, kỹ thuật và dụng cụ đo cấu trúc hình học 3D bề mặt tế vi có độ chính xác cao rất cần thiết cho việc kiểm tra và đảm bảo chất lượng sản phẩm kích thước bé hiện nay. Các phép đo này còn có ý nghĩa trong việc nghiên cứu thay đổi công nghệ chế tạo, qui trình sản xuất để tạo ra các chi tiết chính xác cao, có chất lượng tốt.

Đo cấu trúc hình học bề mặt là một nhánh của khoa học liên quan đến việc đo và mô tả đặc điểm của cấu trúc liên kết bề mặt [29]. Đo lường cấu trúc hình học bề mặt nghiên cứu về độ lệch của chi tiết được sản xuất so với thiết kế của nó. Định nghĩa khác về đo lường cấu trúc hình học 3D bề mặt là khoa học đo lường các đặc điểm hình học tế vi trên bề mặt [79].

Đo cấu trúc hình học bề mặt thường được phân tách thành hai giai đoạn chủ yếu: Giai đoạn thu nhận dữ liệu cấu trúc hình học bề mặt bằng thiết bị và giai đoạn đặc tính hóa bề mặt. Mặc dù đo cấu trúc hình học bề mặt là một chủ đề khoa học được quan tâm gần đây, nhưng nó đã trải qua một sự phát triển phức tạp, quanh co và luôn xuất hiện nhiều vấn đề mới cần được giải quyết. Sự phát triển mạnh mẽ của các ngành công nghệ đã tạo động lực tốt cho sự phát triển của các kỹ thuật đo lường này. Chẳng hạn, công nghệ và thiết bị sử dụng trong giai đoạn thu nhận dữ liệu cấu trúc hình học 3D bề mặt đã được thúc đẩy nhờ những tiến bộ trong quang học, công nghệ cảm biến, công nghệ kỹ thuật số.... Quá trình đặc tính hóa bề mặt đã được phát triển nhờ sự phát triển của khoa học máy tính, các bộ lọc kỹ thuật số, lý thuyết sóng, cùng với sự phát triển công nghệ phần mềm và thuật toán mới [79].

Đo cấu trúc hình học bề mặt bắt nguồn từ khảo sát ma sát giữa các bề mặt của các bộ phận chuyển động từ nhiều thế kỷ trước. Sự quan tâm của cộng đồng đối với đo lường bề mặt bắt đầu do sự cần thiết của việc kiểm soát chất lượng chi tiết khi sản xuất vũ khí trong Thế chiến II và nhu cầu chế tạo các sản phẩm

hoạt động trong các môi trường khác nhau [79]. Sự phát triển công nghệ đã mang lại những thay đổi đột phá, dẫn đến tiến bộ cơ bản trong cách tiếp cận đo lường bề mặt. Đến nay, ở “kỷ nguyên công nghệ nano”, với sự phát triển về số lượng các bề mặt siêu chính xác, ngành khoa học đo lường bề mặt đang đứng trước những thay đổi lớn về mô hình, kỹ thuật đo, phạm vi đo...

## **1.2. Sự phát triển thiết bị đo lường cấu trúc hình học bề mặt**

Các bề mặt ban đầu được đánh giá theo những cách thô sơ, trực quan nên mang tính chủ quan và chỉ hiệu quả khi được thực hiện bởi người có kinh nghiệm. Với sự phát triển của các kỹ thuật sản xuất tiên tiến hơn, các đặc điểm cấu trúc hình học bề mặt ngày càng nhỏ đi và vượt xa phạm vi có khả năng đánh giá định tính bằng phương pháp trực quan. Do đó, cần phải sử dụng thiết bị có khả năng phóng đại các đặc điểm hình học đến mức có thể nhìn thấy cả về cấu trúc hình học chiều ngang và mấp mô bề mặt. Trong công nghiệp, cấu trúc hình học bề mặt được ưu tiên xác định hơn vì nó liên quan trực tiếp đến độ nhám bề mặt, ảnh hưởng đến dung sai lắp ghép...

Một trong những thiết bị đo cấu trúc hình học bề mặt đầu tiên được Tomlinson (1919) phát triển tại Phòng thí nghiệm Vật lý Quốc gia Mỹ. Ông đã sử dụng điện kế kết hợp với gương để tạo ra thiết bị quan sát mấp mô bề mặt với độ phóng đại khoảng 30 lần [79]. Tuy nhiên, Schmaltz (1929, 1936) mới là người đầu tiên xem xét nghiêm túc về thiết bị đo chiều cao mấp mô bề mặt, sử dụng cả phương pháp quang học và phương pháp tiếp xúc. Schmaltz đã sử dụng phương pháp mặt cắt ánh sáng: bằng cách chiếu một dải ánh sáng mỏng lên bề mặt theo một góc nghiêng, sau đó quan sát dải sáng trên bề mặt. Mấp mô của bề mặt tỷ lệ với cosin góc nghiêng của biên dạng dải sáng quan sát được. Tuy nhiên, trong khoảng thời gian này, các nhà sản xuất nhận thấy phương pháp quang học này khó sử dụng trong môi trường công nghiệp. Vì vậy, khoảng năm 1933, các phương pháp tiếp xúc đơn giản bắt đầu được sử dụng, cụ thể là

phương pháp sử dụng đầu dò tiếp xúc. Một số công ty tham gia vào lĩnh vực này như Taylor Hobson đã phát triển thiết bị đo thương mại đầu tiên có tên “Talysurf 1”. Thiết bị có khả năng cung cấp biểu đồ định lượng biên dạng hai chiều của bề mặt.

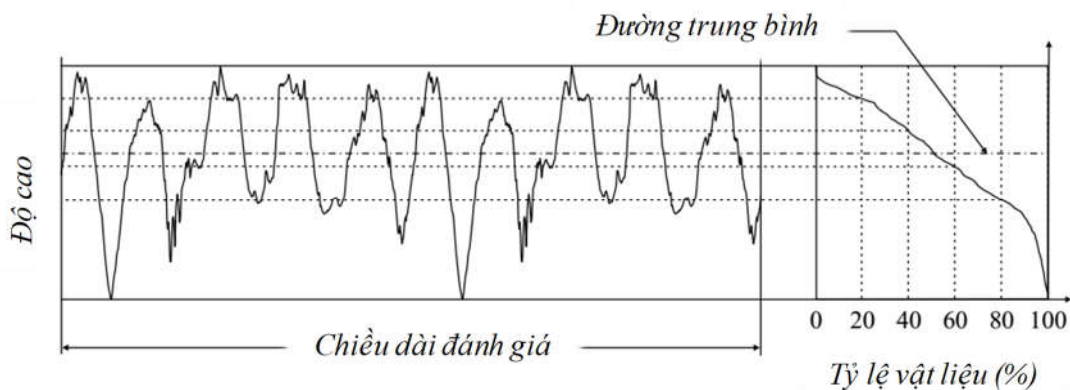
Ở thời đại kỹ thuật số ngày nay, các tham số đặc trưng và phương pháp phân tích cấu trúc hình học bề mặt phát triển ngày càng phong phú. Công cụ có thể đo cả kết cấu bề mặt và hình dạng với một phép đo biên dạng duy nhất đã được phát minh (Garratt, 1977) và được Taylor Hobson thương mại hóa năm 1984 [79]. Tuy nhiên, thiết bị này có phạm vi đo theo chiều dọc rất hạn chế, thường chỉ 100-300 micromet. Giao thoa kế dịch pha (PSI) được phát triển riêng lẻ bởi Taylor Hobson (Mansfield và Buehring 1997) đã cải thiện đáng kể phạm vi và độ phân giải tương ứng là 24 mm và 0,1nm [79]

Với sự phát triển của khoa học kỹ thuật trong những thập kỷ qua, có nhiều thiết bị đo cấu trúc hình học bề mặt được phát triển và thương mại hóa áp dụng các nguyên lý đo lường khác nhau, bao gồm sử dụng đầu dò tiếp xúc, giao thoa kế dịch pha (PSI), giao thoa kế ánh sáng kết hợp thấp (CSI), kính hiển vi đồng tiêu (confocal microscope), kỹ thuật ánh sáng có cấu trúc (structured-light), kính hiển vi quét xuyên hầm (STM), kính hiển vi lực nguyên tử (AFM)... Các thiết bị đo lường này đã và đang được đầu tư nghiên cứu phát triển để giải quyết nhiều thách thức lớn như đo lường các bề mặt có cấu trúc và bề mặt dạng tự do, nâng cao phạm vi, tốc độ và độ chính xác.

### **1.3. Cấu trúc hình học bề mặt**

Thoạt tiên, một vấn đề đặt ra là định lượng cấu trúc hình học bề mặt bằng các thông số nào đó. Ý tưởng ban đầu là sử dụng một số duy nhất để thể hiện cấu trúc hình học bề mặt, theo tỷ lệ tương ứng từ tốt đến xấu. Nhưng, một thông số chỉ có thể mô tả một đặc tính nhất định của bề mặt. Số thông số hoặc thuộc

tính bề mặt nên được thêm vào. Để thể hiện đầy đủ hơn đặc tính của bề mặt bao gồm: thông tin độ nhấp mô bề mặt và tỷ lệ vật liệu, Abbott và Firestone đã đề xuất một đường cong đơn giản (Hình 1.2, đường cong Abbott–Firestone) [79]. Ý tưởng này là một bước tiến cơ bản trong mô tả cấu trúc hình học bề mặt bởi vì nó liên quan đến các mô tả thống kê về bề mặt.



Hình 1.2: Đường cong Abbott–Firestone

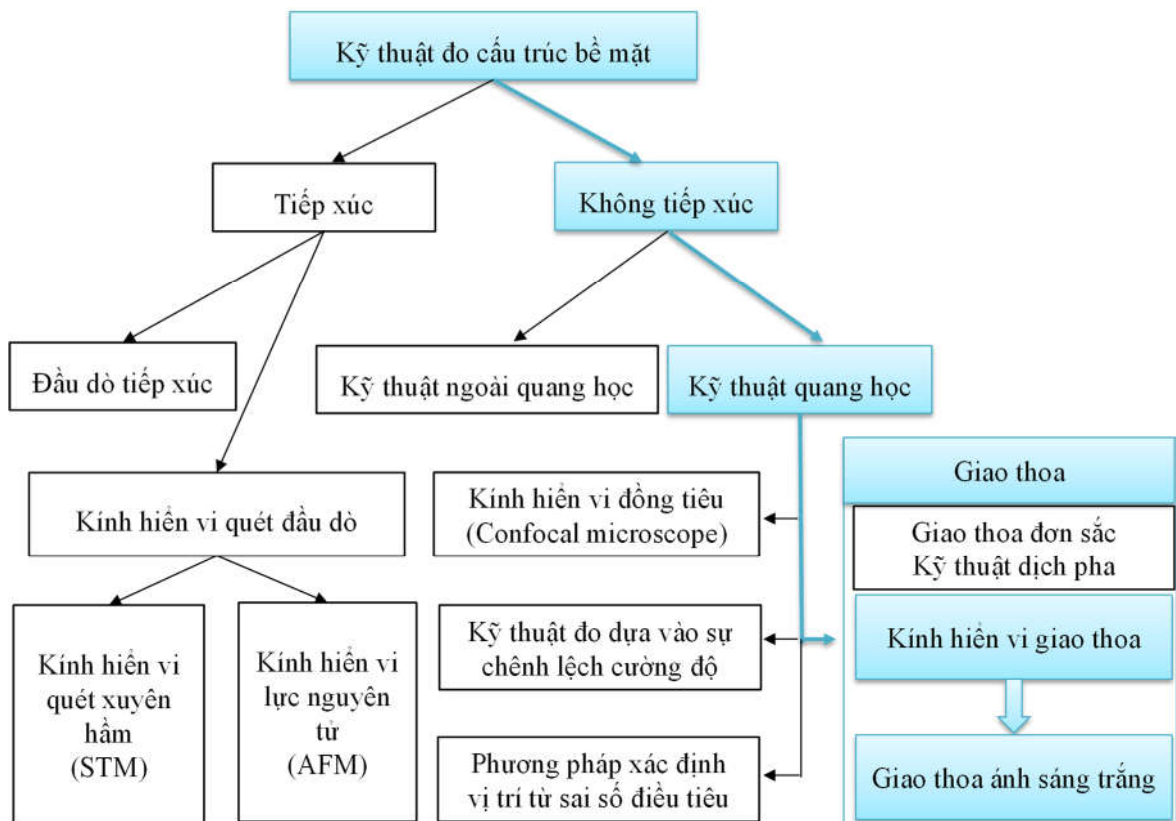
Vào những năm 1940, các thành phần kết cấu khác nhau, cụ thể là hình dạng, độ sóng và độ nhám, được xác định theo các dải bước sóng sử dụng các bộ lọc khác nhau (ISO 25178-2: 2012) [73]. Các bộ lọc là phương tiện mà các tính năng bề mặt cần quan tâm có thể được trích xuất từ kết quả đo phục vụ các phân tích tiếp theo. Số lượng lớn các bộ lọc sau đó đã được phát triển để tách các thành phần đặc tính bề mặt. Theo cách tiếp cận mới (sử dụng kỹ thuật số) có hàng trăm thông số đã được phát triển để đánh giá chất lượng bề mặt, điều này cũng dẫn đến những khó khăn về tiêu chuẩn hóa sau này.

Mặc dù biên dạng theo đường của bề mặt cung cấp thông tin để kiểm soát quá trình sản xuất, nhưng không thể dùng nó đánh giá kết cấu của cả bề mặt. Đặc tính cấu trúc hình học bề mặt theo diện tích đã được đưa ra nhằm cố gắng mô tả các tính năng cơ bản và chức năng của bề mặt, chẳng hạn như đánh giá hình dạng và hướng kết cấu, ước tính các tính chất đặc trưng. Điều này cho thấy sự cần thiết trong đánh giá cấu trúc hình học bề mặt bằng dữ liệu 3D.

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

Mục này thảo luận nguyên lý của một số kỹ thuật tiêu biểu dựa trên phương pháp đo tiếp xúc như đầu dò tiếp xúc, kính hiển vi quét đầu dò và một số kỹ thuật đo không tiếp xúc như kính hiển vi đồng tiêu, kỹ thuật dựa trên sự chênh lệch cường độ, xác định vị trí từ sai số điều tiêu hay kỹ thuật giao thoa.

Kỹ thuật đo cấu trúc hình học bề mặt có thể được phân thành hai nhóm chính là kỹ thuật đo tiếp xúc và không tiếp xúc. Trong kỹ thuật đo không tiếp xúc, tùy thuộc vào phương pháp đo có thể phân thành kỹ thuật quang học và kỹ thuật ngoài quang học như thể hiện ở Hình 1.3.



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

Đầu dò tiếp xúc và kính hiển vi quét đầu dò được coi là loại cảm biến tiếp xúc vì chúng sử dụng đầu dò để quét ngang bề mặt chi tiết. Các thiết bị này

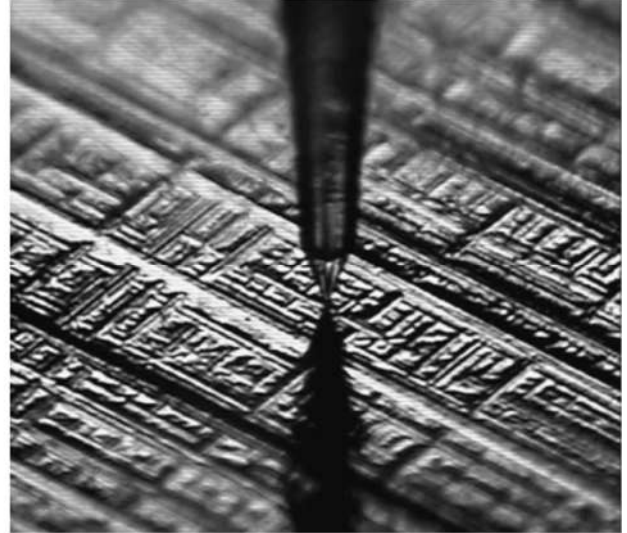
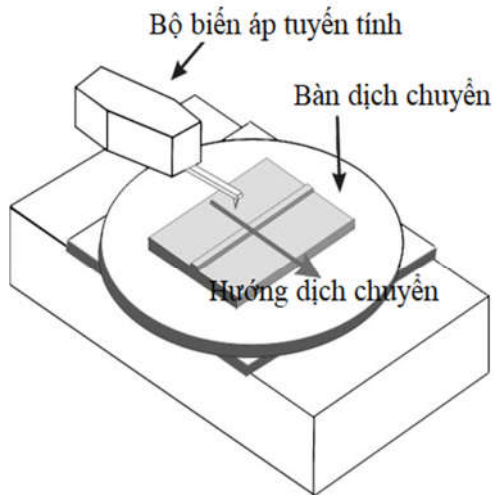


thực hiện phép đo với tốc độ tương đối chậm nhưng có thể đo được với độ phân giải ngang tốt, có thể thấp hơn độ phân giải quang học của kính hiển vi. Đầu dò tiếp xúc, một trong những thiết bị đầu tiên được phát triển, có giá thành rẻ và dễ sử dụng. Vì những lý do này, đầu dò tiếp xúc rất phổ biến và trở thành thiết bị tiêu chuẩn trong đánh giá bề mặt các sản phẩm cơ khí và quang học [74-76]. Kính hiển vi quét đầu dò được phát triển sau và được sử dụng cả ở phòng thí nghiệm, ở các ngành công nghiệp bán dẫn và đo các hệ thống vi cơ (MEMS). Kính hiển vi quét đầu dò có độ phân giải lớn và có khả năng đo cấu trúc hình học nhiều bề mặt làm từ các vật liệu có tính chất khác nhau. Đối với những bề mặt chi tiết kích thước lớn có thể sử dụng máy đo tọa độ (CMM) sử dụng đầu dò lớn hơn và có thể hoạt động ở chế độ quét để thu được dữ liệu 3D bề mặt [96, 97, 131, 152, 153].

#### **1.4.1.1. Thiết bị đo đầu dò tiếp xúc**

Thiết bị đo đầu dò tiếp xúc (Hình 1.4) hoạt động bằng cách di chuyển một đầu dò nhỏ trên bề mặt mẫu đo và cảm nhận các thay đổi chiều cao. Đầu dò này có thể đo bề mặt mấp mô khoảng một milimet. Đầu dò tiếp xúc thường được làm từ vật liệu cứng như kim cương với bán kính cong từ 0,5 đến 50  $\mu\text{m}$ . Hình dạng và bán kính cong của đầu dò, cùng với hình dạng bề mặt và khoảng thời gian lấy mẫu giữa các điểm dữ liệu, xác định độ phân giải ngang của hệ thống [7, 14]. Kích thước, hình dạng, góc nhọn, bán kính cong của đầu dò cũng xác định độ phân giải dọc và độ dốc lớn nhất có thể đo được. Bán kính và góc nhọn của đầu dò càng nhỏ cho phép đo chính xác hơn và kết quả càng gần với cấu trúc hình học bề mặt thực tế. Tuy nhiên, với những đầu nhọn, áp lực tác dụng lên bề mặt lớn có thể làm biến dạng mẫu đo gây ra lỗi đo lường hoặc có thể làm hỏng bề mặt của chi tiết. Thông thường tải trọng tác dụng của đầu dò từ 0,1 mg đến 50 mg sẽ giảm thiểu được hiện tượng biến dạng [153]. Đối với phép đo

biên dạng theo kỹ thuật này, độ chính xác phụ thuộc rất nhiều vào đối tượng đo và kích thước đầu dò.



*Hình 1.4: Sơ đồ cấu tạo của máy đo và đầu dò tiếp xúc [108]*

Trong quá trình quét, sự dịch chuyển thẳng đứng của đầu dò được xác định thông qua điện áp đo được từ cảm biến và chuyển đổi thành dữ liệu chiều cao. Đầu dò cảm ứng có thể đo được độ nhám của bề mặt với RMS khoảng  $0,5 \text{ \AA}$  và độ phân giải ngang  $0,1 - 0,2 \mu\text{m}$ . Chiều dài đo được theo kỹ thuật này có thể lên đến 200 mm hoặc lớn hơn nếu sử dụng kỹ thuật ghép các lần đo [131, 152]. Nhược điểm chính của thiết bị này là tốc độ đo chậm [81, 107] và có thể làm ảnh hưởng đến mẫu đo do tác động cơ học của đầu dò.

#### **1.4.1.2. Kính hiển vi quét đầu dò**

Một loại thiết bị khác sử dụng phương pháp tiếp xúc đo biên dạng bề mặt là kính hiển vi quét đầu dò (SPM) với đầu dò di chuyển rất gần (khoảng vài angstrom) hoặc tiếp xúc trực tiếp bề mặt cần đo [16, 21]. Do tính chất tương tác bề mặt như vậy nên lực tác dụng của kỹ thuật này nhỏ hơn nhiều so với đầu dò tiếp xúc. Kính hiển vi quét đầu dò có thể được phân thành hai loại: Kính hiển vi quét xuyên hầm và kính hiển vi lực nguyên tử.

### ***a) Kính hiển vi quét xuyên hầm***

Kính hiển vi quét xuyên hầm (STM) là kính hiển vi phi quang học, được sử dụng để quan sát hình thái học bề mặt của vật rắn hoạt động dựa trên việc ghi lại dòng xuyên hầm của điện tử khi sử dụng một mũi dò quét trên bề mặt mẫu. STM là một công cụ mạnh để quan sát cấu trúc hình học bề mặt của vật rắn với độ phân giải tới cấp độ nguyên tử. STM lần đầu được phát minh năm 1981. Hai nhà phát minh Gerd Binnig và Heinrich Rohrer (IBM, Zürich) đã giành giải Nobel Vật lý năm 1986 cho phát minh này.

Kính hiển vi quét xuyên hầm được sử dụng thành công để đánh giá bề mặt quang học từ giữa những năm 1980 [4, 5, 140]. STM là thiết bị quan sát cấu trúc hình học tế vi bề mặt thuộc nhóm thiết bị kính hiển vi quét đầu dò, tức là việc ghi ảnh dựa trên nguyên tắc quét đầu dò trên bề mặt. STM sử dụng một mũi dò nhọn mà đầu của mũi dò có kích thước cỡ một nguyên tử, quét rất gần bề mặt mẫu. Khi đầu dò được quét trên bề mặt mẫu, sẽ xuất hiện các điện tử di chuyển từ bề mặt mẫu sang mũi dò do hiệu ứng xuyên hầm lượng tử và việc ghi lại dòng xuyên hầm này sẽ cho các thông tin về cấu trúc hình học bề mặt.

Ưu điểm của STM: Đây là kỹ thuật ghi ảnh hình thái học và cấu trúc hình học bề mặt với độ phân giải rất cao và cho ảnh chất lượng tốt. STM không gây phá hủy mẫu và cho phép đo trên bề mặt trong quá trình chế tạo. Tuy nhiên, STM cũng có nhiều hạn chế có thể kể đến như: Mẫu sử dụng trong STM phải là mẫu dẫn điện hoặc bán dẫn; việc đo đạc sử dụng STM đòi hỏi bề mặt mẫu siêu sạch và việc chống rung là một đòi hỏi lớn; tốc độ đo thấp và chỉ giới hạn cho đo cấu trúc hình học bề mặt tế vi.

### ***b) Kính hiển vi lực nguyên tử***

Kính hiển vi lực nguyên tử (AFM) có thể được coi là một phiên bản sửa đổi để khắc phục một số hạn chế của STM. Năm 1986, Binnig phát minh ra

AFM (bằng sáng chế được đệ trình vào năm 1986 [19]) và thử nghiệm đầu tiên được thực hiện trong cùng năm bởi Binnig, Quate và Gerber [18]. AFM có thể đo bề mặt bất kỳ mà không phụ thuộc vào độ dẫn điện của nó. Trong AFM, đầu dò được đặt ở phần tự do của cần rung và được để tiếp xúc với bề mặt. Khi quét qua bề mặt mẫu, lực giữa đầu dò và mẫu làm cho cần rung uốn cong. Dữ liệu độ lệch được ghi lại và phân tích để thu được thông tin bề mặt. Năm 1989, Alexander và cộng sự [8] đã phát triển một hệ thống xác định độ lệch thông qua tín hiệu laser phản xạ từ gương gắn trên đầu cần rung. Một kỹ thuật đo độ lệch khác kết hợp sử dụng laser diode được công bố bởi Sarid và cộng sự [137]. Ngoài ra, AFM có thể hoạt động ở chế độ không tiếp xúc. Trong chế độ không tiếp xúc, lực hấp dẫn giữa bề mặt và đầu dò được đo trong quá trình đầu dò dao động với tần số cộng hưởng [63, 148]. Chế độ hoạt động thứ ba của AFM được gọi là chế độ gõ được công bố vào năm 1993 bởi Zhong và cộng sự và trở thành chế độ hoạt động phổ biến nhất của AFM. Trong chế độ này, thông tin bề mặt thu được bằng cách gõ nhẹ bề mặt với đầu dò đang dao động ở tần số gần tần số cộng hưởng của thanh rung [166].

AFM được sử dụng rộng rãi cho các mục đích đo bề mặt và có độ phân giải ngang đến cấp độ nanomet và độ phân giải dọc đến dưới nanomet [139]. Hạn chế của AFM là tốc độ thấp và chi phí cao của phép đo. Giống như các phương pháp tiếp xúc, chế độ tiếp xúc và chế độ gõ của AFM có khả năng làm hỏng bề mặt, và tương tự như đầu dò tiếp xúc khả năng đo ở chế độ tiếp xúc phụ thuộc vào hình dạng đầu dò [37].

Mặc dù các phương pháp tiếp xúc đo biên dạng bề mặt có độ phân giải cao, nhưng tốc độ thấp và chi phí lớn. Trái ngược với việc sử dụng đầu dò cơ khí để đo biên dạng bề mặt, các phương pháp không tiếp xúc, đặc biệt là các kỹ thuật quang học đồng tiêu hoặc giao thoa có thể đo biên dạng của một vùng trong khoảng thời gian tương đối ngắn.

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

Các phương pháp quang học không tiếp xúc có ưu điểm vượt trội so với thiết bị đo tiếp xúc [97]. Các phương pháp này không sử dụng đầu dò giúp loại bỏ nguy cơ làm hỏng bề mặt. Trong khi đó, phương pháp đo tiếp xúc có tốc độ chậm và phạm vi hạn chế. Ngược lại, đối với hầu hết các kỹ thuật quang học không tiếp xúc, cấu trúc hình học 3D bề mặt đối tượng được ghi lại đồng thời trên toàn bộ trường nhìn.

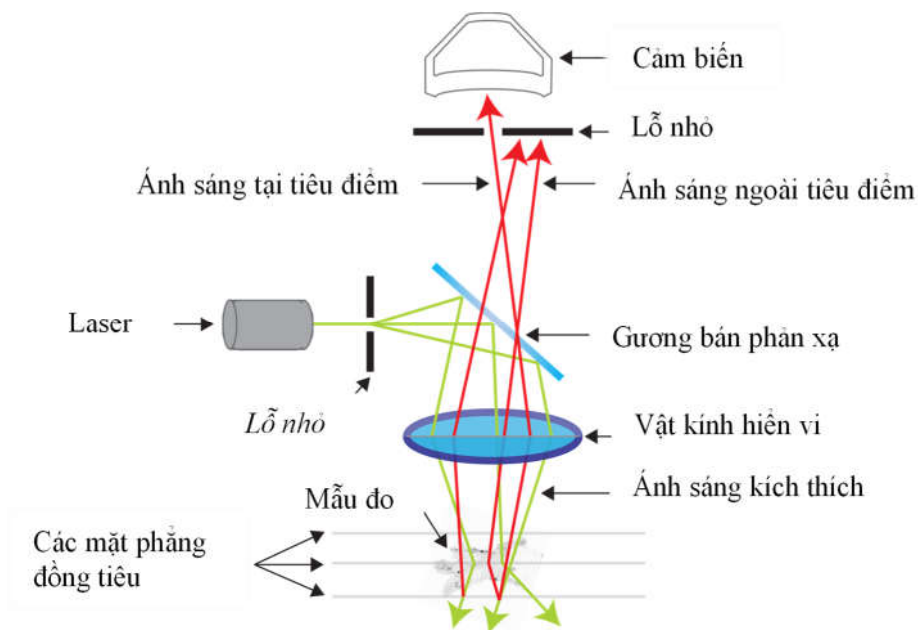
#### **1.4.2.1. Kính hiển vi điện tử**

Kính hiển vi điện tử (EM) là một trong những kỹ thuật không tiếp xúc được Ruska công bố vào năm 1933 và qua nhiều năm nó đã được sử dụng để đo cấu trúc hình học bề mặt [109]. Có hai loại kính hiển vi điện tử chính (a) kính hiển vi điện tử quét (SEM) và (b) kính hiển vi điện tử truyền qua (TEM). Đối với các mục đích đo bề mặt, SEM được sử dụng nhiều hơn với độ phân giải dọc khoảng nanomet. Các electron năng lượng cao được gia tốc và tác động vào bề mặt vật tạo ra các electron thứ cấp. Các electron này được phát hiện và xử lý để tái tạo cấu trúc hình học của bề mặt [106].

Khi sử dụng SEM, bề mặt mẫu đo phải có tính dẫn điện và được nối đất để tránh tích tụ điện tích tĩnh điện. Vì vậy, các vật không dẫn điện cần được phủ vật liệu dẫn điện (như vàng) trước khi được đặt vào buồng chân không. Khả năng chỉ đo bề mặt dẫn điện là nhược điểm chính của SEM.

Các kỹ thuật đo cấu trúc hình học 3D bề mặt không tiếp xúc thường được sử dụng và phát triển, nhất là các kỹ thuật quang học. Các kỹ thuật quang học điển hình sẽ được trình bày sau đây.

### 1.4.2.2. Kính hiển vi đồng tiêu



Hình 1.5: Sơ đồ nguyên lý của kính hiển vi đồng tiêu

Kính hiển vi đồng tiêu là kỹ thuật được sử dụng thường xuyên để ghi hình ảnh 3D trong y học và cũng được sử dụng như một công cụ đo cấu trúc hình học 3D bề mặt. Năm 1961, Minsky được cấp bằng sáng chế về kỹ thuật cải thiện chất lượng hình ảnh của kính hiển vi sinh học bằng cách làm giảm ánh sáng tán xạ trong hệ thống. Về sau, phương pháp này trở nên phổ biến và phát triển thành kính hiển vi đồng tiêu [112]. Hình 1.5 là sơ đồ nguyên lý của kính hiển vi đồng tiêu. Kính hiển vi đồng tiêu về bản chất là một dạng cải tiến hơn của kính hiển vi huỳnh quang. Điểm khác biệt là kính hiển vi đồng tiêu có độ phân giải lớn hơn nhờ sử dụng các lỗ hội tụ để loại bỏ các ánh sáng không hội tụ hoàn toàn và chùm tia được quét trên mẫu vật (do kích thước mũi chùm tia được hội tụ rất nhỏ).

Mặc dù kính hiển vi đồng tiêu ban đầu được thiết kế để đo lường các mẫu sinh học, vào những năm 1980 nó đã được sử dụng trong việc đo lường các bề mặt chi tiết quang cơ. Ở kính hiển vi đồng tiêu, nguồn sáng được chiếu tập

trung vào một điểm trên bề mặt vật thể, thay vì chiếu sáng toàn bộ bề mặt. Hình ảnh của điểm sáng này được lọc bởi một lỗ nhỏ đặt ở vị trí mặt phẳng ảnh nét nhất của kính hiển vi trước khi được thu nhận vào cảm biến. Việc hạn chế sự chiếu sáng và ánh sáng tán xạ cho kết quả đo đạt độ phân giải và tỷ lệ tín hiệu cao. Kính hiển vi đồng tiêu thường sử dụng hai cơ cấu quét. Một cơ cấu quét ngang theo chiều x,y có thể thu được hình ảnh hai chiều (2D) và một cơ cấu quét dọc sử dụng để xây dựng hình dạng ba chiều (3D) [11, 129, 130]. Trong những năm qua, một số phương pháp đã được đề xuất để cải thiện tốc độ thu thập dữ liệu cho kính hiển vi đồng tiêu. Hầu hết trong số đó dựa trên việc thay đổi khẩu độ đồng tiêu [11].

#### 1.4.2.3. Kỹ thuật đo dựa vào chênh lệch cường độ

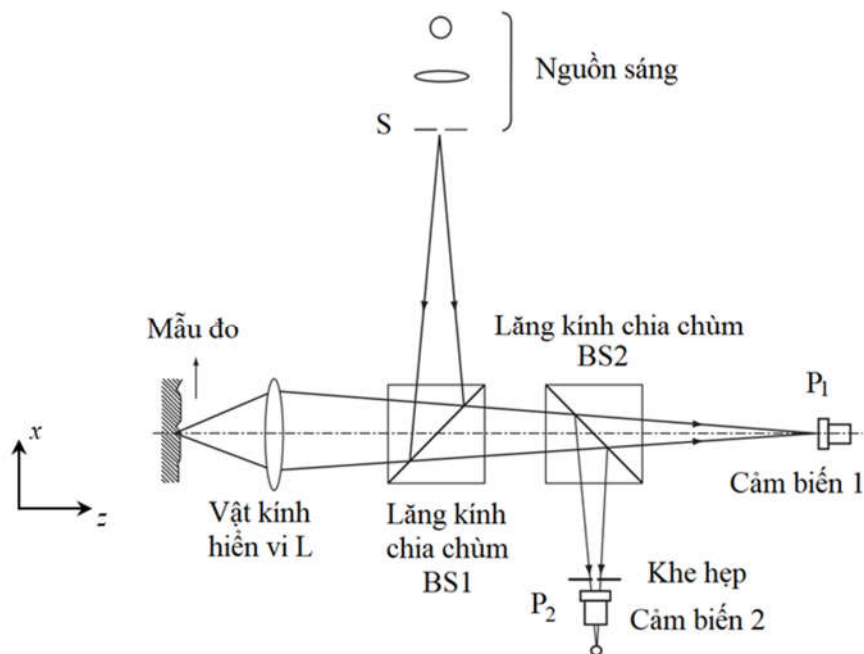
Đã có nhiều nghiên cứu và công bố về phương pháp đo cấu trúc hình học 3D bề mặt dựa vào sự chênh lệch cường độ tín hiệu. Một trong những sơ đồ cơ bản của phương pháp thể hiện trên Hình 1.6, trong đó, sự thay đổi khoảng cách được xác định thông qua sự thay đổi cường độ do sự dịch chuyển của điểm sáng trên bề mặt mẫu đo [138, 163]. Trên Hình 1.6, ảnh của một nguồn điểm (S) được chiếu lên bề mặt mẫu đo thông qua bộ chia chùm (BS1) và vật kính hiển vi (L). Ánh sáng phản xạ từ bề mặt mẫu tạo ảnh ở  $P_1$  và  $P_2$ . Một photodetector diện tích lớn được dùng để đo cường độ  $I_1$  tại  $P_1$ . Một cảm biến khác với khe nhỏ phía trước đo cường độ  $I_2$  của phần ánh sáng xuyên qua khe đặt cách  $P_2$  một lượng lệch tiêu  $d$ . Cường độ  $I_1$  là phản ánh độ phản xạ của bề mặt mẫu, cường độ  $I_2$  là phản ánh lượng dịch chuyển dọc theo trục quang. Các tín hiệu đầu ra của hệ thống chuẩn hóa theo tỷ số  $I_2/I_1$ .

Nếu bề mặt mẫu dịch chuyển một lượng nhỏ  $z$  theo chiều dọc trục, vị trí của hình ảnh  $P_2$  sẽ thay đổi theo lượng  $M^2z$  ( $M$  là độ phóng đại ngang). Sử dụng

một phép xấp xỉ hình học đơn giản với  $z \ll d/M^2$ , cường độ là hàm phụ thuộc vào lượng dịch chuyển như sau [138]:

$$I_2(z) = \frac{2 \cdot \Delta s \cdot I_1 \cdot (b - d)}{\pi d^2 r_0} M^2 z + I_2(0) \quad (1.1)$$

Trong đó:  $I_2(z)$  và  $I_2(0)$  là cường độ tín hiệu thu được tại cảm biến  $P_2$  tại các vị trí bề mặt theo chiều dọc  $z$  và vị trí tham chiếu ( $z = 0$ ) tương ứng;  $\Delta s$  là chiều rộng khe;  $r_0$  là bán kính đồng tử vào của vật kính hiển vi;  $b$  khoảng cách từ mặt phẳng đồng tử ống kính đến mặt phẳng ảnh  $P_2$  ban đầu (khi  $z = 0$ ).



Hình 1.6: Sơ đồ nguyên lý phương pháp xác định vị trí từ sai lệch cường độ

Khi mẫu dịch chuyển theo hướng  $x$ , độ cao  $z$  được tính dựa vào phương trình (1.1), ta thu được biên dạng của bề mặt. Phương pháp này đạt độ chính xác khoảng  $0,25 \mu\text{m}$  trong phạm vi đo đến  $300 \mu\text{m}$  [138].

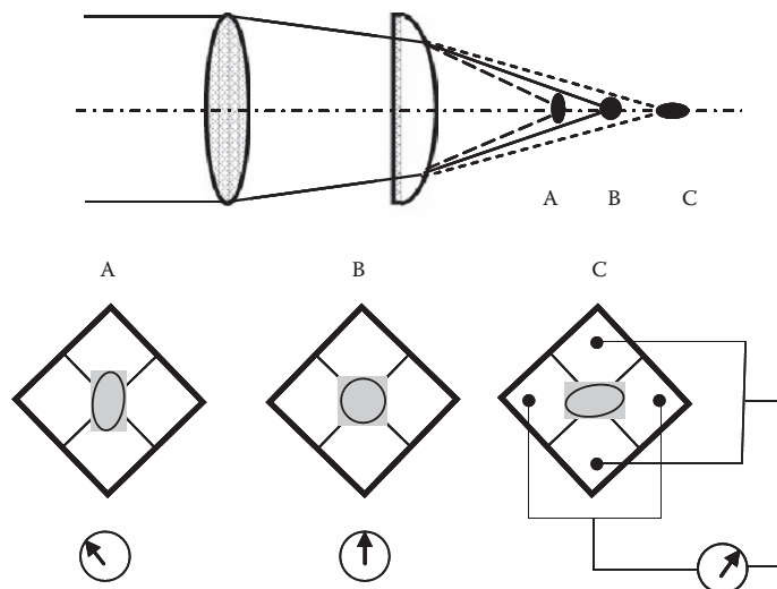
#### 1.4.2.4. Kỹ thuật xác định vị trí từ sai số điều tiêu

Một số cảm biến đo dịch chuyển không tiếp xúc bằng cách phát hiện sai số điều tiêu đã được đề xuất với các phương pháp khác nhau gồm: Phương pháp



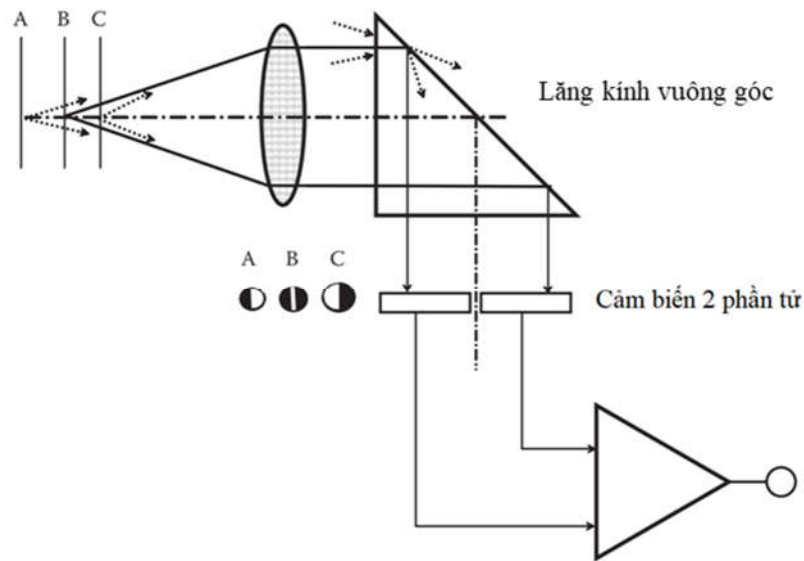
loạn thị [114], phương pháp lưới cắt [64], và phương pháp góc tới hạn [92]. Các phương pháp này có thể đạt được độ phân giải cao với sơ đồ quang học đơn giản.

Ở Hình 1.7 là sơ đồ nguyên lý xác định vị trí từ sai số điều tiêu bằng loạn thị. Trong đó, một thấu kính trụ được chèn vào hệ quang để tạo ra sai lệch loạn thị. Một cảm biến bốn phân tử được sử dụng để xác định vị trí nét nhất của bề mặt đối tượng đo [114].



Hình 1.7: Sơ đồ nguyên lý xác định vị trí từ phương pháp loạn thị

Phương pháp góc tới hạn sử dụng lăng kính được báo cáo bởi Kohno và các đồng nghiệp vào năm 1988 [92], và nguyên lý này được áp dụng trong thiết bị thương mại HIPOSS. HIPOSS phục vụ đo cấu trúc hình học bề mặt chi tiết tiện bằng mũi kim cương hoặc bề mặt bán dẫn, vì chúng đòi hỏi phải sử dụng cảm biến đo cấu trúc hình học bề mặt không tiếp xúc thay cho phương pháp tiếp xúc thông thường. Kết quả đo sử dụng phương pháp góc tới hạn đạt độ chính xác đến 1 nm và có thể sử dụng đo lường bề mặt có độ nghiêng  $\pm 5^\circ$  mà vẫn đảm bảo độ chính xác trong khi hệ đo rất nhỏ gọn [163].



Hình 1.8: Sơ đồ nguyên lý của phương pháp góc tới hạn

Hình 1.8 thể hiện nguyên lý của phương pháp góc tới hạn. Sau khi đi qua vật kính hiển vi, ánh sáng phản xạ được chuyển thành chùm song song nếu bề mặt được kiểm tra nằm tại vị trí tiêu điểm B và nếu bề mặt đo ở vị trí khác (A, C) chùm phản xạ sẽ trở thành chùm hội tụ hoặc phân kỳ. Một lăng kính phản xạ toàn phần được đặt vào ngay sau vật kính hiển vi để phản xạ các chùm ánh sáng nhỏ hơn góc tới hạn vào đầu thu hai phần tử. Khi mẫu nằm ngoài độ sâu hội tụ của vật kính hiển vi, tín hiệu thu được bằng 0 (hoặc rất bé). Khi bề mặt vật thể ở vị trí C, gần ống kính, chùm ánh sáng sẽ phân kỳ sau khi đi qua vật kính hiển vi. Kết quả là, ánh sáng ở phía trên của trục quang đến bề mặt phản xạ của lăng kính với góc nhỏ hơn góc tới hạn. Điều này làm cho ánh sáng được khúc xạ qua mặt huyền, đi ra khỏi lăng kính và không đi vào đầu thu. Ánh sáng ở phía dưới của trục quang được hoàn toàn phản xạ khi góc tới lớn, tạo ra sự khác biệt về cường độ thu được trên 2 phần tử của cảm biến. Đây chính là tín hiệu sai số điều tiêu. Tại vị trí A, xa ống kính, hiện tượng ngược lại xảy ra và nhận được tín hiệu có dấu đảo ngược. Bảng 1.1 thể hiện thông số của một hệ

thống đo biên dạng 3D Rodenstock Model RM 600 3-D/C đã được thương mại hóa hoạt động theo nguyên lý góc tới hạn này.

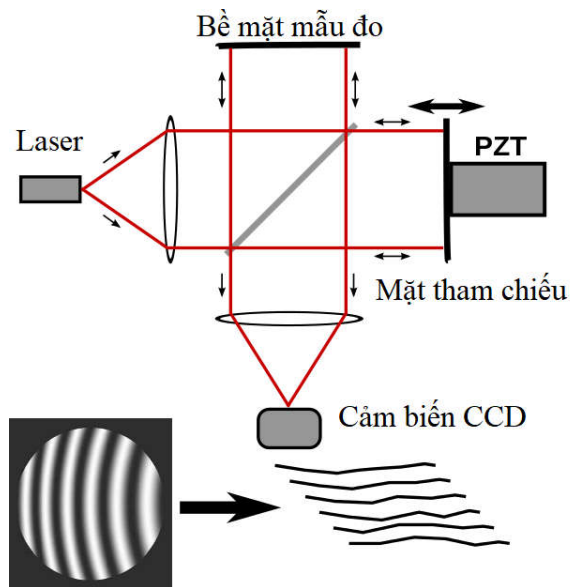
*Bảng 1.1: Thông số kỹ thuật của Rodenstock Model RM 600 3-D/C [163]*

Phạm vi đo dọc	300 $\mu$ m
Độ phân giải dọc	0.01 $\mu$ m
Phạm vi đo ngang	100x100 mm
Độ phân giải ngang	1 $\mu$ m
Tốc độ lấy mẫu	<2000Hz,
Tốc độ đo lớn nhất	260mm/phút
Tốc độ dịch chuyển	800mm/phút
Khối lượng máy	20kg
Kích thước bàn máy	185x185mm

#### 1.4.2.5. Kỹ thuật giao thoa dịch pha

Phép đo giao thoa dịch pha (PSI) là kỹ thuật quang học không tiếp xúc được phát triển để đo cấu trúc hình học bề mặt quang học (mặt cầu, mặt phẳng). Hệ thống PSI đầu tiên được công bố năm 1966 và đến những năm 1970, kỹ thuật này phát triển mạnh [107, 141]. PSI có thể xây dựng hình dạng 3D của bề mặt nhẵn với độ chính xác cao cỡ nanomet đến angstrom và độ phân giải ngang khoảng micromet [97]. Các hệ thống PSI sử dụng nguồn sáng laser và tạo tín hiệu giao thoa từ hai chùm phản xạ, một chùm phản xạ trên bề mặt đối tượng đo và một chùm phản xạ trên bề mặt tham chiếu. Hình 1.9 là sơ đồ quang học của kỹ thuật giao thoa dịch pha sử dụng giao thoa kế Michelson. Kỹ thuật giao thoa pha dịch pha có thể sử dụng nhiều sơ đồ khác nhau như: Michelson, Mirau, Linnik, Fizeau... Cấu trúc hình học 3D của bề mặt được tái tạo bằng cách dịch chuyển quang trình của một nhánh trong sơ đồ giao thoa để tạo ra dịch chuyển

pha ở tín hiệu giao thoa. Lượng dịch pha được không chế cố định ở các lần dịch chuyển. Tương ứng với mỗi bước dịch pha, hình ảnh giao thoa được ghi lại. Sử dụng thuật toán PSI và kỹ thuật gỡ pha, cấu trúc hình học 3D bề mặt được tái tạo.



Hình 1.9: Sơ đồ nguyên lý của kỹ thuật giao thoa dịch pha

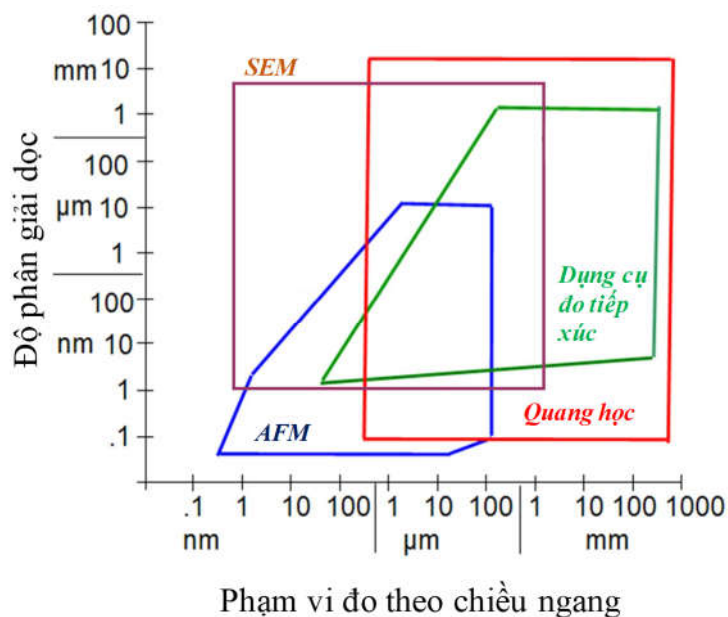
Những thiết bị sử dụng kỹ thuật PSI thường được giới hạn dùng để đo bề mặt đồng nhất, hẳn vì khi đo bề mặt thô với các tính chất quang học khác nhau kết quả đo không chính xác [33, 35, 141]. Đối với kỹ thuật PSI, chênh lệch độ cao giữa hai điểm dữ liệu liền kề phải nhỏ hơn một phần tư bước sóng, nếu không sẽ gây ra sai lệch chiều cao bằng số nguyên lần nửa bước sóng.

#### 1.4.2.6. Kính hiển vi giao thoa đo biên dạng bề mặt

Sử dụng giao thoa để đo cấu trúc hình học bề mặt là phương pháp đo hiệu quả nhất và phát triển nhanh trong những năm gần đây [97, 108, 163]. Để đo cấu trúc hình học 3D các bề mặt tế vi, trong sơ đồ giao thoa kế có sử dụng các vật kính hiển vi giao thoa thay cho các loại vật kính hiển vi thông thường. Có rất nhiều hệ kính hiển vi giao thoa đã được phát triển, trong đó kính hiển vi

WLI là loại điển hình cho phương pháp này. Ánh sáng phản xạ từ bề mặt mẫu và bề mặt gương tham chiếu tạo nên hình ảnh giao thoa tại vị trí cảm biến ảnh. Hình ảnh vân giao thoa được xử lý, nhận dạng để xác định chiều cao các điểm trên bề mặt [107]. Kính hiển vi này thường sử dụng cơ cấu quét dọc trục để tạo ra sự thay đổi quang trình (dịch chuyển bề mặt đối tượng hoặc dịch chuyển vật kính hiển vi). Kỹ thuật WLI sẽ được thảo luận chi tiết trong các chương sau.

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



Hình 1.10: Phạm vi và độ phân giải của các phương pháp đo cấu trúc hình học 3D bề mặt [80]

Do các cơ chế hoạt động khác nhau, mỗi loại thiết bị đo đều có những ưu điểm và nhược điểm riêng. Ví dụ, thiết bị đo sử dụng đầu dò tiếp xúc phù hợp để đo các mẫu vật cỡ lớn làm bằng vật liệu cứng, giao thoa kế phù hợp hơn với các bề mặt quang học, cơ khí chính xác, kính hiển vi đồng tiêu phù hợp để đo các bề mặt tương đối nhám. Các thiết bị đo sử dụng đầu dò cảm ứng có khả năng làm hư hại bề mặt đo hoặc đầu dò trong khi các kỹ thuật quang học sẽ không làm hư hại bề mặt. Nói chung, các phương pháp đo tiếp xúc tốn nhiều

thời gian hơn do chúng là phương pháp đo đơn điểm và cần hệ thống dịch chuyển theo các chiều.

Các loại công cụ khác nhau thường có các phạm vi đo và độ phân giải khác nhau. Hình 1.10 thể hiện phạm vi và độ phân giải dọc của các phương pháp đo cấu trúc hình học 3D bề mặt. Các dụng cụ đo 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 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, tầm quan trọng và ứng dụng trong các ngành sản xuất. Lịch sử phát triển của kỹ thuật đo cấu trúc hình học bề mặt đã được nêu ngắn gọn, bao gồm sự phát triển của thiết bị, phương pháp đặc tính hóa bề mặt. Trong chương này, 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 phương pháp quang học không giao thoa, như kính hiển vi điện tử quét, kính hiển vi đồng tiêu, các kỹ thuật đo sử dụng sai lệch cường độ, sai số điều tiêu, loạn thị. Một dạng điển hình của kỹ thuật giao thoa cũng được trình bày như là một phương pháp đo lường không tiếp xúc, đó là kỹ thuật giao thoa dịch pha.

Qua tìm hiểu về các kỹ thuật đo cấu trúc hình học 3D bề mặt chi tiết, luận án lựa chọn phương pháp WLI làm phương pháp chính để xây dựng thiết bị. Đây là phương pháp phù hợp với đối tượng đo là cấu trúc hình học 3D của các chi tiết quang cơ có độ chính xác cao. Chương tiếp theo sẽ tập trung vào nghiên cứu phương pháp WLI trong đo lường cấu trúc hình học 3D bề mặt, gồm cơ sở lý thuyết và các kỹ thuật xử lý.

## 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**

Như ta đã thấy từ Chương 1, phương pháp WLI được sử dụng hiệu quả trong các thiết bị đo cấu trúc hình học 3D bề mặt chi tiết. WLI có nhiều biến thể tên gọi khác nhau nhưng cùng chung một nguyên lý cơ bản. 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. Trong chương này, luận án tập trung nghiên cứu về kỹ thuật WLI trong đo cấu trúc hình học 3D của bề mặt bao gồm: nguyên lý hoạt động của hệ thống, nguyên lý hình thành tín hiệu giao thoa, các kỹ thuật xử lý tín hiệu giao thoa thông dụng và một số vấn đề trong kỹ thuật WLI.

#### **2.1. Giới thiệu chung về WLI**

Trong đo lường quang học, WLI là một phương pháp đo lường hiệu quả và còn có tên gọi phổ biến khác là phép đo giao thoa kết hợp (CSI). Khái niệm về CSI lần đầu tiên được Davidson và cộng sự đưa ra năm 1987 [39]. Họ đã chứng minh nguyên lý làm việc của kính hiển vi WLI và áp dụng nó để tăng độ phân giải dọc trục khi đo các bề mặt chi tiết bán dẫn. Họ sử dụng sơ đồ giao thoa kế Linnik và đặt tên là đầu dò ghi ảnh kết hợp.

Năm 1990, Kino [27, 89] báo cáo về hệ thống đo bề mặt bằng giao thoa tương tự như được thảo luận bởi Davidson và cộng sự, nhưng sử dụng vật kính hiển vi Mirau thay cho sơ đồ giao thoa kế Linnik. Nhưng thực tế, kỹ thuật đo cấu trúc hình học 3D bề mặt áp dụng giao thoa kế Mirau được công bố từ năm 1985 khi Bhusan và cộng sự đã phát triển một máy đo quang kế Mirau dựa trên giao thoa kế Leitz Mirau [15, 24]. Thiết kế này có nhiều ưu điểm so với giao thoa kế Linnik như nhỏ gọn hơn, nhẹ hơn và chỉ sử dụng một vật kính hiển vi duy nhất. Hơn nữa, hệ thống giao thoa kế Mirau ít chịu ảnh hưởng của rung

động và quang sai của vật kính hiển vi. Trong cùng năm với Kino, Lee và cộng sự đã công bố về kính hiển vi quét kết hợp CSI [132] để đo chiều cao bằng cách quét dọc và tìm vị trí xuất hiện vân giao thoa, nhưng sử dụng giao thoa kế Michelson. Trong những năm 1990, các kỹ thuật tương tự về phép đo bề mặt được công bố bởi nhiều nhà nghiên cứu khác nhau [45, 50, 51, 68, 88, 158]. Tất cả các kỹ thuật này tuân theo các nguyên tắc cơ bản giống như WLI, tuy nhiên được đặt tên bằng nhiều thuật ngữ khác nhau như:

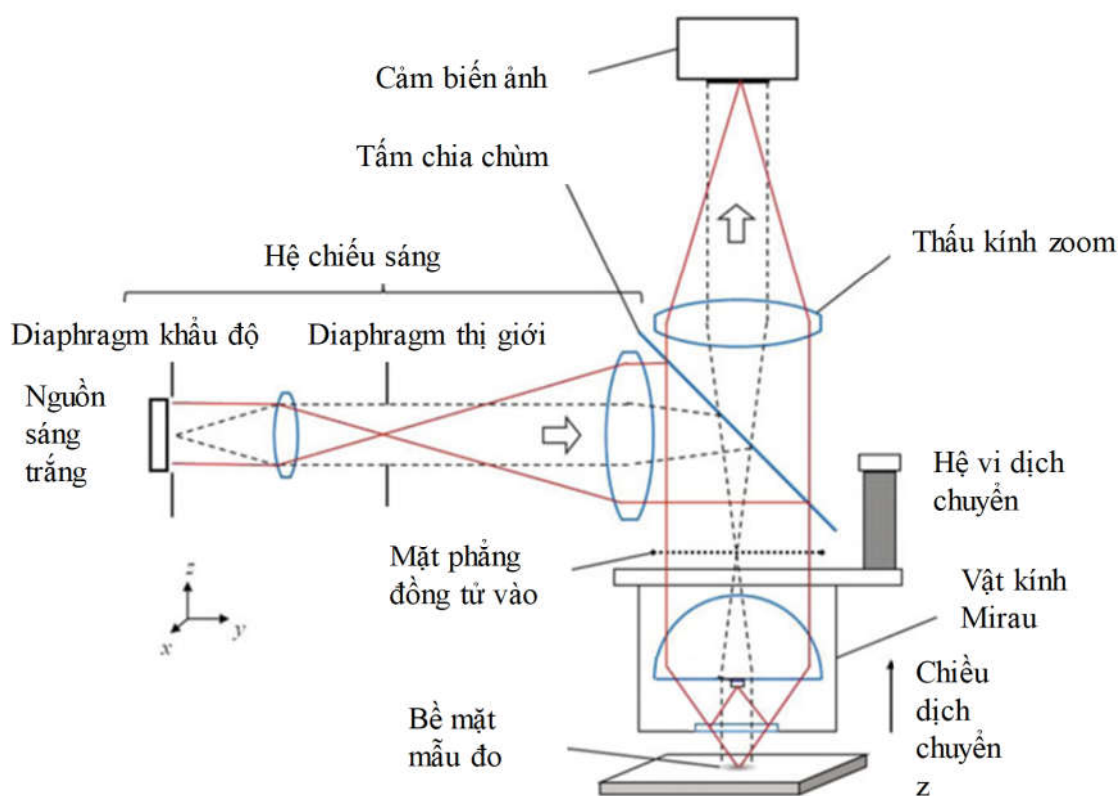
- Giao thoa ánh sáng trắng - White light interferometry (WLI) [158]
- Giao thoa quét dọc - Vertical scanning interferometry (VSI) [68]
- Giao thoa kết hợp thấp - Low coherence interferometry (LCI)
- Máy đo biên dạng quang học kết hợp - Optical coherence profilometry (OCP)
- Đo cấu trúc hình học bề mặt quang học kết hợp - Optical coherence topography (OCT)
- Kính hiển vi quang học kết hợp - Optical coherence microscopy
- Giao thoa ánh sáng trắng quét- Scanning white light interferometer (SWLI) [50, 88]
- Kính hiển vi đầu dò kết hợp - Coherence probe microscopy (CPM)
- Ra đa kết hợp - Coherence radar [51]

Tất cả các tên gọi trên đều sử dụng để mô tả kỹ thuật WLI. Kỹ thuật này từ lâu đã được áp dụng trong các thiết bị đo lường bề mặt như bề mặt MEMS, và các bề mặt gia công độ chính xác cao, các lớp mạ... Độ phân giải dọc trục của WLI phụ thuộc vào kỹ thuật phân tích tín hiệu, thường khoảng 3 nm [108] và có thể đạt đến độ chính xác tương đương phương pháp PSI với bước sóng đơn (cỡ 0,3 nm). Với sự phát triển nhanh của khoa học và công nghệ, độ phân giải dọc trục của WLI ngày được nâng cao đến dưới nanomet [125]. Kỹ thuật WLI hiện nay được áp dụng trong các hệ kính hiển vi đo chiều cao và hình dạng



bề mặt chi tiết quang cơ. Nguyên lý đo bằng WLI đã được áp dụng trong các thiết bị đo có tốc độ và độ chính xác cao. Trong phần sau, luận án sẽ trình bày nguyên lý hoạt động và những vấn đề liên quan đến kỹ thuật WLI.

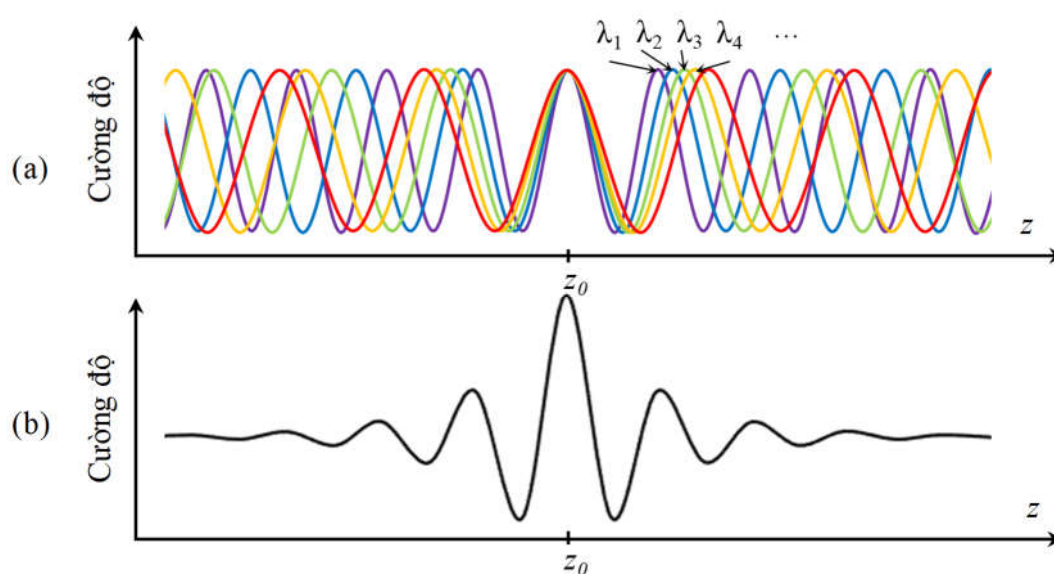
## 2.2. Nguyên lý hoạt động của WLI



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

Sơ đồ quang học của hệ WLI được thể hiện ở Hình 2.1. Hệ WLI sử dụng nguồn ánh sáng trắng và vật kính hiển vi giao thoa. Trong sơ đồ, ánh sáng trắng phát ra từ nguồn được chuẩn trực và truyền đến vật kính hiển vi giao thoa Mirau nhờ hệ chiếu sáng. Gương bán phản xạ nằm trong vật kính Mirau tách chùm tia thành hai thành phần; một chùm chiếu lên mẫu đo và một chùm chiếu lên gương phẳng tham chiếu (nằm bên trong vật kính Mirau). Sau khi phản xạ từ bề mặt mẫu đo và bề mặt gương phẳng tham chiếu, hai chùm tia này gặp nhau và tạo ảnh giao thoa trên mặt phẳng cảm biến ảnh. Theo nguyên lý chồng chất của ánh sáng, tín hiệu WLI là sự chồng chất của tất cả các tín hiệu giao thoa ánh sáng

đơn sắc [Hình 2.2 (a)]. Do đó, cường độ tổng của tín hiệu giao thoa ánh sáng trắng là cao nhất ở khu vực trung tâm và giảm mạnh dọc theo hướng  $z$  như thể hiện ở Hình 2.2 (b). Hay nói cách khác, do tính kết hợp thấp của nguồn sáng, các vân giao thoa chỉ xuất hiện trong một khu vực rất hẹp xung quanh các vị trí có độ lệch quang trình bằng 0 (ZOPD). Vị trí vân giao thoa có độ tương phản tốt nhất là vị trí  $OPD = 0$ , được gọi là vị trí vân bậc 0, và các vân tiếp theo có biên độ nhỏ hơn gọi là vân bậc 1,2...



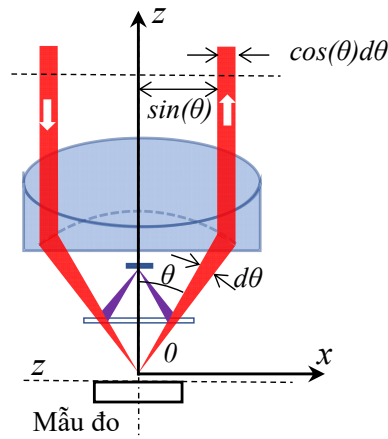
Hình 2.2: Sự hình thành tín hiệu WLI: (a) tín hiệu giao thoa của các bước sóng riêng lẻ và (b) tín hiệu WLI

Bộ vi dịch chuyển áp điện Piezo (PZT) được sử dụng để dịch mẫu đo hoặc vật kính tương đối với nhau theo chiều dọc (trục  $z$ ), làm cho hiệu quang trình của chùm sáng phản xạ từ bề mặt vật và gương tham chiếu bên trong vật kính thay đổi. Một loạt hình ảnh giao thoa tương ứng với vị trí dịch chuyển của PZT được tạo ghi lại. Tín hiệu giao thoa thu được của mỗi điểm ảnh dọc theo trục  $z$  được thể hiện như ở Hình 2.2 (b). Sau khi thu nhận được một loạt các hình ảnh giao thoa theo vị trí dọc trục, hệ thống sử dụng các thuật toán xử lý để tìm ra

độ cao  $z$  của từng điểm  $(x, y)$  mà tại đó  $OPD = 0$ . Tập hợp độ cao của tất cả các điểm trên bề mặt mẫu tạo thành cấu trúc hình học 3D của bề mặt cần đo.

Trên đây là nguyên lý hoạt động chung của hệ thống WLI sử dụng trong đo cấu trúc hình học 3D của bề mặt tế vi của chi tiết. Các phần sau, luận án trình bày chi tiết hơn về quá trình hình thành tín hiệu giao thoa, phương pháp thu nhận và xử lý hình ảnh giao thoa để tái tạo cấu trúc hình học 3D bề mặt.

### 2.3. Nguyên lý tạo tín hiệu giao thoa



Hình 2.3: Mô hình hình thành tín hiệu giao thoa bên trong vật kính Mirau

Chúng ta xem xét tín hiệu giao thoa hình thành qua hệ hiển vi Mirau từ một mặt phẳng song song với tiêu diện và cách tiêu diện một khoảng  $z$  (Hình 2.2). Đặt dạng sóng tới tại tiêu diện là  $u(x, y)$  và biến đổi Fourier không gian của nó là [27, 28, 44, 89, 101]:

$$U(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} u(x, y) \exp[-j(k_x x + k_y y)] dx dy \quad (2.1)$$

Trong đó,  $\vec{k} = (k_x, k_y, k_z)$  là véc tơ sóng. Gọi A, B tương ứng là hệ số phản xạ của bề mặt mẫu và gương tham chiếu và là những hằng số. Thành phần sóng phản xạ  $U_S(k_x, k_y)$  từ bề mặt mẫu cách tiêu diện một khoảng  $z$  có thể được viết dưới dạng:

$$U_S(k_x, k_y) = AU(-k_x, -k_y) \exp[-j(2k_z z + \phi)] \quad (2.2)$$

Trong đó:  $\phi$  là sự thay đổi pha do phản xạ trên bề mặt của mẫu.

Thành phần sóng phản xạ từ gương tham chiếu tại mặt phẳng tiêu điểm ( $z=0$ ) có dạng:

$$U_R(k_x, k_y) = BU(-k_x, -k_y) \quad (2.3)$$

Trong hệ tọa độ cực, ta có:

$$k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} = k \cos \theta \quad (2.4)$$

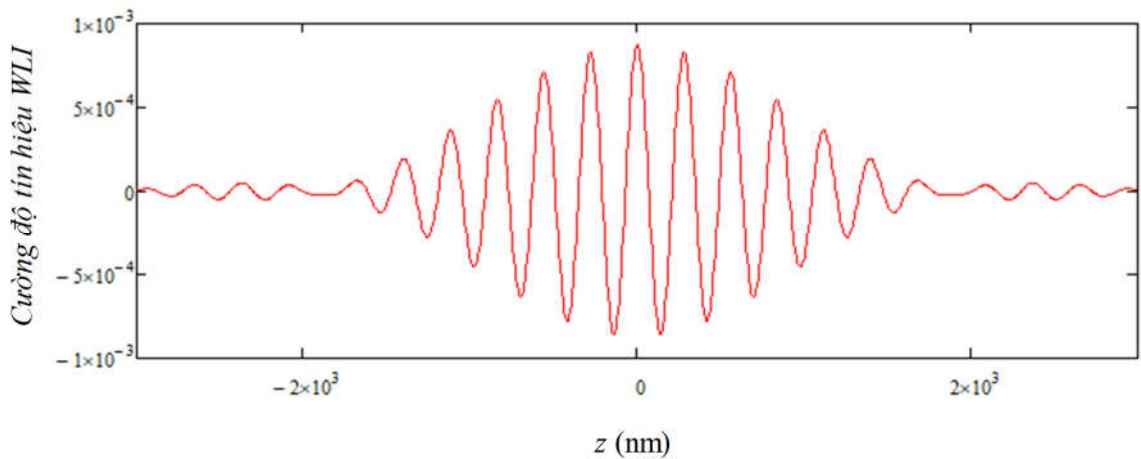
$$k_r = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} = k \sin \theta \quad (2.5)$$

Giả sử rằng  $|U(k_x, k_y)|$  không đổi trong khoảng  $\theta \leq \theta_0$  và bằng 0 khi  $\theta > \theta_0$ . Ở đây, khẩu độ số của vật kính hiển vi là  $NA = \sin \theta_0$ . Tại vị trí cảm biến ảnh, cường độ có dạng:

$$\begin{aligned} i(z) &= 2\pi \int |U_R + U_S|^2 k_r dk_r \\ &= 2\pi |U|^2 \int_0^{\theta_0} k^2 \{A^2 + B^2 + 2AB \cos(2k_z z + \phi)\} \sin \theta \cos \theta d\theta \end{aligned} \quad (2.6)$$

Tín hiệu giao thoa hình thành từ thành phần tương quan của tia phản xạ từ bề mặt mẫu và tia tham chiếu, do đó, ta chỉ quan tâm đến tín hiệu này. Thay  $k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} = k \cos \theta$ ,  $k = 2\pi / \lambda$ , ta thu được công thức tín hiệu giao thoa:

$$\begin{aligned} I_{AB}(z) &= 4\pi AB |U|^2 \int_{\text{bandwidth}} \int_0^{\theta_0} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \\ &\quad \times \left\{ \cos \left[ \frac{4\pi}{\lambda} z \cos \theta + \phi \right] \sin \theta \cos \theta d\theta \right\} d\lambda \end{aligned} \quad (2.7)$$



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

Giả sử hệ số phát xạ của nguồn sáng là như nhau trong toàn bộ dải bước sóng, tín hiệu giao thoa tính toán được có dạng như thể hiện ở Hình 2.4. Biểu thức toán học của tín hiệu giao thoa có thể được viết gọn hơn như sau:

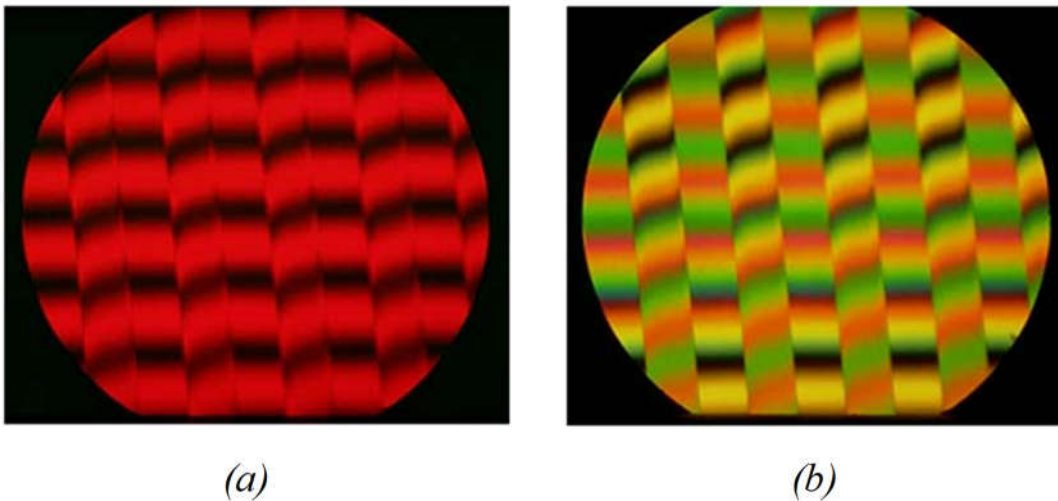
$$I(z) = I'[1 + \gamma(z)\cos(k_0z)] \quad (2.8)$$

Trong đó,  $I'$  là cường độ nền,  $\gamma(z)$  là hàm tương phản vân giao thoa hoặc đường bao tín hiệu và  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  là số sóng trung tâm cho các vân giao thoa dưới đường bao,  $\gamma(z)$  tỷ lệ thuận với mô đun biến đổi Fourier của phổ nguồn. Dải phổ của nguồn sáng càng rộng thì đường bao tín hiệu càng hẹp. Chiều rộng của đường bao tín hiệu biểu thị độ dài kết hợp của nguồn [108]. Đối với nguồn ánh sáng trắng, chiều rộng này khoảng là 1÷2 micromet. Đường bao của tín hiệu giao thoa thu được còn phụ thuộc vào các yếu tố khác như độ nhạy của cảm biến ảnh, đối tượng đo, cấu hình và chất lượng linh kiện trong hệ thống.

## 2.4. Hình ảnh WLI

Đặc điểm quan trọng của vân giao thoa sáng trắng đối với phép đo biên dạng bề mặt là các vân giao thoa chỉ xuất hiện trong phạm vi vài micromet hoặc vài chục micromet xung quanh vị trí  $OPD = 0$  tùy theo độ rộng phổ của nguồn sáng. Ví dụ, Hình 2.5 là hình ảnh vân giao thoa hình thành từ cùng một mẫu

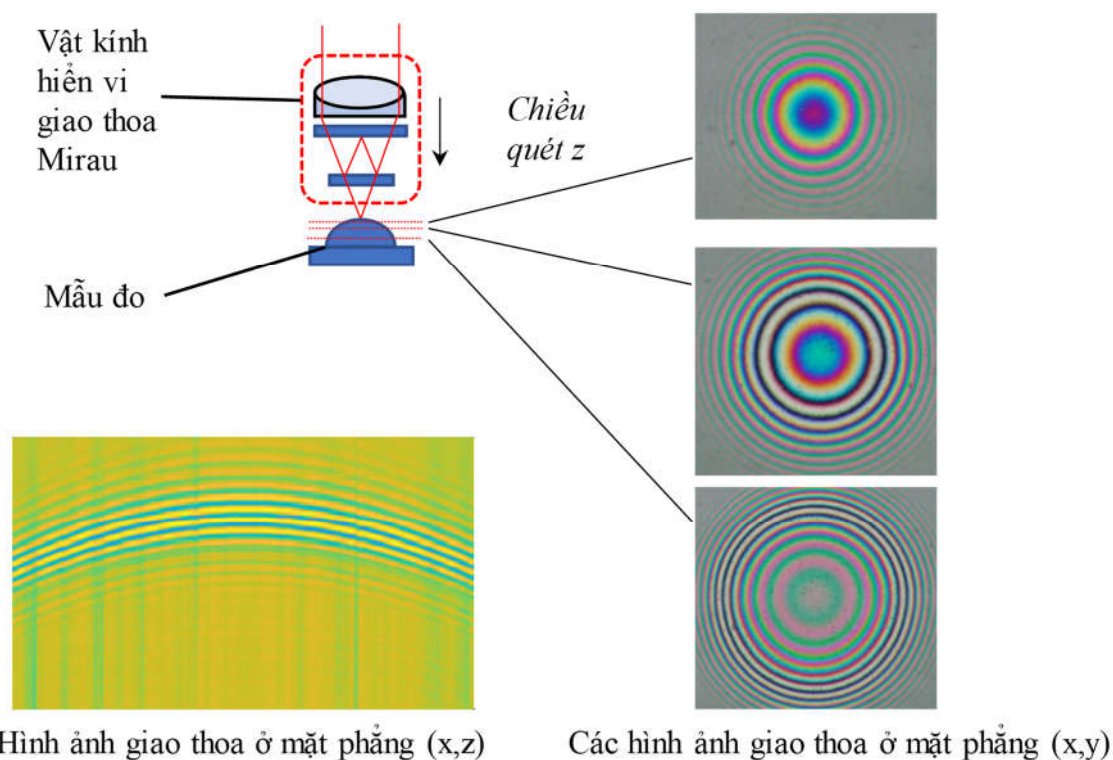
cách tử với hai nguồn chiếu sáng khác nhau. Ở Hình 2.5 (b), vân giao thoa hình thành với nguồn sáng trắng. Ở Hình 2.5 (a), vân giao thoa hình thành với nguồn sáng đỏ. Nhìn vào hình ảnh WLI có thể dễ dàng tìm thấy vân giao thoa bậc 0 trên mẫu đo (vân sáng này có màu “trắng”, trùng với màu của nguồn sáng), trong khi đó nhìn vào hình ảnh giao thoa sử dụng ánh sáng đỏ ta không thể phát hiện vân bậc 0 (vì tất cả các vân đều có màu như nhau). Điều này gây nên sự nhầm lẫn giữa các vân có sai lệch quang trình  $\lambda/2$  trong các hệ giao thoa đơn sắc nhưng trong WLI thì không. Đây chính là ưu điểm cơ bản của WLI. Các thiết bị WLI cho phép đo các mẫu bậc, đo vết nứt và các bề mặt thô. Ngoài ra, ưu điểm của việc sử dụng nguồn sáng trắng là khả năng chống nhiễu tốt, cấu trúc đơn giản và giá rẻ [70, 84, 108, 158].



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

Vì vật kính hiển vi (hoặc mẫu) được quét dọc theo quang trục, tại mỗi điểm ảnh, cảm biến ảnh ghi lại cường độ tín hiệu giao thoa. Điểm cao nhất trên đường bao của tín hiệu giao thoa chính là điểm xác định độ cao bề mặt mẫu tại vị trí đó. Trên Hình 2.6, một số hình ảnh tín hiệu giao thoa ghi được bởi cảm biến tại một số vị trí dịch chuyển vật kính (hoặc mẫu) dọc theo quang trục trên

các mặt phẳng  $x-z$  và  $x-y$ . Vị trí đỉnh của đường bao tín hiệu giao thoa tại mỗi pixel cho phép xác định độ cao bề mặt tại điểm đó. Tập hợp tất cả các đỉnh này tạo thành cấu trúc hình học 3D của bề mặt cần đo.



Hình 2.6: Hình ảnh giao thoa quan sát được ở mặt phẳng  $(x,y)$ ,  $(x,z)$  khi đo bề mặt cầu bằng WLI

## 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. Từ năm 1980, một số thuật toán đã được phát triển để xử lý tín hiệu WLI [45, 116]. Tại đỉnh của tín hiệu giao thoa, nơi có độ tương phản lớn nhất, hiệu quang trình của hai nhánh trong sơ đồ giao thoa bằng 0 và việc xác định vị trí đỉnh của đường bao tín hiệu cho ta thông tin về bề mặt đối tượng [45, 77, 132]. Trước đây, kỹ thuật xử lý tín hiệu giao thoa theo độ tương phản lớn nhất là một trong những kỹ thuật sử dụng phổ biến, gần đây kỹ thuật

xử lý tín hiệu giao thoa phát triển thêm nhiều cách khác bao gồm các phương pháp ước lượng pha [15, 71] và phân tích trong miền tần số [41, 47, 48] hoặc phương pháp kết hợp các thuật toán. Đầu tiên vị trí đỉnh đường bao tín hiệu được xác định, sau đó xác định chính xác tọa độ  $z$  sử dụng kỹ thuật ước lượng pha [67, 68, 94, 134, 135]. Sau đây là mô tả ngắn gọn về một số thuật toán xử lý tín hiệu WLI.

### **2.5.1. Phương pháp xác định đường bao tín hiệu**

Xây dựng cấu trúc hình học 3D của bề mặt bằng phương pháp phát hiện đường bao tín hiệu giao thoa là kỹ thuật đầu tiên áp dụng trong WLI. Độ cao bề mặt được xác định bằng cách tính toán đỉnh của đường bao tín hiệu. Kỹ thuật này được Lee và cộng sự công bố vào năm 1990, trong đó họ đã tính toán đường bao tín hiệu bằng cách giải điều chế tín hiệu giao thoa [132]. Biên độ đỉnh của hàm đường bao biến điệu và vị trí  $z$  tương ứng được xác định cho mỗi điểm ảnh. Tất cả dữ liệu độ cao  $z$  của các điểm ảnh tạo thành cấu trúc hình học 3D của bề mặt. Theo cách này, độ phân giải ngang và dọc của hệ thống độc lập nhau. Tính chất kết hợp không gian và thời gian của nguồn chiếu sáng càng thấp thì độ phân giải dọc trục của hệ thống càng cao. Công bố đáng chú ý tiếp theo là phương pháp phát hiện đường bao tín hiệu của Dresel vào năm 1992 [51]. Đây là công bố đầu tiên về việc đo bề mặt thô bằng WLI khi kết hợp kỹ thuật “thời gian bay” với giao thoa.

Một cách tiếp cận khác được Caber [77] mô tả năm 1993, ông đã sử dụng kỹ thuật phổ biến trong lý thuyết truyền thông để xác định đường bao tín hiệu giao thoa và đo mức độ điều biến vân giao thoa và độ kết hợp thay vì xác định pha của vân giao thoa. Trong phương pháp này, tín hiệu từ cảm biến ảnh được xử lý số và được lọc bằng phần cứng xử lý tín hiệu tốc độ cao cho phép xác định đường bao điều biến trong quá trình quét.



Phương pháp xác định đường bao tín hiệu là phương pháp đơn giản nhất, nhưng việc xác định đỉnh của đường bao tín hiệu không thể đạt độ chính xác như các phương pháp xử lý phát triển sau này.

### 2.5.2. Phương pháp trọng tâm.

Đây được coi là phương pháp nâng cao phát triển từ phương pháp phát hiện đường bao tín hiệu do Ai và cộng sự công bố năm 1997 [6, 57]. Sau khi có được đường bao tín hiệu, độ cao có thể được xác định bằng cách tìm vị trí trọng tâm của phần diện tích dưới đường bao theo công thức:

$$h = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \gamma_{z_i} z_i}{\sum_{i=1}^{N-1} \gamma_{z_i}} \quad (2.9)$$

Trong đó,  $\gamma$  đại diện cho hàm đường bao,  $z$  là vị trí dọc trục và  $h$  là chiều cao cần xác định. Thuật toán sử dụng trọng tâm này có ưu điểm là rất nhanh, thực hiện đơn giản và đạt độ chính xác tốt hơn so với phương pháp chỉ xác định đỉnh của đường bao tín hiệu [6]. Tuy nhiên, việc tính toán trọng tâm tương đương với tính toán tìm vị trí cực đại của đường bao nhưng chỉ đúng với tín hiệu đối xứng. Đối với tín hiệu không đối xứng, vị trí trọng tâm có sai lệch nhỏ so với đỉnh của đường bao, lượng sai lệch này cố định và không ảnh hưởng nhiều đến toàn bộ phép đo.

### 2.5.3. Phương pháp ước lượng pha

Phương pháp ước lượng pha được sử dụng rộng rãi trong WLI dịch pha [97, 107]. Kỹ thuật này tương tự như kỹ thuật áp dụng cho các hệ thống PSI. Tuy nhiên, pha của vân giao thoa không chỉ phụ thuộc vào OPD giữa hai nhánh trong sơ đồ giao thoa mà còn phụ thuộc vào chiết suất phức của bề mặt. Kỹ thuật ước lượng pha lần đầu tiên được công bố bởi Bhusan và cộng sự năm 1985 [17]. Trong đó, giao thoa kế Mirau được sử dụng để đo cấu trúc hình học

3D bằng từ có sử dụng thông tin pha. Theo kỹ thuật này, bề mặt tham chiếu dịch chuyển với vận tốc không đổi thay vì dịch chuyển theo các bước. Các nhà nghiên cứu khác cũng đã sử dụng kỹ thuật tương tự để phân tích tín hiệu giao thoa, chẳng hạn như Montgomery (1993) đề xuất kỹ thuật dịch pha theo bước [23]. Một năm sau đó, Harihanan [71] đã đề xuất phương pháp khác khắc phục lỗi tạo ra do sự phản xạ không đồng nhất được thực hiện bằng cách di chuyển gương tham chiếu để thay đổi quang trình. Những kỹ thuật này đạt được độ phân giải cao khoảng một vài nanomet. Mặc dù kỹ thuật ước lượng pha đạt độ phân giải dọc cao, nó gặp vấn đề về sai số bất định pha.

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

Phương pháp kết hợp kỹ thuật ước lượng pha và kỹ thuật xác định đường bao biến điệu là khá hiệu quả để đo cấu trúc hình học 3D bề mặt nhưng mỗi phương pháp có một số nhược điểm. Việc ước tính pha được áp dụng cho kỹ thuật dịch pha và chỉ được sử dụng khi chênh lệch độ cao giữa hai điểm liền kề nhỏ hơn  $\frac{1}{4}$  bước sóng trung tâm ( $\lambda_0$ ) của nguồn sáng. Mặt khác, việc phát hiện đường bao tín hiệu chịu ảnh hưởng bởi quang sai, nhiễu xạ, rung động... Để giải quyết các vấn đề trên, Larkin đã đề xuất phương pháp phát hiện đường bao chỉ được sử dụng để xác định vị trí vân giao thoa và dùng phương pháp ước lượng pha để đạt độ chính xác cao hơn [94].

Để tìm chiều cao trong phương pháp này, đầu tiên bản đồ độ cao  $H(x,y)$  được tính toán theo kỹ thuật xác định đường bao tín hiệu. Bước thứ hai, tìm bản đồ pha  $\theta(x,y)$  xác định vị trí chính xác với tần số  $k_0$ . Mối quan hệ toán học giữa pha với độ cao  $h(x,y)$  là [82]:

$$h(x,y) = \frac{\theta(x,y)}{4\pi k_0} + \frac{1}{k_0} \text{round} \left( \frac{A(x,y) - \langle A \rangle}{4\pi} \right) \quad (2.10)$$

Trong đó,  $A(x, y)$  là khoảng cách pha giữa hai kết quả phân tích theo công thức  $A(x, y) = \theta(x, y) - 2\pi k_0 H(x, y)$  cho mỗi điểm ảnh riêng lẻ  $(x, y)$ ,  $\langle A \rangle$  là trung bình của khoảng cách pha  $A(x, y)$  và  $round()$  là hàm làm tròn đến giá trị nguyên gần nhất.

Trong công bố của Larkin vào năm 1996 [94], vị trí vân giao thoa được phát hiện trước sau đó sử dụng kỹ thuật dịch pha bằng thuật toán năm điểm phi tuyến. Trong năm sau đó, kỹ thuật đo cấu trúc hình học 3D bề mặt tương tự đã được Sandoz công bố [134, 135].

Đo cấu trúc hình học 3D bề mặt bằng cách sử dụng kỹ thuật này có thể cho kết quả sai được gọi là các sai số thứ tự vân. Sai số này chủ yếu xuất hiện đối với bề mặt có các đặc tính quang học khác nhau trong trường nhìn gây ra nhận dạng không chính xác thứ tự vân giao thoa [56]. Haraski và cộng sự sử dụng thuật toán phù hợp tuyến tính để tìm ra đỉnh của đường bao và sử dụng thuật toán năm điểm để xác định pha [67]. Một phân tích chi tiết khác về cải thiện hiệu suất đã được De Groot báo cáo dựa trên kỹ thuật xác định thứ tự vân sử dụng kỹ thuật phân tích trong miền tần số [41, 47, 48]. Kỹ thuật mới này tốt hơn so với các thuật toán phát hiện đường bao tín hiệu và được sử dụng nhiều hơn sau này.

### 2.5.5. Phân tích trong miền tần số

Năm 1994, De Groot và Deck đề xuất phương pháp xác định biên dạng bề mặt bằng cách xử lý tín hiệu giao thoa trong miền tần số [47]. Quá trình này bắt đầu với biến đổi Fourier tín hiệu giao thoa theo như báo cáo của Kino và cộng sự (năm 1990 [89]). Độ lớn của phép biến đổi biểu thị cường độ của phổ ở bước sóng nhất định và pha của biến đổi biểu thị pha của tín hiệu giao thoa ở bước sóng đó [41, 47, 48].

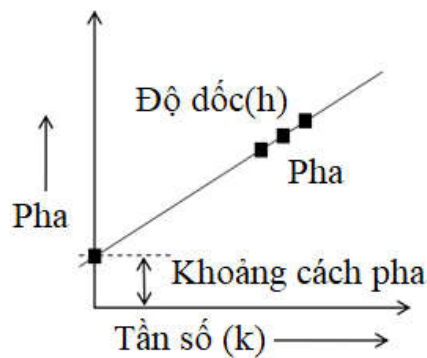
Trong phân tích tần số, biến đổi Fourier nhanh (FFT) tín hiệu giao thoa  $I(z)$  được tính toán và tần số không gian của tín hiệu được phân tích:

$$I(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(z) \exp(-j2\pi kz) dz \quad (2.11)$$

Pha được xác định theo công thức:

$$\theta(k) = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}\{I(k)\}}{\text{Re}\{I(k)\}} \right) \quad (2.12)$$

Ở đây,  $\theta(k)$  là giá trị pha,  $\text{Im}\{I(k)\}$  và  $\text{Re}\{I(k)\}$  tương ứng là phần ảo và phần thực của biến đổi Fourier của tín hiệu giao thoa.



Hình 2.7: Mô tả kỹ thuật phân tích tín hiệu giao thoa trong miền tần số

Pha có thể được mô tả như một hàm tuyến tính của tần số không gian  $k$ . Đồ thị Hình 2.7 biểu diễn pha của biến đổi Fourier cường độ đo được theo dải tần số. Chiều cao bề mặt  $h(x, y)$  tương ứng với một điểm cụ thể  $(x, y)$  có thể được tính toán từ độ dốc của đường làm khớp với đồ thị. Khoảng cách pha  $A(x, y)$  được mô tả trong phương trình (2.13), có thể được suy ra đơn giản từ giao điểm của đường làm khớp với trục Pha. Do đó, pha này là:

$$\theta(x, y) = A(x, y) + 2\pi kh(x, y) \quad (2.13)$$

Biến đổi Fourier của từng tín hiệu giao thoa riêng lẻ tạo thành một mảng các giá trị pha được sử dụng để xác định chiều cao các điểm trên bề mặt. Cách tiếp cận này không tính đến độ tương phản của vân giao thoa.

Tương tự như phương pháp ước lượng pha, kỹ thuật phân tích tín hiệu giao thoa trong miền tần số đạt độ chính xác cao khi sử dụng thông tin pha để xác định vị trí. Tuy nhiên, tốc độ xử lý chậm và khả năng loại bỏ nhiễu với tần số gần với tần số tín hiệu kém là những nhược điểm chính của phương pháp này.

Trên đây là các kỹ thuật xử lý tín hiệu giao thoa thường được áp dụng trong WLI. Ngoài ra còn có các phương pháp khác như phân tích bó sóng [133, 136, 161]. Ưu điểm của những phương pháp này là giảm nhiễu nhưng nhược điểm là thời gian xử lý lâu hơn. Đến nay, các kỹ thuật xử lý tín hiệu WLI vẫn là đề tài được tập trung nghiên cứu và có nhiều vấn đề mới tiếp tục được phát hiện. Các cải tiến và điều chỉnh trong kỹ thuật WLI vẫn đang được nghiên cứu để khắc phục các vấn đề đó.

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

Mặc dù có những lợi thế đáng kể, WLI vẫn tồn tại những hạn chế cần được nghiên cứu khắc phục. 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 từ tín hiệu giao thoa. Năm 1990, Hillmann [72] đã chỉ ra rằng các kết quả thu được bằng cách sử dụng các phương pháp quang học để đo một mẫu chuẩn độ nhám khác với các kết quả thu được từ công cụ đầu dò tiếp xúc. Sau đó, một số nhà nghiên cứu khác đã công bố các công trình liên quan đến sai số của WLI như sai số thứ tự vân giao thoa, hiệu ứng vật liệu [34, 67-69]. Phần lớn các sai số xảy ra khi độ dốc bề mặt lớn. Bên cạnh đó, còn có nhiều nguyên nhân khác nhau gây ra sai số của thiết bị WLI, bao gồm quang sai của hệ quang và nhiễu xạ tạo ra bởi vật kính, độ nghiêng, độ nhám bề mặt mẫu đo

và nhiễu được tạo ra trong quá trình đo [54, 55]. Ngoài những vấn đề trên, gần đây có nhiều nghiên cứu mới về WLI liên quan đến việc nâng cao độ chính xác và tốc độ đo. Sau đây là một số vấn đề trong kỹ thuật WLI có liên quan đến các nội dung giải quyết của luận án.

### **2.6.1. Sai số thứ tự vân giao thoa**

Sai số gây ra bước nhảy đột ngột của độ cao bằng một nửa bước sóng trung tâm khi đo cấu trúc hình học bề mặt và được gọi là sai số thứ tự vân hoặc lỗi  $2\pi$ . Như đã đề cập trước đây, việc đo cấu trúc hình học 3D bề mặt phụ thuộc vào các phép đo pha. Tuy nhiên, bản chất tuần hoàn vốn có của phép đo pha thường không rõ ràng thứ tự vân hoặc sai số pha là  $2\pi$ . Trong quá trình tái tạo cấu trúc hình học 3D bề mặt từ tín hiệu vân giao thoa, không thể xác định bước nhảy pha đối với cấu trúc hình học bề mặt như bề mặt bậc, bề mặt cạnh sắc, bề mặt có độ nhám cao, bề mặt vật liệu khác nhau [126]. Các báo cáo cho thấy sai số này thường xảy ra ở những khu vực xa trục quang của hệ thống tạo ảnh, càng ở rìa thị giới hiện tượng này xảy ra càng lớn [102]. Một loại sai số thứ tự vân giao thoa với chỉ một bước tương ứng với một bước nhảy  $2\pi$  khi đo một bề mặt phẳng hoàn hảo bằng công cụ WLI gọi là sai số bước ma [127]. Sai số này bằng một nửa bước sóng trung tâm của nguồn sáng. Sự phụ thuộc của phản xạ theo thị giới vốn có trong giao thoa kế kiểu Mirau và Linnik có thể là lý do gây ra sai số này [69, 126]. Đối với các bề mặt bậc có bước nhỏ hơn độ dài kết hợp của nguồn sáng sai số thứ tự vân giao thoa cũng thường xuất hiện gọi là hiệu ứng cánh dơi [41, 68]. Hiệu ứng cánh dơi xảy do sự giao thoa của hai chùm phản xạ từ bề mặt trên và dưới sau khi nhiễu xạ ở cạnh bậc [55]. Với những phương pháp tái tạo cấu trúc hình học 3D bề mặt mới được đề xuất, luận án một phần khắc phục được sai số thứ tự vân giao thoa.

### 2.6.2. Ảnh hưởng của vật liệu mẫu đo đến WLI

Các đặc tính quang học của vật liệu tạo nên bề mặt vật thể là không thể bỏ qua trong quá trình đo sử dụng WLI vì các vật liệu tạo ra thay đổi pha khác nhau làm ảnh hưởng đến các phép đo cấu trúc hình học 3D bề mặt [22, 69]. Ví dụ, bề mặt kim loại sẽ tạo ra các sai số do chiết suất phức của chúng ảnh hưởng đến pha của ánh sáng phản xạ từ nó. Nếu bề mặt được làm từ một vật liệu đơn lẻ, toàn bộ bề mặt sẽ được dịch chuyển theo hướng dọc trục z, giữ cho cấu trúc hình học 3D bề mặt không đổi. Tuy nhiên, vấn đề sẽ xuất hiện khi các vật liệu khác nhau được đo, mỗi vật liệu sẽ gây ra một sự lệch pha khác nhau. Một phép đo bề mặt có vạch mạ crôm trên bề mặt kính đã chứng tỏ hiệu ứng này [82]. Trong công bố này, kết quả đo chiều cao mẫu bậc là 60,8 nm khi sử dụng thiết bị đo biên dạng bằng phương pháp tiếp xúc, nhưng khi đo bằng WLI kết quả là 37,3 nm. Tuy nhiên, nếu biết các hằng số quang học của vật liệu, ta có thể hiệu chỉnh sự sai lệch này [22, 69, 105].

### 2.6.3. Tăng độ phân giải của WLI

Phương pháp PSI đạt được độ phân giải dọc tốt hơn 10 lần (0,3 nm / 3 nm) so với phương pháp WLI khi xác định vị trí từ phân tích đường bao tín hiệu giao thoa; tuy nhiên, nếu pha của vân giao thoa dưới đường bao tín hiệu được xác định, phương pháp WLI có thể đạt được độ phân giải dọc tương đương. Phương pháp WLI độ phân giải cao này kết hợp hai kỹ thuật như đã đề cập ở mục 2.5.4, một là xác định biên dạng bề mặt theo vị trí đường bao và sử dụng kỹ thuật dịch pha như trong PSI đối với vân giao thoa bậc không. Sự kết hợp của chúng có thể được thực hiện bằng các thuật toán khác nhau [68, 94, 126, 154]. WLI độ phân giải cao này đặc biệt thích hợp để xác định hình dạng của các bề mặt nhẵn nhưng có các cấu trúc với chênh lệch chiều cao lớn như các cách tử hoặc hệ thống MEMS. Ưu điểm của phương pháp này là pha được

tính luôn ở vị trí lấy nét tốt nhất. Ngoài phương pháp kết hợp hai kỹ thuật như trên, các phương pháp nâng cao độ phân giải trong WLI vẫn đang được nghiên cứu với các cách xử lý tín hiệu giao thoa mới.

#### **2.6.4. Vấn đề nguồn sáng trong WLI**

Các nguồn ánh sáng trắng khác nhau, chẳng hạn như đèn vonfram-halogen, đèn sợi đốt hoặc đèn hồ quang, LED và diode siêu sáng (SLD) có thể được sử dụng để chiếu sáng trong các thiết bị WLI. Những nguồn này có phổ khác nhau và do đó tạo ra đường bao tín hiệu giao thoa khác nhau. Chiều rộng của đường bao tín hiệu giao thoa được phụ thuộc vào độ rộng phổ của nguồn. Khi độ rộng phổ lớn làm cho đường bao tín hiệu giao thoa hẹp lại, việc xác định vị trí giao thoa càng chính xác hơn. Phổ của nguồn sáng bán dẫn, chẳng hạn như LED và SLD, có hình dạng tương tự như một hàm Gauss. Ngày nay, nguồn sáng LED trở nên phổ biến và dần dần thay thế các nguồn sáng khác trong cả hệ hiển vi thông thường và hệ hiển vi giao thoa.

### **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 WLI. Phần cuối chương trình bày về một số vấn đề trong kỹ thuật WLI vẫn đang là chủ đề cần tiếp tục nghiên cứu hiện nay có liên quan đến luận án. Đây là cơ sở để luận án thực hiện nội dung nghiên cứu xây dựng thiết bị đo cấu trúc hình học 3D bề mặt sử dụng WLI, đề xuất các kỹ thuật mới trong hiệu chỉnh và xử lý dữ liệu WLI nhằm giải quyết một số vấn đề trên.



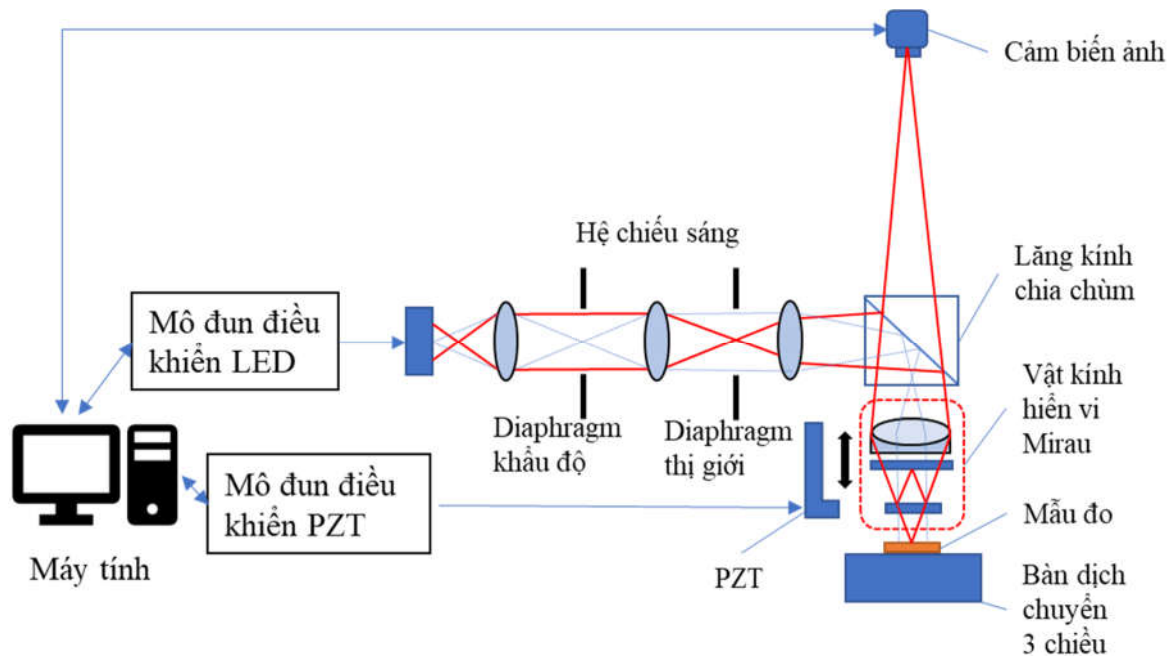
### Chương 3

## 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 đo cấu trúc hình học 3D bề mặt hình học tế vi của chi tiết quang, cơ theo nguyên lý WLI. Nội dung chương bao gồm:

- Phân tích, lựa chọn các thành phần và xây dựng mô hình thiết bị trong phòng thí nghiệm;
- Xây dựng mô hình toán học và mô phỏng hoạt động của thiết bị;
- Hiệu chuẩn thiết bị;
- Phát triển kỹ thuật xử lý tín hiệu WLI.

### 3.1. Xây dựng mô hình thiết bị



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 biểu diễn sơ đồ hệ thống WLI đo cấu trúc hình học ba chiều của bề mặt. Hệ thống gồm ba phần chính:

- (1) Hệ quang học tạo ảnh và chiếu sáng;
- (2) Hệ dịch chuyển và điều khiển dịch chuyển;
- (3) Phần mềm điều khiển và xử lý dữ liệu.

Hoạt động của thiết bị như sau: Đầu tiên, mẫu được gá lên bàn dịch chuyển ba chiều. Dịch chuyển mẫu để thu nhận được ảnh rõ nét của khu vực cần đo, lúc này tín hiệu giao thoa chưa xuất hiện, tiếp tục dịch mẫu chậm theo chiều dọc trục quang đến khi nào vừa chớm xuất hiện vân giao thoa thì dừng lại. Đến đây, quá trình lấy nét đã hoàn thành. Để thu nhận được hình ảnh chứa tín hiệu giao thoa, máy tính sẽ gửi lệnh điều khiển bộ vi dịch chuyển áp điện nhằm tạo ra các bước dịch chuyển nhỏ. Mỗi bước dịch chuyển tương ứng với một độ cao khác nhau của bề mặt mẫu đo. Hướng dịch chuyển được chọn sao cho vị trí bề mặt đo dần dần đi vào vùng giao thoa. Phạm vi dịch chuyển cần đủ lớn để toàn bộ các vị trí trên bề mặt cần đo đều đi qua vùng giao thoa, (tức là vị trí chênh lệch quang trình bằng 0). Trong quá trình dịch chuyển dọc trục, các hình ảnh giao thoa tương ứng với các bước dịch chuyển được ghi lại dưới dạng các ảnh số và được lưu lại trong bộ nhớ máy tính. Sau khi quét xong, ta thu được tín hiệu giao thoa của mỗi điểm ảnh. Tín hiệu này thể hiện sự phụ thuộc của cường độ sáng vào vị trí dọc trục (chiều z). Sử dụng kỹ thuật xử lý vân giao thoa ánh sáng trắng, ta trích xuất được vị trí tín hiệu giao thoa tốt nhất từ đó tính toán được độ cao tương đối của từng điểm ảnh. Xử lý ở tất cả các điểm trên ảnh ta thu nhận được cấu trúc hình học 3D của bề mặt cần đo

### **3.1.1. Hệ quang học tạo ảnh và chiếu sáng**

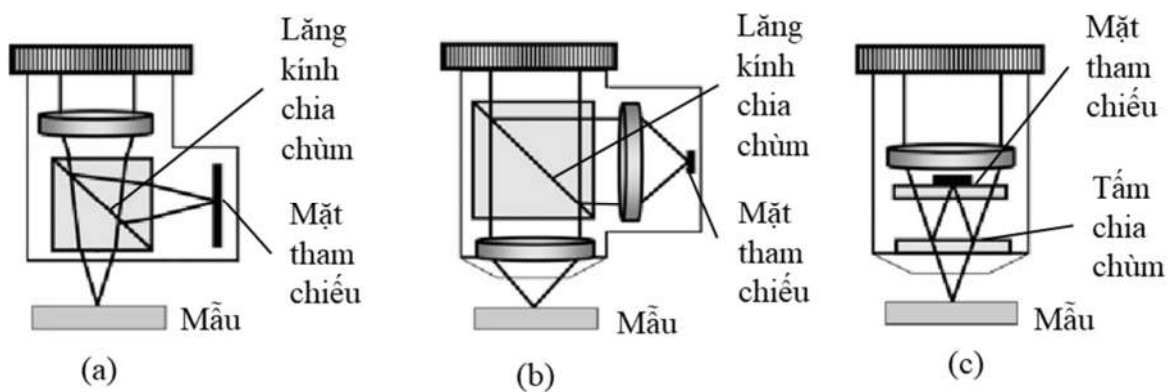
Như thể hiện ở Hình 3.1, hệ quang học tạo ảnh giao thoa và hệ chiếu sáng về cơ bản tương tự các thành phần trong một kính hiển vi quang học phản xạ

thông thường, bao gồm: hệ hiển vi tạo ảnh lên mặt phẳng cảm biến, hệ chiếu sáng Köhler. Tuy nhiên, điểm khác biệt là, trong hệ thống giao thoa, vật kính hiển vi thông thường được thay bằng vật kính hiển vi giao thoa có khả năng dịch chuyển nhằm tạo ra hình ảnh giao thoa ở các độ cao khác nhau.

### 3.1.1.1. Hệ hiển vi tạo ảnh giao thoa

Hệ hiển vi tạo ảnh bao gồm hai thành phần chính là vật kính hiển vi giao thoa và cảm biến ảnh.

**Phân tích, lựa chọn vật kính hiển vi giao thoa:** Có ba loại vật kính hiển vi giao thoa được sử dụng trong hệ WLI là: Michelson, Linnik và Mirau [107]. Sơ đồ cấu tạo của chúng được thể hiện trên Hình 3.2. Điểm khác nhau giữa ba loại vật kính này là cách thức chia chùm sáng và vị trí bề mặt tham chiếu. Để thu được tín hiệu giao thoa có độ phân giải và độ nét cao thì vị trí bề mặt tham chiếu phải trùng với vị trí lấy nét tốt nhất của vật kính hiển vi.



Hình 3.2: Một số loại vật kính hiển vi sử dụng trong thiết bị WLI

(a) Vật kính Michelson (b) Vật kính Mirau (c) Vật kính Linnik

Như trên Hình 3.2 (a), vật kính hiển vi Michelson có lăng kính chia chùm và gương tham chiếu đặt giữa vật kính và mẫu đo. Do đó, vật kính loại này có nhược điểm lớn là độ phóng đại và khoảng cách làm việc hạn chế. Thực tế, đối với vật kính có độ phóng đại cao hơn 10X, cấu hình này không đủ không gian

để bố trí bộ chia chùm. Do đó, loại vật kính giao thoa này thường có độ phóng đại nhỏ hơn 10X.

Theo sơ đồ giao thoa của vật kính Linnik [Hình 3.2 (b)], độ phóng đại của vật kính có thể nằm trong dải rất rộng. Vật kính Linnik giải quyết tốt vấn đề khoảng cách làm việc ngắn nhờ sử dụng hai vật kính tạo ảnh giống nhau phía sau bộ tách chùm. Tuy nhiên, vật kính giao thoa Linnik có nhược điểm đáng chú ý là kích thước lớn, khó bố trí linh kiện, nhạy cảm với rung động và chất lượng hệ giao thoa kém hơn do yêu cầu cao về sự đồng đều của hai vật kính ở hai nhánh. Vì thế, vật kính Linnik thường được dùng trong các trường hợp cần độ phóng đại cao.

Hình 3.2 (c) thể hiện loại vật kính hiển vi giao thoa được thiết kế bởi Mirau năm 1952 [113]. Khác với vật kính hiển vi thông thường, vật kính Mirau có thêm hai tấm kính phẳng nằm giữa vật kính và bề mặt mẫu đo. Tấm kính phẳng phía trên [Hình 3.2 (c)] là tấm bù, trên đó có một khu vực nhỏ được mạ phản xạ làm gương tham chiếu. Vùng phản xạ phải nằm tại vị trí lấy nét tốt nhất của vật kính và có kích thước lớn hơn trường nhìn. Tấm phẳng còn lại là một gương bán phản xạ, đóng vai trò là bộ chia chùm. Độ phóng đại của loại vật kính giao thoa Mirau thường trong khoảng từ 10X đến 100X. Nếu độ phóng đại nhỏ hơn 10X, gương tham chiếu sẽ lớn và chặn quá nhiều chùm sáng qua vật kính. Khi độ phóng đại của vật kính trên 100X, khoảng cách làm việc trở nên quá ngắn không thể đặt tấm kính chia chùm vào giữa. Vật kính Mirau có nhiều ưu điểm hơn so với hai loại vật kính nêu trên, và được sử dụng rộng rãi nhất trong các thiết bị hiển vi giao thoa.

Những phân tích trên cho thấy vật kính loại Michelson phù hợp với hệ có độ phóng đại thấp (dưới 10X), có trường nhìn rộng và độ phân giải thấp dùng cho đo lường các bề mặt thô, có nhấp nhô bề mặt lớn. Cấu hình giao thoa Linnik sử dụng trong hệ có độ phóng đại từ 100X trở lên, có trường nhìn nhỏ và độ

phân giải cao dùng cho trường hợp đo bề mặt cực nhẵn, nhấp nhô bề mặt cực thấp. Trong khi đó, vật kính giao thoa Mirau rất phù hợp cho các hệ có độ phóng đại trong khoảng từ 10X đến 100X, thích hợp cho đo lường bề mặt chi tiết cơ khí chính xác và bề mặt quang học thông dụng. Hơn nữa, cấu trúc đơn giản, gọn nhẹ và độ ổn định cao của vật kính Mirau [157] cũng là lợi thế để nó được lựa chọn sử dụng. Bảng 3.1 trình bày thông số của một số loại vật kính giao thoa Michelson và Mirau sử dụng trong các thiết bị thương mại [46]

*Bảng 3.1: Thông số một số loại vật kính hiển vi giao thoa thương mại*

Độ phóng đại	5,5X	10X	20X	50X	100X
Kiểu thiết kế	Michelson	Michelson	Mirau	Mirau	Mirau
Khẩu độ số (NA)	0,15	0,3	0,4	0,55	0,85
Khoảng cách làm việc (mm)	8	7,4	4,7	3,4	0,5
Độ phân giải quang học ( $\mu\text{m}$ )	1,9	0,95	0,71	0,52	0,34
Thị giới* (mm)	1,5	0,83	0,42	0,17	0,08
Khoảng lấy mẫu* ( $\mu\text{m}$ )	1,47	0,82	0,41	0,17	0,08

*Ghi chú: \** Thông số khi sử dụng vật kính hiển vi kết hợp với cảm biến ảnh  $1024 \times 1024$  pixel ( $8,2 \mu\text{m}/\text{pixel}$ ).

Trên thực tế, một hệ hiển vi giao thoa ánh sáng trắng thương mại luôn có một bộ 3 – 5 vật kính với các độ phóng đại khác nhau để người sử dụng thay đổi theo các yêu cầu đo lường khác nhau.

Việc lựa chọn vật kính hiển vi thường dựa vào thị giới (trường nhìn) của hệ và độ phân giải ngang. Tuy nhiên, thị giới và độ phân giải ngang của hệ tỷ lệ nghịch với nhau. Do đó, chúng ta phải thỏa hiệp giữa hai giá trị này cho phù

hợp với mục đích sử dụng. Để xây dựng được mô hình thiết bị đo cấu trúc hình học 3D của bề mặt của chi tiết quang và chi tiết cơ cấp chính xác cao, có nhấp nhô bề mặt cỡ vài chục đến vài trăm nanomet (tương ứng với cấp độ nhẵn lớn hơn 9), thị giới làm việc của thiết bị phải đủ lớn để đảm bảo đo được khu vực bề mặt có kích thước lớn hơn chiều dài chuẩn  $l = 0,25$  mm (theo TCVN-2511). Bên cạnh đó, vật kính giao thoa cần được chọn sao cho độ phân giải ngang của hệ thống cao nhất có thể.

Từ những phân tích trên và tham khảo thông số của một số vật kính hiển vi giao thoa thương mại (Bảng 3.1), vật kính giao thoa Mirau có độ phóng đại 20X, khẩu độ số 0,4, tiêu cự 9 mm do hãng Zygo chế tạo (Hình 3.3) được lựa chọn để xây dựng mô hình thiết bị thực nghiệm.



Hình 3.3: Vật kính Mirau 20X

Với độ phóng đại 20X, khẩu độ số 0,4, vật kính Mirau này có độ phân giải ngang  $R$ , tính theo tiêu chuẩn Sparrow, với bước sóng hoạt động 578 nm (xem Mục 3.3.2) là [42]:

$$R = \frac{0,47 \cdot \lambda}{NA} = 0,68 \mu m \quad (3.1)$$

**Lựa chọn cảm biến ảnh:** Cảm biến ảnh sử dụng trong các hệ thống WLI là những cảm biến số hoạt động trong dải nhìn thấy, có thể là loại CCD hoặc CMOS [44]. Việc lựa chọn các cảm biến ảnh cần căn cứ vào các tham số như: kích thước cảm biến, số lượng pixel, các đặc tuyến đáp ứng, độ phân giải,...

Kích thước cảm biến quyết định thị giới của hệ hiển vi tạo ảnh. Do yêu cầu đo được khu vực mẫu có kích thước cỡ 0,3 mm (vì chiều dài chuẩn là 0,25 mm) thì khi dùng vật kính hiển vi 20X ta cần sử dụng cảm biến có kích thước lớn hơn:  $0,3 \times 20 = 6$  mm. Hơn nữa, theo lý thuyết lấy mẫu Nyquist- Shannon, để khai thác được hết độ phân giải quang học của vật kính hiển vi thì kích thước pixel của cảm biến ảnh phải không lớn hơn một nửa kích thước vết ảnh tạo bởi vật kính. Do kích thước vết ảnh tạo bởi vật kính hiển vi là  $20 \times 0,66 \mu\text{m} = 13,2 \mu\text{m}$  nên ta chỉ cần dùng cảm biến có kích thước điểm ảnh không lớn hơn  $6,6 \mu\text{m}$  là đáp ứng yêu cầu. Từ những phân tích trên và trong giới hạn điều kiện thực tế hiện có, chúng tôi chọn cảm biến ảnh MN4110PA loại CMOS kết nối USB của hãng Panasonic để sử dụng. Cảm biến ảnh MN4110PA có kích thước khu vực nhạy sáng thực tế là  $6177,6 \mu\text{m} \times 4650,4 \mu\text{m}$ , độ phân giải 1280 pixel x 720 pixel, kích thước điểm ảnh là  $4,82 \mu\text{m}$  (giảm kích thước pixel nhỏ hơn nữa không làm tăng độ phân giải mà lại có thể làm giảm độ nhạy và tăng mức nhiễu).

Khi sử dụng cảm biến ảnh này cùng với vật kính hiển vi độ phóng đại 20X, hệ thống thực nghiệm cho phép thu được hình ảnh giao thoa của bề mặt có diện tích  $308 \mu\text{m} \times 173 \mu\text{m}$ , mỗi điểm ảnh trên cảm biến ứng với kích thước 240 nm trên bề mặt mẫu đo. Thông số này đáp ứng được yêu cầu về thị giới (kích thước vùng đo) và độ phân giải ngang của hệ thống.

Độ sâu trường  $d_z$  của hệ quang tạo ảnh với các thành phần đã lựa chọn là [123]:

$$d_z = \frac{\lambda \cdot n}{NA^2} + \frac{n}{M \cdot NA} p = \frac{0,578 \cdot 1}{0,4^2} + \frac{1}{20 \cdot 0,4} 4,82 \approx 4,2 \mu\text{m} \quad (3.2)$$

trong đó,  $n$  là chiết suất môi trường,  $M$  là độ phóng đại của vật kính,  $p$  là khoảng cách giữa các pixel của cảm biến ảnh  $p = 4,82 \mu\text{m}$ . Như vậy, độ sâu trường phù hợp với lựa chọn hệ dịch chuyển thô (Mục 3.1.2).

Với những lựa chọn này, hệ thống quang học tạo ảnh đơn giản và có giá thành thấp nhưng vẫn đáp ứng yêu cầu đo cấu trúc 3D bề mặt chi tiết cơ khí chính xác và bề mặt quang học thông dụng.

### **3.1.1.2. Tính toán, phân tích và lựa chọn hệ chiếu sáng**

Hệ chiếu sáng có chức năng chiếu sáng mẫu cần đo, đảm bảo đủ cường độ sáng để quan sát mẫu qua hệ hiển vi. Đồng thời, ánh sáng từ hệ chiếu sáng cũng chính là nguồn tạo ra tín hiệu giao thoa. Việc chiếu sáng trong hiển vi giao thoa ánh sáng trắng phải đáp ứng các yêu cầu sau:

- Ánh sáng chiếu lên mẫu đo phải được phân bố đều, độ sáng có thể điều chỉnh được để nhận được hình ảnh đủ sáng và có độ tương phản tốt;
- Ánh của nguồn sáng không lẫn vào hình ảnh giao thoa của bề mặt mẫu;
- Trong mặt phẳng mẫu đo, vùng chiếu sáng phải có kích thước lớn hơn thị giới của kính hiển vi nhưng không quá lớn (để hạn chế tạp quang tán xạ bên trong hệ thống dẫn đến giảm độ tương phản của hình ảnh)
- Nguồn sáng có bước sóng phù hợp với dải phổ nhạy của cảm biến ảnh, có phổ rộng và có cường độ ổn định.

Một hệ chiếu sáng hiệu quả và được ứng dụng phổ biến trong các hệ kính hiển vi phản xạ nói chung, kính hiển vi giao thoa nói riêng là hệ chiếu sáng Köhler, được phát minh từ năm 1893. Hệ chiếu sáng này cho phép tạo ra chùm sáng có độ đồng đều cao, điều chỉnh được cường độ và đảm bảo ảnh của nguồn chiếu sáng không hiển thị trong hình ảnh của hệ hiển vi.

Các thành phần cơ bản của hệ chiếu sáng Köhler được thể hiện trên Hình 3.4, bao gồm: các thấu kính TK1 (thấu kính chuyên tiếp), TK2 (thấu kính thu), TK3 (thấu kính tụ), diaphragm khẩu độ để thay đổi cường độ chiếu sáng, diaphragm thị giới để thay đổi phạm vi chiếu sáng. Vị trí tương quan của các





chiếu sáng tương tự trong kính hiển vi, chúng tôi chọn thấu kính TK3 có tiêu cự  $f_3 = 75$  mm và đường kính 25,4 mm của hãng Thorlabs (kí hiệu LB1901).

Với tiêu cự của vật kính hiển vi  $f_0 = 9,0$  mm, đường kính đồng tử của vật kính hiển vi là:

$$D_{A3} \approx 2 \cdot f_0' \cdot NA = 2 \times 9 \times 0,4 = 7,2 (mm) \quad (3.3)$$

Ảnh của nguồn sáng cần lắp đầy đồng tử của vật kính hiển vi, vì thế đường kính diaphragm khẩu độ của hệ chiếu sáng sẽ là:

$$D_{A2} = D_{A3} \cdot \frac{f_2}{f_3} \quad (3.4)$$

Thấu kính TK2 cần có khẩu độ đủ lớn (tỷ số  $f/D$  nhỏ) để thu nhận năng lượng sáng. Nhưng nếu khẩu độ quá lớn thì kết cấu của thấu kính sẽ phức tạp và tiêu cự sẽ ngắn dẫn tới kích thước diaphragm khẩu độ sẽ nhỏ, gây khó khăn cho việc hiệu chỉnh. Hơn nữa, với bố trí hệ quang như Hình 3.4, kích thước diaphragm khẩu độ bằng kích thước hiệu dụng của nguồn sáng, nên để sử dụng hiệu quả các nguồn sáng LED thương mại sẵn có, kích thước diaphragm khẩu độ nên vào cỡ 3 – 5 mm. Để đồng thời thỏa mãn yêu cầu về khẩu độ, kích thước ngang và chiều dài hệ, chúng tôi chọn thấu kính TK2 có tiêu cự 35 mm, đường kính 25,4 mm của hãng Thorlabs (kí hiệu LB1811). Khi đó, kích thước diaphragm khẩu độ (A2) sẽ là:  $D_{A2} = D_{A3} \cdot \frac{f_2}{f_3} = 7,2 \times \frac{35}{75} = 3,6 (mm)$ .

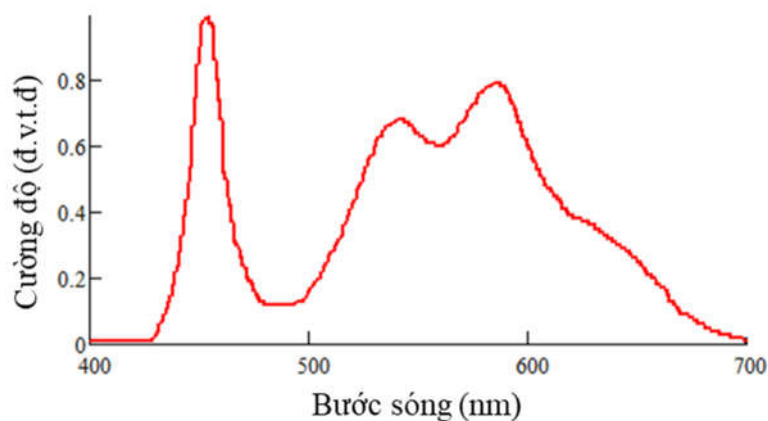
Đối với thấu kính TK1, do chức năng chính của nó là tập hợp năng lượng sáng phát ra từ nguồn và tập trung lên mặt phẳng diaphragm khẩu độ, nên cần có khẩu độ lớn nhất có thể. Để đảm bảo điều này, đồng thời để đảm bảo thuận lợi cho việc lắp ráp và phù hợp với điều kiện thí nghiệm sẵn có, chúng tôi sử dụng thấu kính TK1 có tiêu cự 25,4 mm, đường kính 25,4 mm của hãng Thorlabs (kí hiệu LB1761).

Với thông số của các thấu kính như trên, kích thước mặt phát sáng của nguồn sáng sẽ cần phải không nhỏ hơn 3,6 mm để chùm sáng chiếu đầy đồng tử của vật kính hiển vi.

Đối với nguồn sáng, yêu cầu đầu tiên là phải có phổ phát xạ rộng (chiều dài kết hợp của ánh sáng ngắn) để có thể thu được vân giao thoa ánh sáng trắng; thêm vào đó, nguồn sáng cũng phải là một nguồn sáng rộng (về kích thước ngang). Có nhiều loại nguồn sáng có thể sử dụng như các nguồn nóng sáng (đèn halogen và đèn hồ quang), nguồn huỳnh quang và LED [122]. Trong số đó, nguồn sáng LED có nhiều ưu điểm nổi bật như nhỏ gọn, rẻ, tiêu thụ ít năng lượng, tuổi thọ cao, dễ sử dụng, cường độ bức xạ ổn định, và phù hợp trong các ứng dụng cần điều khiển tốc độ cao. Chúng ta có thể dễ dàng điều khiển cường độ sáng của LED để có thể thu được tín hiệu giao thoa tốt nhất.

Với yêu cầu nêu trên, chúng tôi đã chọn LED phát ánh sáng trắng có kích thước vùng phát sáng lớn hơn  $3,6\text{mm} \times 3,6\text{mm}$  để sử dụng trong mô hình thực nghiệm, cụ thể là nguồn sáng LED trắng Luxeon, công suất 10W.

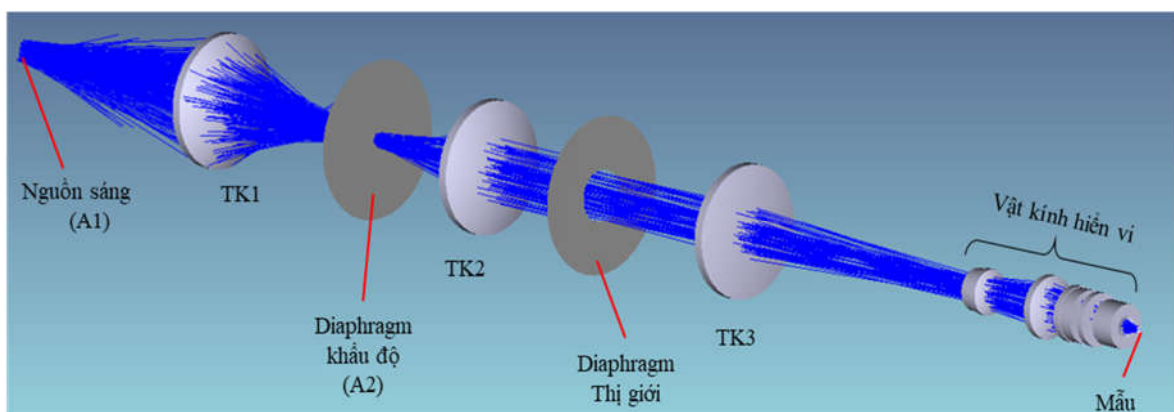
Hình 3.5 thể hiện phổ phát xạ của nguồn sáng LED trắng mà chúng tôi sử dụng trong mô hình. Phổ này được chúng tôi đo bằng máy đo quang phổ CCS 200 của hãng Thorlab. Rõ ràng, phổ phát xạ của nguồn LED là rất rộng, trải trên toàn bộ vùng ánh sáng nhìn thấy.



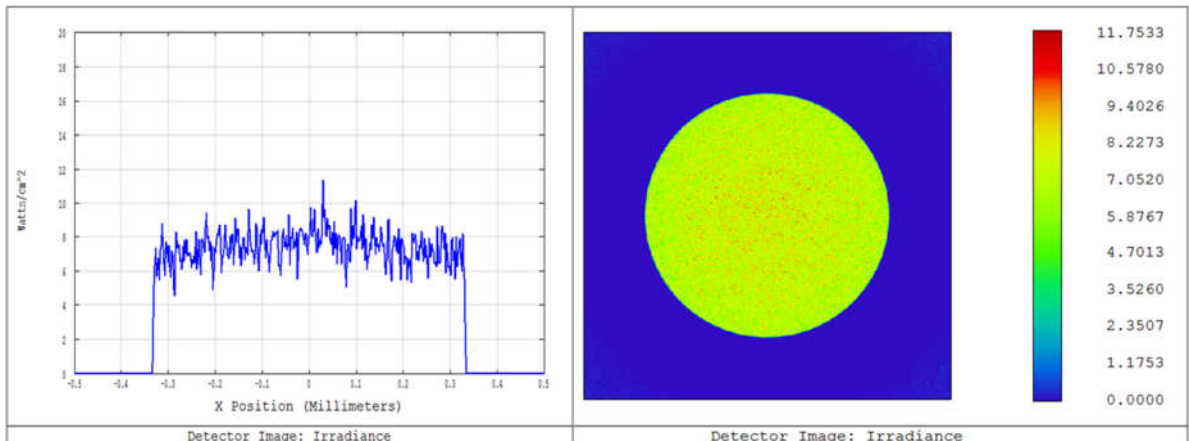
Hình 3.5: Phổ phát xạ của nguồn sáng LED trắng

Với nguồn sáng LED trắng đã lựa chọn, chúng tôi sử dụng mạch điều khiển Arduino với các đầu ra được điều chế độ rộng xung (PWM) kết nối với mạch công suất để điều khiển nguồn sáng LED trong quá trình đo. Mô đun điều khiển này được kết nối với máy tính cho phép điều khiển bật, tắt, thay đổi cường độ sáng thông qua các phần mềm được lập trình trên máy tính và trên Arduino.

Để kiểm tra hoạt động và đánh giá chất lượng của hệ chiếu sáng, chúng tôi đã sử dụng phần mềm thiết kế quang học Zemax ở chế độ tính hệ quang không tuần tự để tính toán, mô phỏng quá trình truyền sáng của hệ chiếu sáng. Hình ảnh hệ chiếu sáng được mô phỏng bằng phần mềm Zemax được thể hiện trên Hình 3.6. Ở đây, tấm chia chùm không được đưa vào mô phỏng vì nó là tấm phẳng song song, chỉ làm giảm 50% độ rọi trên mặt phẳng mẫu mà không làm ảnh hưởng đến phân bố độ rọi. Do không có thông số kết cấu chi tiết của vật kính hiển vi giao thoa, ở đây chúng tôi sử dụng thông số của vật kính hiển vi tương đương (có độ phóng đại 20X và khẩu độ số 0,4) để mô phỏng. Bằng phương pháp mô phỏng Monte Carlo, kết quả tính toán bản đồ phân bố độ rọi tại mặt phẳng mẫu thu được như trên Hình 3.7. Ta thấy, tại mặt phẳng mẫu đo, phân bố độ rọi của chùm chiếu sáng là đồng đều trên diện tích mẫu cần đo.

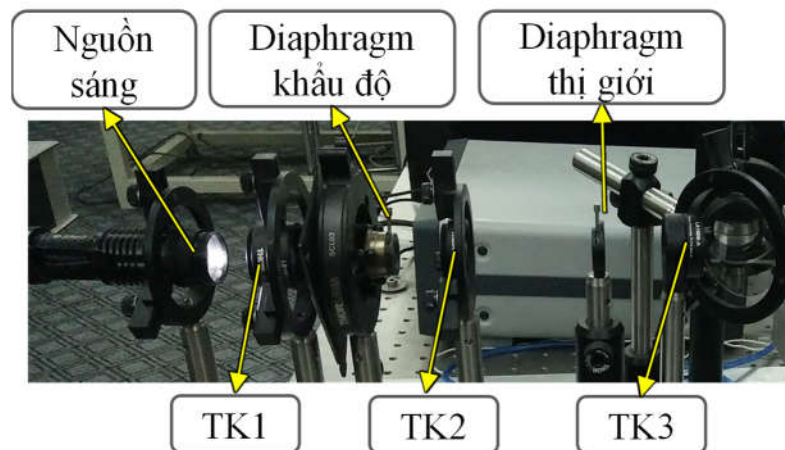


Hình 3.6: Mô phỏng hệ chiếu sáng bằng phần mềm Zemax



Hình 3.7: Kết quả tính phân bố độ rọi của chùm chiếu sáng tại mặt phẳng mẫu bằng phần mềm Zemax

Với các thành phần được xác định như trên, chúng tôi đã lắp đặt hệ chiếu sáng thực nghiệm như trên Hình 3.8. Độ rọi trên mẫu đo được điều chỉnh cho phù hợp với từng mẫu đo bằng cách điều chỉnh cường độ nguồn sáng kết hợp với điều chỉnh diaphragm khẩu độ. Kích thước vùng chiếu sáng được điều chỉnh bằng cách thay đổi đường kính diaphragm thị giới. Độ đồng đều trên vùng chiếu sáng được kiểm tra bằng cách đặt một bề mặt tán xạ đều (chẳng hạn tờ giấy trắng) vào vị trí mẫu đo và đánh giá phân bố độ xám trên ảnh thu được cho thấy hệ chiếu sáng được lắp đặt đáp ứng yêu cầu sử dụng cho thí nghiệm.



Hình 3.8: Ảnh chụp hệ chiếu sáng thực nghiệm

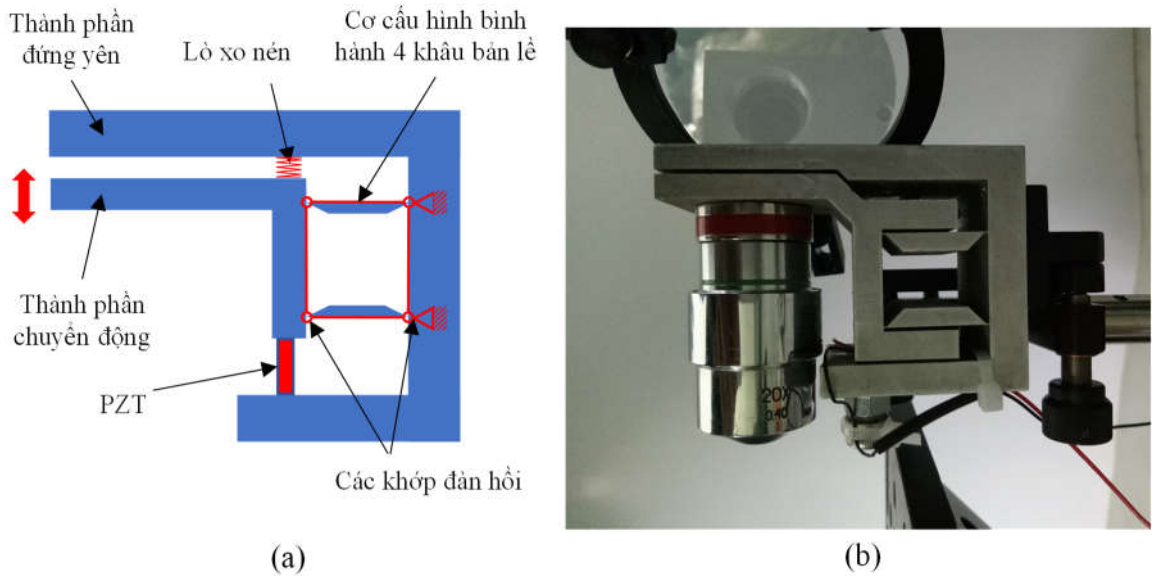
### 3.1.2. Hệ dịch chuyển và điều khiển dịch chuyển

Một thành phần không thể thiếu trong thiết bị WLI là hệ dịch chuyển và điều khiển dịch chuyển. Trong hệ thống WLI, có hai hệ dịch chuyển được sử dụng là hệ dịch sơ bộ (dịch chuyển thô) để điều chỉnh vị trí ban đầu của mẫu và hệ dịch chuyển độ chính xác cao (dịch chuyển tinh) để thu nhận hình ảnh giao thoa ở độ cao khác nhau.

Để thực hiện được phép đo giao thoa, một số thiết lập ban đầu phải được thực hiện như điều chỉnh mẫu đến vị trí lấy nét tốt nhất, điều chỉnh nghiêng mẫu. Các thao tác thường được thực hiện thông qua bàn gá mẫu có khả năng dịch chuyển các chiều x, y, z và các chiều quay. Trong mô hình thiết bị thực nghiệm, một bộ dịch chuyển tuyến tính 3 chiều x, y, z, điều chỉnh bằng tay của hãng Thorlab được dùng để điều chỉnh vị trí ban đầu của mẫu đo. Độ chia lượng dịch chuyển nhỏ nhất của bộ dịch chuyển này là 0,01 mm, đáp ứng yêu cầu lấy nét bề mặt mẫu trước khi tiến hành đo (cùng cỡ độ lớn với độ sâu trường của vật kính hiển vi).

Trong quá trình đo, mẫu và vật kính hiển vi cần được dịch chuyển chính xác tương đối với nhau nhằm thu được hình ảnh giao thoa ở nhiều vị trí dọc theo quang trục (vuông góc với bề mặt mẫu). Tương tự như trong các thiết bị đo thương mại, bộ vi dịch chuyển chính xác dẫn động bằng gốm áp điện (PZT) được lựa chọn sử dụng.

Chúng tôi đã tự chế tạo một bộ vi dịch chuyển áp điện chính xác cao. Bộ vi dịch chuyển này gồm hai khối chính là: mô đun dịch chuyển đàn hồi được dẫn động bằng gốm áp điện PK4DMP1 của hãng Thorlab; và mô đun điện tử cho phép điều khiển khối áp điện dịch chuyển với độ chính xác cỡ nanomet thông qua điều khiển điện áp. Mô đun đàn hồi đơn khối được thiết kế, chế tạo bằng vật liệu hợp kim nhôm AL6061, sử dụng cơ cấu hình bình hành bốn khâu với bản lề đàn hồi gọn nhẹ như trên Hình 3.9.



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

Bộ vi dịch chuyển tự chế đã được khảo sát theo đúng điều kiện làm việc thực tế của nó là dịch chuyển vật kính hiển vi giao thoa Mirau 20X theo chiều dọc trục quang. Kết quả khảo sát cho thấy bộ vi dịch chuyển hoạt động ổn định, có độ lặp lại tốt với bước dịch nhỏ nhất cỡ 10 nm trong phạm vi 7  $\mu\text{m}$  [119] (xem chi tiết ở mục 3.3.2). Mặc dù, hiện tượng trễ của PZT vẫn tồn tại, nhưng với chu trình hoạt động không đổi khi tăng điện áp cung cấp từ 0 V đến 100 V, ảnh hưởng của hiện tượng trễ đến lượng dịch chuyển là không đáng kể. Bộ dịch chuyển hoàn toàn có thể được điều khiển chính xác mà không cần sử dụng thêm cảm biến dịch chuyển nào khác.

Để điều khiển bộ vi dịch chuyển tự chế, chúng ta cần sử dụng một mô đun có khả năng cung cấp điện áp chính xác cho khối dẫn động áp điện và có thể được điều khiển bằng máy tính. Bộ điều khiển Piezo K-Cube (KPZ101) (Hình 3.10) của hãng Thorlab (Anh) có khả năng thực hiện được nhiệm vụ này nên được lựa chọn sử dụng trong mô hình thiết bị thực nghiệm của chúng tôi.



*Hình 3.10: Bộ điều khiển Piezo K-Cube (KPZ101)*

Bộ điều khiển Piezo K-Cube là bộ điều khiển đơn kênh nhỏ gọn, chuyên dụng để điều khiển các bộ truyền động áp điện, nó có cả chế độ điều khiển bằng tay hoặc tự động. Bộ điều khiển này có khả năng cung cấp điện áp tới 150 V, với dòng 7.5 mA, tần số hoạt động lên đến 1 kHz. KPZ101 có khả năng điều khiển tức thì hoạt động của các gôm áp điện piezo hoặc bộ truyền động được trang bị piezo. Độ phân giải có thể dễ dàng thay đổi nhằm cung cấp điện áp chính xác cao cho bộ truyền động Piezo. Bộ điều khiển này có thể được điều khiển bằng máy tính thông qua kết nối USB và phần mềm sẵn có hoặc người dùng tự phát triển.

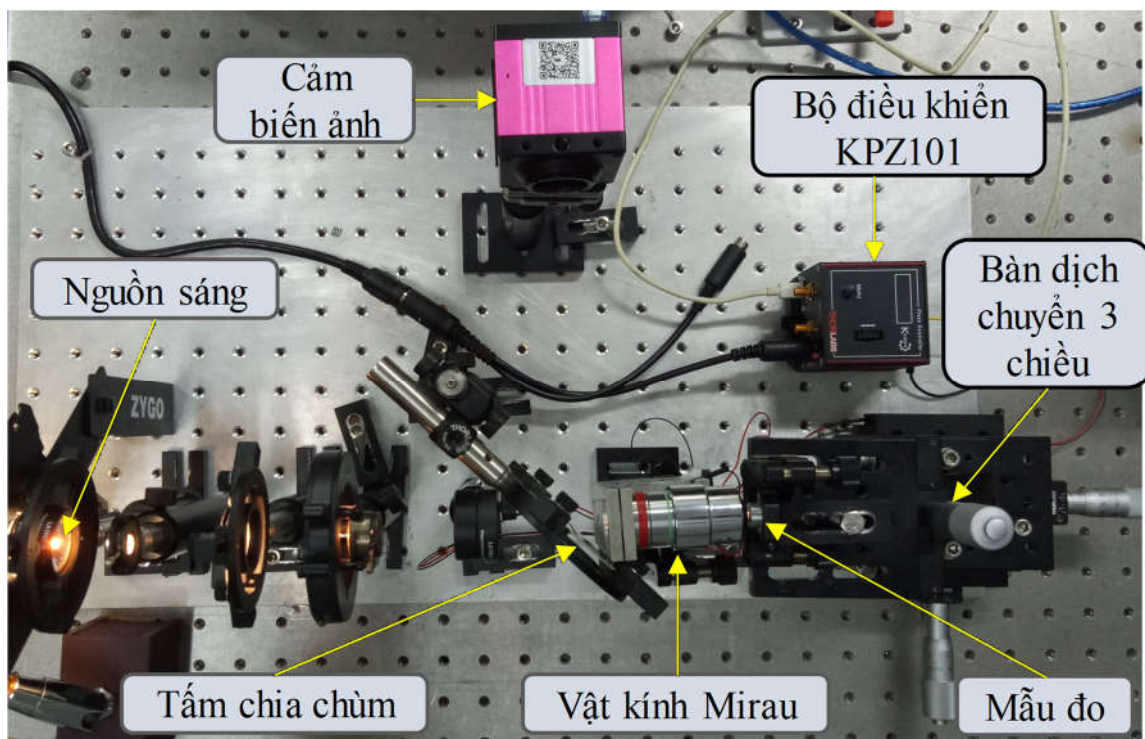
### **3.1.3. Phần mềm điều khiển và xử lý dữ liệu**

Phần mềm điều khiển đo và xử lý dữ liệu có chức năng điều khiển hoạt động của các thành phần một cách đồng bộ với nhau để thực hiện phép đo và xử lý dữ liệu, nó bao gồm các mô đun điều khiển hoạt động của nguồn sáng, cảm biến ảnh, bộ vi dịch chuyển được kết nối với máy tính, mô đun thu nhận và xử lý tín hiệu. Trong quá trình đo, cường độ của nguồn sáng, thông số của cảm biến (thời gian phơi sáng, độ tương phản), vị trí dịch chuyển được điều khiển và đồng bộ hóa bằng phần mềm trên máy tính. Mỗi phép đo sẽ ghi nhận và lưu lại khoảng 500 hình ảnh giao thoa tương ứng với 500 vị trí dịch chuyển.



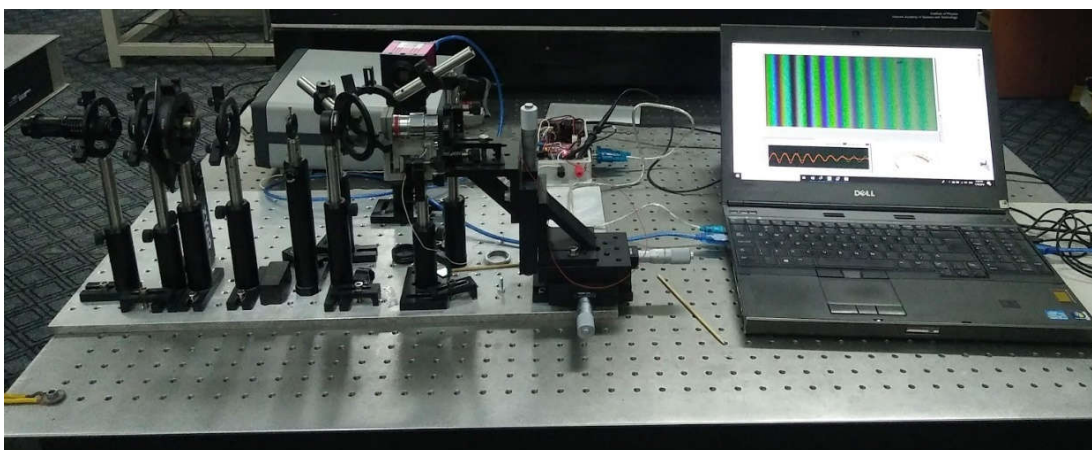
Sau đó, tập hợp hình ảnh giao thoa này được xử lý để trích xuất thông tin tọa độ ba chiều của mỗi điểm ảnh, tương ứng với mỗi điểm trên bề mặt mẫu và dựng lại bản đồ 3 chiều bề mặt mẫu đo. Hoạt động đo và ghi ảnh được thực hiện bằng phần mềm do chúng tôi tự viết bằng ngôn ngữ lập trình LabView, việc xử lý dữ liệu được thực hiện bằng phần mềm được viết trên ngôn ngữ lập trình Matlab (Phụ lục III).

### 3.1.4. Mô hình thiết bị thực nghiệm



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

Trên cơ sở các thành phần đã được lựa chọn và xây dựng như trình bày ở trên, chúng tôi đã xây dựng trong phòng thí nghiệm một mô hình hệ hiển vi giao thoa ánh sáng trắng thực nghiệm. Hình 3.11 và Hình 3.12 là các ảnh chụp mô hình thực nghiệm mà chúng tôi đã xây dựng. Toàn bộ hệ thống được bố trí trên một tấm đế kích thước 300 mm × 500 mm, được cố định trên bàn quang học chống rung.



Hình 3.12: Ảnh chụp tổng thể thiết bị đo biên dạng 3D của bề mặt chi tiết

### 3.2. Mô phỏng hoạt động của thiết bị

Để phân tích khả năng làm việc của các thành phần trong thiết bị và làm cơ sở phát triển thuật toán xử lý tín hiệu WLI, nội dung mô phỏng hoạt động của hệ thống WLI với các tham số sát với điều kiện thực nghiệm đã được thực hiện. Mục đích là mô phỏng sự hình thành các hình ảnh giao thoa tại các vị trí khác nhau của bề mặt giả định trước. Sau đó, sử dụng các hình ảnh giao thoa này làm đầu vào để tái tạo cấu trúc hình học 3D bề mặt theo các thuật toán xử lý trong WLI và so sánh với bề mặt giả định để đánh giá lý thuyết hiệu quả của thuật toán.

#### 3.2.1. Mô phỏng sự hình thành hình ảnh vân WLI

Chúng tôi tiến hành mô phỏng sự hình thành hình ảnh vân giao thoa ánh sáng trắng theo sơ đồ hiển vi giao thoa Mirau. Trong mô phỏng này, những thông số cơ bản của các thành phần trong sơ đồ giao thoa đều được xem xét và sự hình thành vân giao thoa được mô phỏng dựa trên mô hình toán học có tính đến sự đóng góp khác nhau của 3 thành phần màu và độ nhạy phổ của cảm biến.

##### 3.2.1.1. Mô hình toán học và mô phỏng sự hình thành vân WLI

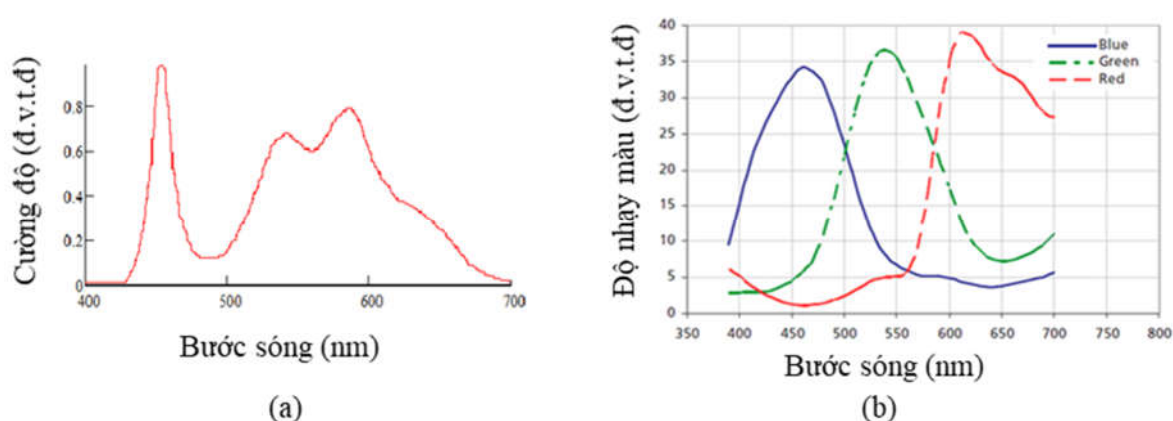
Nhiều nhà khoa học đã nghiên cứu về sự hình thành màu sắc vân giao thoa cũng như xác định sai lệch pha bằng cách so màu. Antonin Miks và cộng sự đã

đề xuất sử dụng WLI để đo những thay đổi pha rất nhỏ qua việc phân tích màu [110]. Takenori Kato đã đề xuất biểu đồ màu để biểu diễn hình ảnh giao thoa bằng máy tính [85, 86]. Biểu đồ màu được xây dựng bằng cách so sánh màu tạo ra từ giao thoa với màu tạo ra bằng chương trình máy tính. Từ đó, tác giả đã xây dựng được hình ảnh vân WLI của nêm quang học với giả định sự đóng góp của các bước sóng vào sự hình thành vân giao thoa là như nhau. Hình ảnh giao thoa mô phỏng gần giống với hình ảnh giao thoa thực tế. Tuy nhiên, trong nghiên cứu của Kato đã không xét đến ảnh hưởng của phổ phát xạ nguồn sáng, một trong những thành phần có vai trò quyết định đến màu sắc của vân giao thoa. Năm 2012, Wee Keat Chong và cộng sự đã nghiên cứu ảnh hưởng của phổ phát xạ của nguồn đối với sự hình thành vân trong WLI và kết quả đo biên dạng bề mặt [30]. Tuy nhiên, trong tính toán, các tác giả đã đơn giản hóa mô hình với giả định khẩu độ số của vật kính hiển vi nhỏ và coi sự phân bố phổ nguồn theo hàm Gauss. Hơn nữa, kết quả mô phỏng thu được là tín hiệu giao thoa theo cường độ mà không đưa ra tín hiệu màu cụ thể. Ngoài nguồn sáng, các thành phần quang học trong hệ giao thoa, cảm biến ảnh cũng là những thành phần quan trọng ảnh hưởng đến kết quả thu nhận tín hiệu giao thoa mà các nghiên cứu trước đây chưa phân tích một cách chi tiết.

Để khắc phục những hạn chế nêu trên, trong mô phỏng của chúng tôi, mô hình toán học của sự hình thành vân giao thoa ánh sáng trắng đã được phát triển thêm một bước dựa trên cơ sở lý thuyết phổ màu chuẩn sRGB. Trong mô hình này, phổ phát xạ của nguồn sáng, độ nhạy phổ của cảm biến ảnh ở các bước sóng tương ứng với 3 thành phần màu cơ bản đã được tính đến, đồng thời thông số của vật kính hiển vi cũng được bổ sung để phù hợp với điều kiện thực nghiệm.

Trong sơ đồ hệ hiển vi WLI sử dụng vật kính hiển vi Mirau (Hình 3.1), bề mặt mẫu đặt cách vật kính hiển vi một khoảng  $z_0$ , vật kính hiển vi được điều

khuyến thay đổi vị trí bằng bộ vi dịch chuyển PZT với lượng dịch chuyển là  $z$ . Trong quá trình quét, dữ liệu về cường độ sáng tại mỗi điểm ảnh trên cảm biến ảnh được ghi liên tiếp tương ứng với lượng dịch chuyển  $z$  của vật kính. Tùy thuộc vào phổ phát xạ của nguồn sáng, phổ độ nhạy của cảm biến, khoảng cách từ vật kính đến mẫu đo ( $z$ ) và cấu trúc hình học 3D bề mặt mẫu, hình ảnh vân giao thoa thu được sẽ khác nhau về hình dạng, tần số, màu sắc.



Hình 3.13: (a) Phổ phát xạ của LED trắng (đo bằng máy quang phổ CCS200); (b) Phổ độ nhạy của cảm biến MN34110PA

Màu sắc trong vùng ánh sáng nhìn thấy được biểu diễn bởi tổ hợp các giá trị cường độ của ba màu cơ bản là đỏ, xanh lục, xanh lam (R, G, B) [90]. Trong mô hình thiết bị thực nghiệm, LED trắng được sử dụng làm nguồn sáng và cảm biến ảnh màu làm phần tử thu, do đó cần xem xét sự đóng góp của các thành phần phổ khác nhau theo phổ phát xạ của LED và phổ độ nhạy của cảm biến (Hình 3.13) [30, 117, 149].

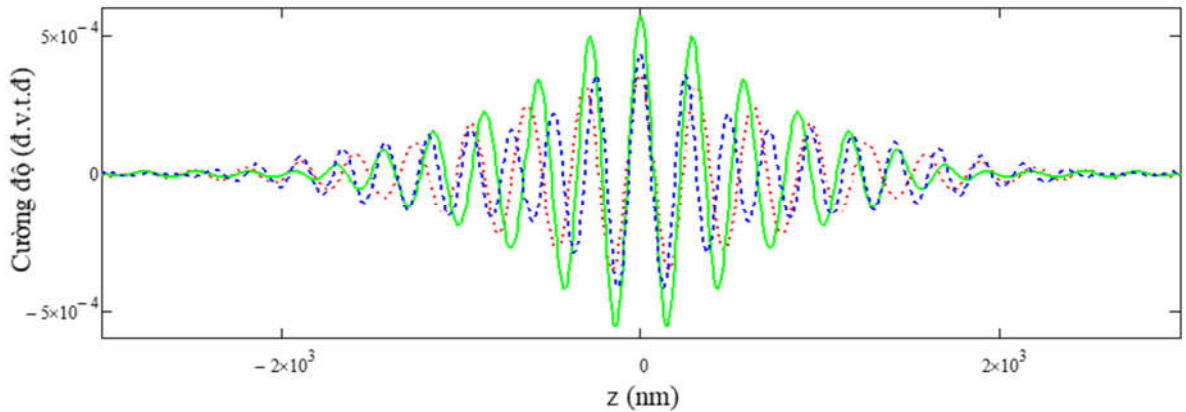
Do tính chất kết hợp rất thấp của nguồn sáng, hình ảnh giao thoa thu được là sự chồng chập cường độ của 3 tín hiệu từ 3 loại cảm biến màu trên cảm biến ảnh [149]. Để thu được màu của tín hiệu giao thoa, chúng ta cần tính toán các cường độ tín hiệu thu được trên các thành phần cảm biến màu. Do cường độ phát xạ của LED ở 3 thành phần màu khác nhau là khác nhau, độ nhạy của cảm

biên ảnh ở bước sóng khác nhau cũng khác nhau (Hình 3.13) nên đóng góp của mỗi thành phần màu vào kết quả tổng hợp cũng khác nhau. Để tính đến điều này, chúng tôi đề xuất các hàm trọng số cho từng màu:  $WRL(\lambda)$  cho màu đỏ,  $WGL(\lambda)$  cho màu xanh lục và  $WBL(\lambda)$  cho màu xanh dương. Các hàm trọng số này được xây dựng bằng cách nhân hàm biểu diễn phát xạ của LED trắng với hàm biểu diễn phổ độ nhạy của cảm biến (tính toán chi tiết các hàm trọng số được trình bày trong Phụ lục I). Từ biểu thức (2.7), khi bỏ qua các thành phần không đổi và đưa vào các hàm trọng số trên ta rút ra biểu thức cường độ tín hiệu giao thoa ở ba màu đỏ, xanh lục, xanh dương như sau [3]:

$$IR(z) = \int_{400}^{700} WRL(\lambda) \int_0^{\theta_0} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \cdot \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} \cdot z \cdot \cos(\theta) + \phi\right] \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) d(\theta) d\lambda \quad (3.5)$$

$$IG(z) = \int_{400}^{700} WGL(\lambda) \int_0^{\theta_0} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \cdot \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} \cdot z \cdot \cos(\theta) + \phi\right] \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) d(\theta) d\lambda \quad (3.6)$$

$$IB(z) = \int_{400}^{700} WBL(\lambda) \int_0^{\theta_0} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \cdot \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} \cdot z \cdot \cos(\theta) + \phi\right] \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) d(\theta) d\lambda \quad (3.7)$$



Hình 3.14: Cường độ tín hiệu giao thoa của các thành phần màu theo độ cao

Hình 3.14 thể hiện cường độ tín hiệu giao thoa của mỗi màu thu được tại các pixel trên cảm biến trong khoảng độ cao  $\pm 3000$  nm. Kết quả tính toán cho

thấy ở ngoài phạm vi 2000 nm từ vị trí  $z_0$ , vân giao thoa của các thành phần màu bị dập tắt. Do đó, để tăng tốc độ tính toán mô phỏng, chúng tôi giới hạn việc tính toán cường độ tín hiệu giao thoa trong khoảng  $\pm 2000$  nm (việc tính toán ngoài khoảng này chỉ làm mất thời gian mà không có đóng góp gì đáng kể), sau đó lưu các giá trị tính toán được vào các bảng dữ liệu (RZ, GZ, BZ) và sử dụng phương pháp tra bảng để tăng tốc độ tính toán. Ở những vị trí ngoài khoảng  $\pm 2000$  nm, cường độ tín hiệu được coi là bằng nhau và bằng tín hiệu tại  $z = 2000$  nm.

Tín hiệu hình ảnh thu được từ cảm biến của mỗi màu được lượng hóa thành 256 mức tương đương với dữ liệu 8 bit. Do đó, các tín hiệu tính toán được theo độ cao  $z$  cũng cần được lượng hóa để thu được hình ảnh sát với thực tế. Việc này được thực hiện bằng cách nhân tín hiệu tính toán với một hệ số tỷ lệ ( $t_{color}$ ) được tính toán bằng công thức (3.8):

$$t_{color} = \frac{\max(RZ, RG, RB) - \min(RZ, RG, RB)}{256} \quad (3.8)$$

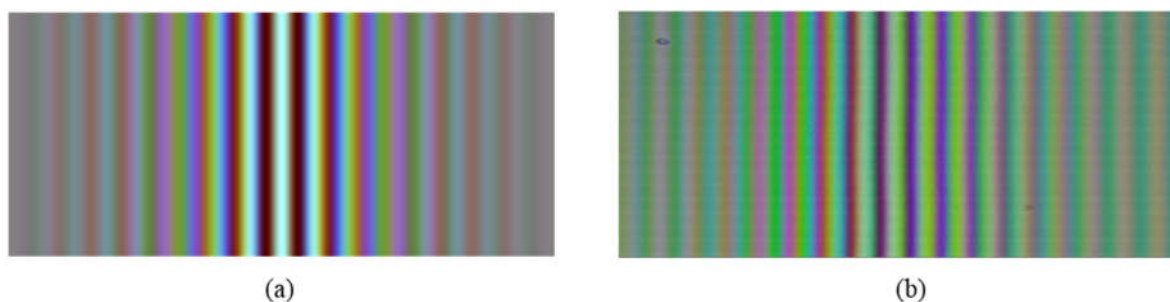
Trong đó,  $\max(RZ, RG, RB)$  và  $\min(RZ, RG, RB)$  là lần lượt là giá trị lớn nhất và nhỏ nhất của cường độ tín hiệu giao thoa trong các bảng dữ liệu đã lưu.

*Bảng 3.2: Các thông số của mô hình hệ giao thoa mô phỏng*

Thông số	Giá trị
Độ phóng đại vật kính hiển vi	20X
Khẩu độ số của vật kính hiển vi (NA)	0,4
Kích thước điểm ảnh (pixel)	4,8 $\mu\text{m}$
Kích thước cảm biến ảnh	1280 pixel $\times$ 720 pixel

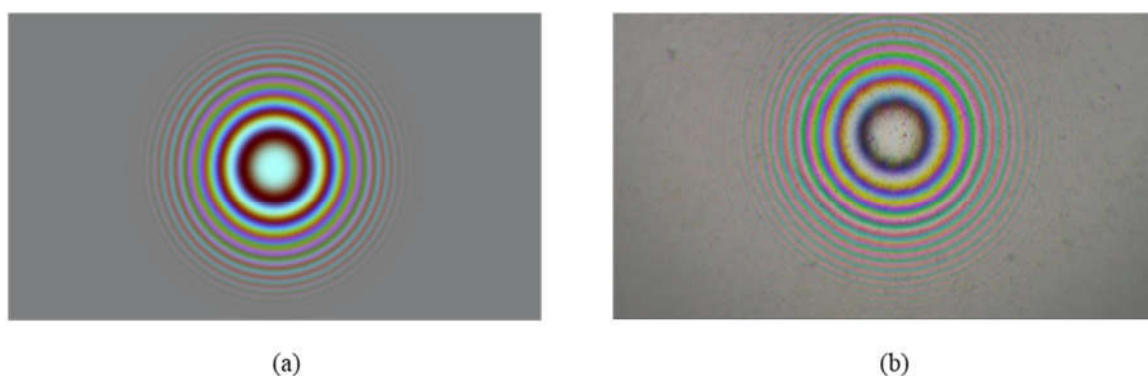
Sử dụng chương trình tự viết trên môi trường Mathcad (Phụ lục I), chúng tôi đã mô phỏng hình ảnh vân giao thoa thu được cho một số bề mặt điển hình

sử dụng sơ đồ kính hiển vi WLI có các thông số cơ bản như ở Bảng 3.2. Các thông số dùng trong mô phỏng phù hợp với các thành phần trong hệ thống WLI thực nghiệm đã trình bày trong Mục 3.1.



Hình 3.15: Hình ảnh vân giao thoa với mẫu là mặt phẳng đặt nghiêng.

(a) hình ảnh mô phỏng và (b) ảnh thực nghiệm



Hình 3.16: Hình ảnh vân giao thoa với mẫu là chòm cầu

(a) hình ảnh mô phỏng; (b) ảnh thực nghiệm

Hình 3.15 thể hiện hình ảnh vân giao thoa mô phỏng [Hình 3.15 (a)] và hình ảnh thu nhận được từ hệ thí nghiệm [Hình 3.15 (b)] với mẫu là mặt phẳng được chú ý đặt nghiêng một góc nhỏ. Hình ảnh thực nghiệm thu được khi dùng một mặt gương phẳng của hãng Thorlab (độ phẳng  $\lambda/10$ ) làm mẫu. Kết quả cho thấy hình ảnh vân giao thoa mô phỏng và hình ảnh thực nghiệm có sự tương đồng tốt về phân bố màu sắc và hình dạng vân giao thoa. Những nơi mà chênh lệch quang trình bằng 0 (vị trí ZOPD) xuất hiện vạch sáng nhất và có màu “trắng”, đây là vân sáng trung tâm. Tại đây, độ tương phản vân giao thoa lớn

nhất. Ở những vùng xa vị trí ZOPD, do mức đóng góp tín hiệu của các bước sóng khác nhau nên tạo thành các vân giao thoa có màu. Càng ra xa vị trí ZOPD, độ tương phản vân giao thoa giảm dần và màu sắc vân giao thoa không còn được phân biệt rõ ràng nữa.

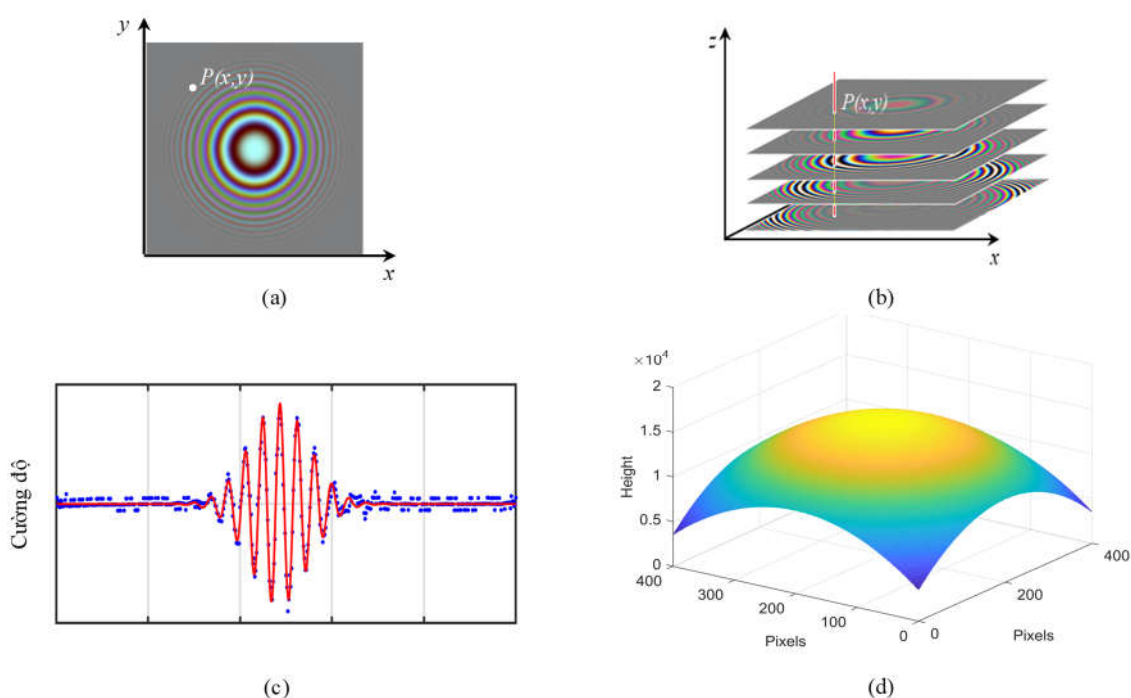
Một thử nghiệm mô phỏng khác đã được thực hiện đối với mặt cầu. Hình ảnh vân giao thoa mô phỏng cho bề mặt cầu đường kính 2,5 mm (vị trí đỉnh chỏm cầu được quy ước tại  $z = 0$ ) và hình ảnh giao thoa thực tế thu được với mẫu đo là chỏm cầu của viên bi đường kính 2,5 mm được thể hiện trên Hình 3.16. Hệ vân giao thoa là những hình tròn xác nhận bề mặt mẫu là mặt cầu. Ở trung tâm hệ vân là một đĩa sáng tròn, tại đây sự đóng góp của các màu R, G, B là lớn nhất và hình thành vân trung tâm, tương ứng với vùng đỉnh chỏm cầu. Do sự sai khác bước sóng, các vân giao thoa bên ngoài có các viền màu sắc khác nhau, độ tương phản của vân giao thoa cách xa vân trung tâm giảm dần và tần số vân giao thoa tăng lên do chênh lệch chiều cao ở đỉnh nhỏ hơn so với chênh lệch chiều cao ở vùng xa đỉnh chỏm cầu.

Những kết quả trên khẳng định mô hình mô phỏng hệ WLI đã được thiết lập thành công, trong đó đã xét đến phổ phát xạ của nguồn sáng LED, thông số vật kính Mirau và độ nhạy màu của cảm biến ảnh. Kết quả mô phỏng cho thấy sự phù hợp tốt với hình ảnh thực nghiệm về cả phân bố và thay đổi màu sắc của vân giao thoa. Mô hình này cho phép mô phỏng các hệ hiển vi WLI theo sơ đồ giao thoa kế Mirau và có thể ứng dụng để phân tích, khảo sát, đánh giá các cấu hình hiển vi WLI với các thông số khác nhau. Các hình ảnh vân giao thoa mô phỏng được dùng làm đầu vào để khảo sát các thuật toán tái tạo cấu trúc hình học 3D bề mặt nhằm lựa chọn thông số và thuật toán tối ưu phục vụ xây dựng các hệ đo theo phương pháp WLI. Các kết quả mô phỏng sự hình thành hình ảnh giao thoa theo sơ đồ hiển vi Mirau được công bố trong bài báo [2].



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

Bước tiếp theo của quá trình đo biên dạng bề mặt sử dụng WLI là xử lý các hình ảnh vân giao thoa ở các vị trí dịch chuyển khác nhau để tái tạo cấu trúc hình học 3D của bề mặt. Có nhiều phương pháp xử lý tín hiệu giao thoa khác nhau như đã được trình bày trong Mục 2.5. Trong phần mô phỏng tái tạo cấu trúc hình học 3D của bề mặt giả định, để đơn giản, các bề mặt mô phỏng được coi là bề mặt đồng nhất, ánh sáng phản xạ từ bề mặt mẫu không bị lệch pha do sai khác vật liệu. Do đó, phương pháp tìm cực đại trong xử lý ảnh WLI được áp dụng để tái tạo cấu trúc hình học 3D của bề mặt.



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

Để tính toán mô phỏng, chúng tôi đã giả lập bề mặt cần đo là mặt cầu đường kính 2,5 mm và các thông số của hệ thống như Bảng 3.2. Một loạt các

ảnh giao thoa mô phỏng ở vị trí mẫu cách nhau 50 nm đã được tạo ra. Sau đó việc tái tạo cấu trúc hình học 3D của bề mặt sử dụng phương pháp tìm cực đại tín hiệu được thực hiện. Để kiểm chứng thuật toán đề xuất phù hợp với điều kiện đo thực tế, các hình ảnh mô phỏng được bổ sung thêm 10% nhiễu ngẫu nhiên.

Xét một điểm  $P(x,y)$  trên bề mặt mẫu đo, tín hiệu giao thoa theo chiều  $z$  tương ứng với điểm  $P$  thu nhận được từ các hình ảnh giao thoa như thể hiện ở Hình 3.17 (c). Vị trí điểm cực đại của tín hiệu giao thoa tại  $P$  là vị trí có  $OPD = 0$ , cũng là vị trí xác định độ cao  $z$  của bề mặt tại điểm đó. Tiến hành xác định độ cao  $z$  của tất cả các điểm ảnh trong mặt phẳng  $(x, y)$  ta thu được biên dạng 3D của chỏm cầu mô phỏng như trên Hình 3.17 (d).

Như vậy, toàn bộ hoạt động của một hệ thống WLI đã được mô phỏng thành công bao gồm mô phỏng sự hình thành hình ảnh vân giao thoa tại các vị trí dịch chuyển khác nhau của vật kính và mô phỏng quá trình tái tạo cấu trúc hình học 3D của bề mặt chi tiết. Kết quả hình ảnh vân giao thoa mô phỏng và cấu trúc hình học 3D sau khi tái tạo tương đồng với hình ảnh giao thoa thực tế về màu sắc, kích thước khi sử dụng mẫu đo tương tự với mẫu đo giả định. Việc mô phỏng hoạt động của hệ WLI có ý nghĩa về mặt lý thuyết trong phân tích, đánh giá ảnh hưởng thông số của các thành phần riêng lẻ phục vụ cho việc xây dựng mô hình thiết bị WLI.

### 3.3. Hiệu chuẩn mô hình thiết bị

Hiệu chuẩn là một nhiệm vụ quan trọng trong xây dựng thiết bị đo. Hiệu chuẩn liên quan tới xác định các đặc tính đo lường của một phương tiện đo. Mục đích của việc hiệu chuẩn cho bất kỳ thiết bị đo nào là xác định độ không bảo đảm đo, độ lặp lại, độ tái lập của thiết bị đó [82]. Điều này cho phép người dùng đánh giá được ý nghĩa của dữ liệu đo được từ thiết bị. Phương pháp hiệu

chuẩn phổ biến nhất là đo một mẫu chuẩn về mặt hình học hoặc đo đối chứng với một dụng cụ đo tiêu chuẩn khác.

Hiện tại, quy trình hiệu chuẩn được các nhà sản xuất thiết bị WLI khuyến nghị sử dụng để xác minh thang đo theo chiều ngang và theo chiều dọc là đo các mẫu đã được chuẩn hóa trước và sau đó so sánh kết quả đo với kết quả trong giấy chứng nhận hiệu chuẩn [82, 98, 99]. Một quy trình hiệu chuẩn chi tiết của thiết bị đo bề mặt khác nhau theo tiêu chuẩn ISO được mô tả trong tài liệu [82, 98, 99]. Trong phần này, việc hiệu chuẩn kích thước ngang, hiệu chuẩn dịch chuyển dọc trục, xác định tần số cắt của thiết bị được thực hiện.

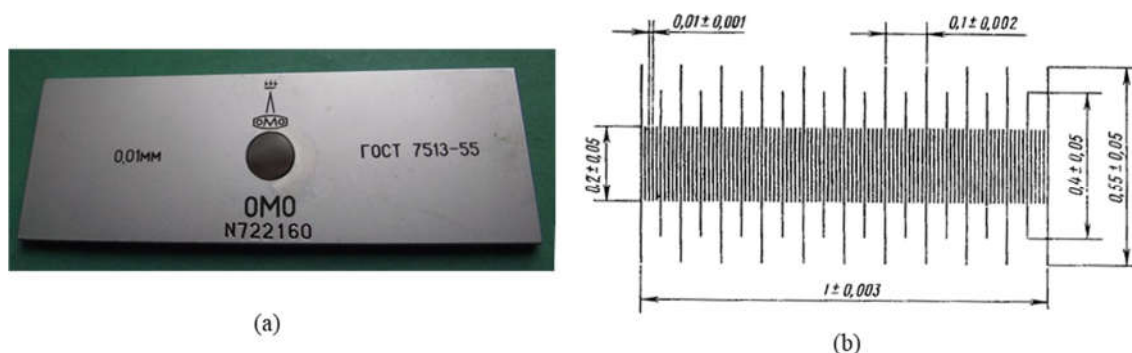
### 3.3.1. Hiệu chuẩn kích thước ngang

Mục đích của hiệu chuẩn kích thước ngang là để xác định độ không đảm bảo của các phép đo đối với các thang đo trục ngang (x, y) của WLI. Các nguyên nhân gây ra sai số đo kích thước ngang có thể kể đến gồm: sai số độ phóng đại của vật kính hiển vi, sai lệch giữa vị trí mặt phẳng ảnh và vị trí thực tế của cảm biến và sai số vị trí phân bố giữa các điểm ảnh. Những sai số này ảnh hưởng đến độ không đảm bảo của bất kỳ tham số hình học nào (đặc biệt là sai số kích thước đo theo chiều ngang trục) được trích xuất từ tập dữ liệu 3D của bề mặt. Thực tế, sự sai lệch do phân bố vị trí các điểm ảnh không đáng kể nên có thể coi việc hiệu chỉnh kích thước ngang tương đương với việc xác định kích thước thực tế mà mỗi điểm ảnh chiếm chỗ.

Để thực hiện hiệu chuẩn kích thước ngang của mô hình thiết bị, một thước chuẩn được sử dụng. Hệ số chuyển đổi cho tọa độ của vật kính Mirau với độ phóng đại 20X xác định được là  $K = (240 \pm 8) \text{ nm/pixel}$ . Việc hiệu chuẩn kích thước ngang được thực hiện cụ thể như sau:

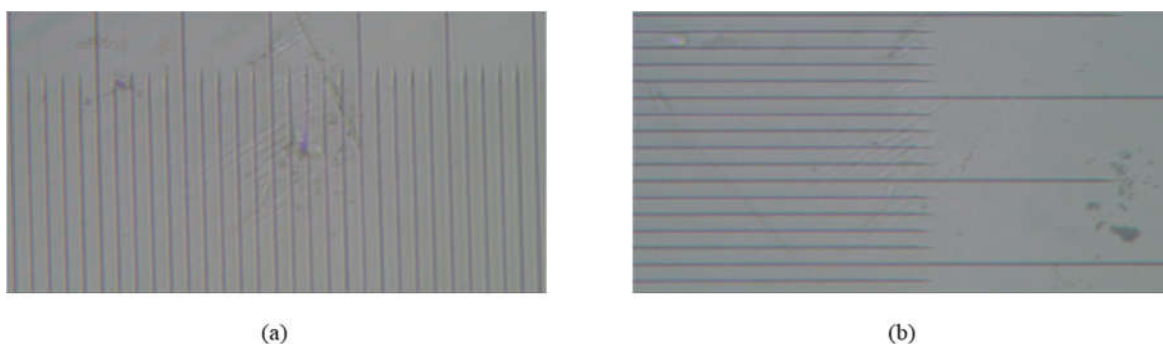
Mẫu hiệu chuẩn kích thước ngang sử dụng trong luận án là một mẫu hiệu chuẩn kính hiển vi thông thường. Đây là thước chuẩn OMO (Nga) [Hình

3.18 (a)] với các bước 0,01 mm và chiều dài thước là 1 mm với dung sai kích thước cho phép như thể hiện trên Hình 3.18 (b).



Hình 3.18: (a) Thước chuẩn OMO, (b) Thang đo và sai số của thước chuẩn theo tiêu chuẩn GOST 7513-55

Sau khi thiết lập xong hệ thống hiển vi, thước chuẩn được đưa vào để thu nhận ảnh. Để hiệu chuẩn cả trục x và y, có hai ảnh của thước chuẩn được ghi lại (Hình 3.19) tương ứng với hai chiều x và y. Bằng xử lý ảnh ta tính toán số lượng điểm ảnh trung bình giữa các vạch theo các chiều sau đó tính toán kích thước thực tế mà mỗi điểm ảnh chiếm chỗ.



Hình 3.19: Ảnh của thước chuẩn thu nhận được từ hệ thí nghiệm (a) chiều x (b) chiều y

Quá trình thu nhận ảnh và xử lý để tính toán kích thước điểm ảnh được lặp đi lặp lại 5 lần để đánh giá độ lặp lại của phép hiệu chuẩn cũng như giảm sự ảnh hưởng của việc nghiêng mẫu đo theo các chiều. Kích thước thực trên mẫu đo tương ứng với mỗi điểm ảnh là  $0,24 \pm 0,008 \mu\text{m}$  cho cả hai chiều x và

y. Với chế độ hoạt động 720p của cảm biến ảnh, kích thước thực trên mặt phẳng mẫu của mỗi ảnh giao thoa là  $308 \mu\text{m} \times 173 \mu\text{m}$ , phù hợp với tính toán từ các thông số hệ thống ở Mục 3.1.1.

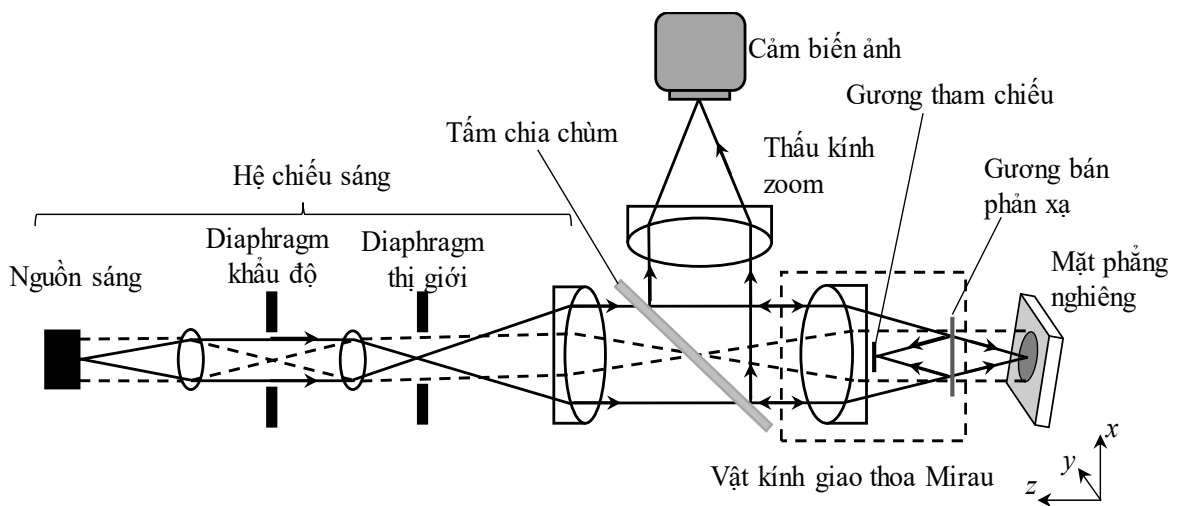
### 3.3.2. Hiệu chuẩn dịch chuyển dọc trục

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. Độ chính xác đo này được quyết định bởi độ chính xác của bộ vi dịch chuyển và phương pháp xử lý tín hiệu giao thoa. Hiệu chuẩn này thường được thực hiện bằng cách đo chiều cao của mẫu bậc chiều cao chuẩn. Mẫu bậc chiều cao chuẩn thường kèm với chứng nhận hiệu chuẩn tương ứng với điều kiện đo tiêu chuẩn. Tuy nhiên, mẫu bậc chiều cao chuẩn là sản phẩm đắt tiền, chỉ một số hãng sản xuất và trung tâm nghiên cứu lớn mới được trang bị. Bên cạnh đó, việc sử dụng hạn chế các mẫu bậc chiều cao chuẩn không cung cấp chính xác về độ không bảo đảm đo. Điều này là do cách hiệu chuẩn đối với mỗi mẫu bậc chiều cao chỉ là một phép đo duy nhất được thực hiện bởi thiết bị.

Một vấn đề rất thường gặp với WLI là tính phi tuyến của thang đo z do bộ vi dịch chuyển điều khiển bằng PZT gây ra [87]. Khi thiết bị được chế tạo, bộ vi dịch chuyển cần được hiệu chuẩn bằng các kỹ thuật giao thoa ánh sáng [91]. Đối với người sử dụng, việc hiệu chuẩn thang đo trục z không thể thực hiện được bằng kỹ thuật giao thoa mà đòi hỏi một lượng lớn các mẫu chiều cao khác nhau trong phạm vi đo của thiết bị. Đây là hạn chế của việc hiệu chuẩn sử dụng các mẫu bậc chiều cao.

Các bước dịch chuyển dọc trong hệ thống WLI thường rất nhỏ, cỡ nanomet, được tạo ra bằng bộ vi dịch chuyển PZT khi cấp các mức điện áp khác nhau. Tuy nhiên, sự dịch chuyển của PZT phụ thuộc phi tuyến vào điện áp cung cấp, điều này làm cho việc mô hình hóa và điều khiển PZT trở nên rất khó khăn.

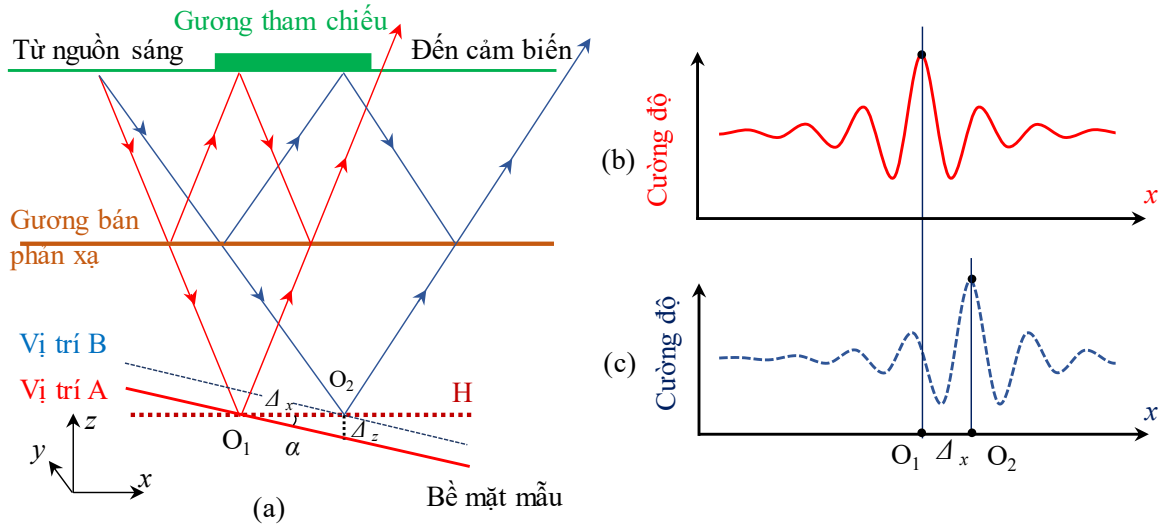
Cho đến nay, vẫn có nhiều công bố mới về kỹ thuật điều khiển dịch chuyển của PZT [1, 12, 151, 160, 165]. Những lượng dịch chuyển nhỏ của PZT thường được đo bằng các cảm biến thông qua các đại lượng đo trung gian như điện áp, điện dung, ... hoặc sử dụng kỹ thuật giao thoa ánh sáng theo sơ đồ giao thoa kế Michelson. Tuy nhiên, các phương pháp sử dụng cảm biến không đạt được độ chính xác mong muốn và cũng cần phải chuẩn hóa dịch chuyển bằng kỹ thuật giao thoa ánh sáng trước đó. Phương pháp đo dịch chuyển bằng giao thoa ánh sáng theo sơ đồ Michelson thường áp dụng cho những hệ có kích thước lớn nên cũng không phù hợp để đo dịch chuyển cho mô hình thiết bị thực nghiệm của chúng tôi.



Hình 3.20: Sơ đồ thí nghiệm khảo sát dịch chuyển của PZT

Do những khó khăn trên, chúng tôi đã đề xuất và thực hiện một kỹ thuật đo dịch chuyển mới để hiệu chuẩn thiết bị. Điều đặc biệt là kỹ thuật đo dịch chuyển này sử dụng chính hệ kính hiển vi WLI Mirau đã xây dựng, kết hợp với một mặt phẳng nghiêng mà không cần thêm thiết bị nào khác (Hình 3.20). Kỹ thuật này khác với các phương pháp giao thoa thông thường ở chỗ sự dịch chuyển dọc trục  $z$  được xác định bằng cách phân tích các hình ảnh WLI theo hướng ngang  $x$  (thay vì hướng  $z$ ) của một mặt phẳng nghiêng. Bằng cách phân

tích các hình ảnh giao thoa tại hai vị trí liên tiếp, vị trí cực đại của tín hiệu giao thoa và góc nghiêng của mẫu được xác định. Từ hai tham số này, lượng dịch chuyển dọc trục được xác định.



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 liên tiếp, (b) và (c) cường độ tín hiệu giao thoa theo hướng  $x$  của hai ảnh tại hai vị trí A và B tương ứng

Hình 3.21 biểu diễn nguyên lý đo dịch chuyển của PZT bằng xử lý ảnh vân giao thoa của mặt phẳng nghiêng tại hai vị trí liên tiếp. Gọi H là mặt phẳng ngang tại đó độ lệch quang trình bằng 0. Nếu mẫu đo là một mặt phẳng có vị trí trùng với mặt phẳng H, thì hình ảnh giao thoa thu được trên toàn bộ bề mặt cảm biến chỉ đồng nhất một màu sáng trắng (vân giao thoa bậc 0). Trong trường hợp này, chúng ta không thu nhận được thông tin hữu ích để xử lý. Do đó, chúng tôi đã đề xuất nghiêng bề mặt mẫu một góc nhỏ ( $\alpha$ ) so với mặt phẳng H quanh trục  $y$ . Bằng cách đó, cường độ của các mẫu giao thoa dọc theo trục  $x$  tuân theo biểu thức:

$$I(x) = I_0 + I_A e^{-\left(\frac{x-b}{c}\right)^2} \cos(2\pi f_x x + \phi), \quad (3.9)$$

Trong đó:  $I_0$  là thành phần không đổi của tín hiệu;  $I_A$  là biên độ;  $e^{-\left(\frac{x-b}{c}\right)^2}$  là hàm đường bao của hệ vân giao thoa, được giả thiết có dạng Gauss, với  $b$  là vị trí đỉnh,  $c$  liên quan đến độ rộng đường bao;  $f_x$  là tần số vân giao thoa theo trục  $x$ ,  $f_x = \frac{2 \cdot \tan(\alpha)}{\lambda_0}$  với  $\lambda_0$  là bước sóng trung tâm của nguồn sáng trong hệ WLI.

Khi vị trí tương đối của vật kính và mặt phẳng nghiêng được thay đổi theo chiều  $z$  bằng bộ dịch chuyển PZT từ vị trí (A) sang vị trí (B) thì hệ vân giao thoa bị dịch chuyển tương ứng theo chiều  $x$ , vị trí vân trung tâm sẽ thay đổi một lượng  $O_1O_2$ . Khi xác định được góc nghiêng  $\alpha$  (thông qua  $f_x$ ,  $\lambda_0$ ) và khoảng cách  $O_1O_2$  ta có thể tính lượng dịch chuyển theo công thức:

$$\Delta = O_1O_2 \tan(\alpha) = O_1O_2 \frac{f_x \lambda_0}{2} \quad (3.10)$$

Các vị trí vân trung tâm (đại diện bởi tham số  $b$ ) và góc nghiêng của mẫu (chứa trong tham số  $f_x$ ) được xác định bằng cách làm khớp tín hiệu giao thoa thực nghiệm theo chiều  $x$  với phương trình (3.9). Như vậy, với 2 hình ảnh vân giao thoa tương ứng với mỗi bước dịch chuyển, thông qua đánh giá sự thay đổi của vân giao thoa theo chiều  $x$  ta có thể xác định tần số vân và vị trí đỉnh vân giao thoa bậc 0, từ đó xác định được lượng dịch chuyển theo chiều  $z$ .

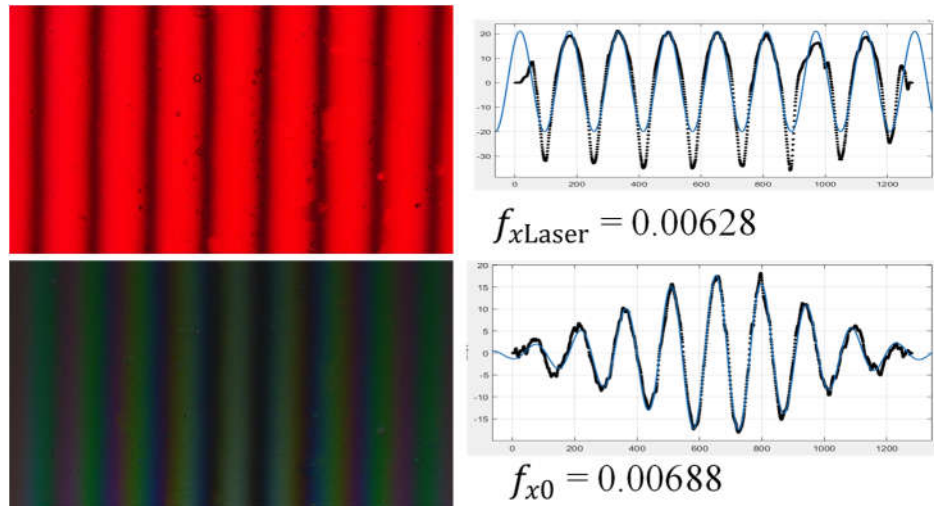
Bước sóng trung tâm cho một hệ thống WLI cụ thể có thể được xác định bằng các cách khác nhau. Các tác giả [111] đã đề xuất cách xác định bước sóng trung tâm của hệ WLI sử dụng thuật toán dịch pha nhiều bước (9 hoặc 11 bước). Tuy nhiên, phương pháp này không thể thực hiện được trong điều kiện thực nghiệm của chúng tôi. Do đó, chúng tôi đã xác định bước sóng trung tâm bằng cách so sánh tần số vân giao thoa theo trục  $x$  khi sử dụng nguồn sáng trắng và khi dùng nguồn sáng laser He-Ne (bước sóng 632,8 nm) đối với mẫu đo là một mặt phẳng nghiêng (Hình 3.20). Lúc này, tần số vân giao thoa và bước sóng của nguồn sáng có quan hệ như sau:



$$f_{x0} \cdot \lambda_0 = f_{xLaser} \cdot \lambda_{Laser} \quad (3.11)$$

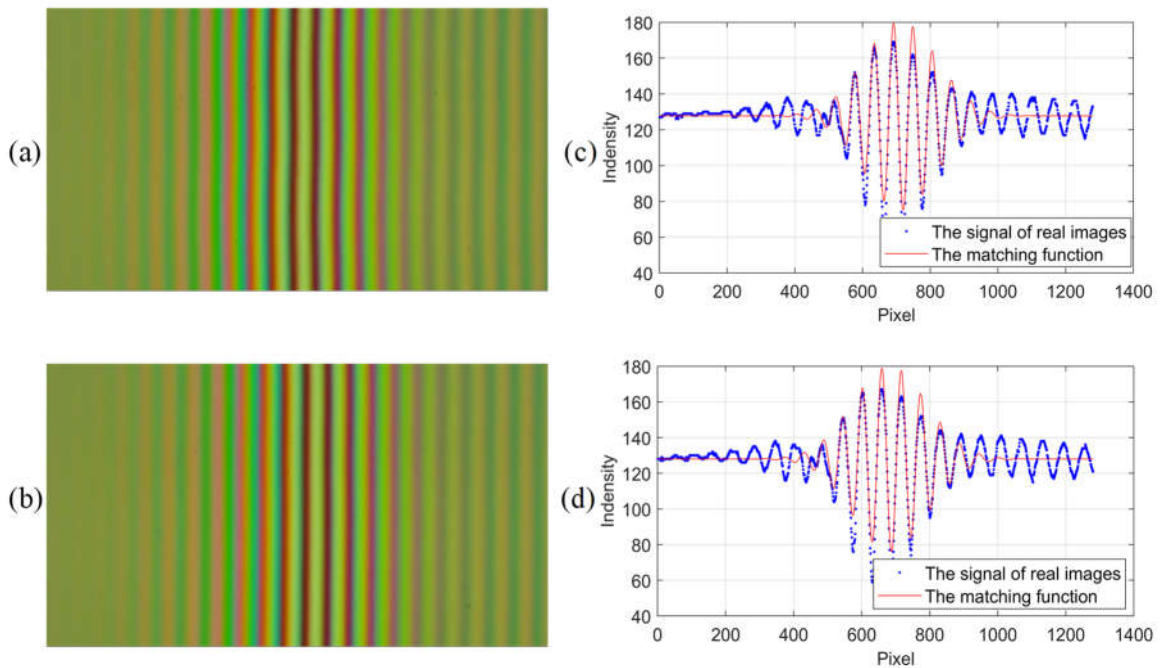
Trong đó,  $f_{x0}$  là tần số vân giao thoa theo chiều x khi sử dụng nguồn sáng trắng;  $f_{xLaser}$  là tần số vân giao thoa theo chiều x khi sử dụng nguồn laser He-Ne;  $\lambda_{Laser} = 632,8 \text{ nm}$  là bước sóng của laser He-Ne;

Tần số vân giao thoa được xác định thông qua việc làm khớp tín hiệu giao thoa thực nghiệm với phương trình (3.9). Hình 3.22 thể hiện kết quả tính toán tần số vân giao thoa theo trục x của cùng một mẫu mặt phẳng nghiêng. Từ việc so sánh này, chúng tôi xác định được bước sóng trung tâm của nguồn sáng trắng sử dụng trong mô hình WLI là  $\lambda_0 = 578 \text{ nm}$ .



Hình 3.22: Xác định tần số vân giao thoa theo trục x khi dùng nguồn sáng LED trắng và laser He-Ne với mẫu là mặt phẳng nghiêng.

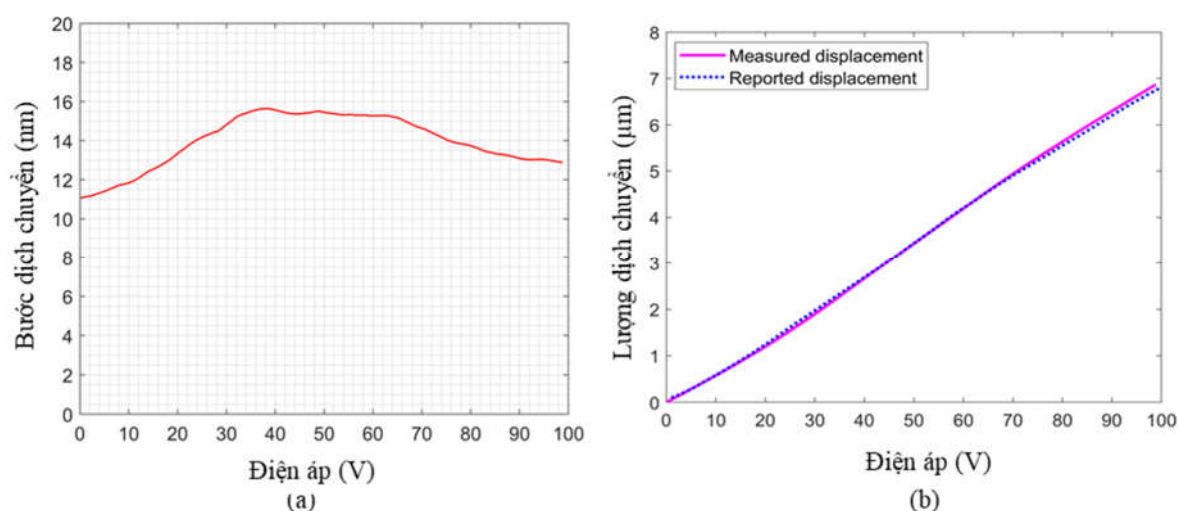
Theo phương pháp đo dịch chuyển đã đề xuất trên, chúng tôi đã khảo sát bộ vi dịch chuyển dùng gốm áp điện PK4DMP1 của Thorlab như đã trình bày ở Mục 3.1.2. PZT này có phạm vi dịch chuyển được hằng công bố là  $9,2 \mu\text{m}$  và được điều khiển bằng bộ K-Cube (Thorlab). Điện áp cung cấp cho mô đun dịch chuyển tăng dần từ 0 V đến 100 V với mỗi bước tăng 0,2 V. Với quá trình điều khiển như vậy, 500 hình ảnh giao thoa tương ứng với 500 vị trí khác nhau của mặt phẳng nghiêng được ghi lại.



Hình 3.23: (a), (b) hình ảnh vân giao thoa thu được ở vị trí A và B, (c), (d) cường độ giao thoa theo hướng x của ảnh vân giao thoa cho vị trí A và B và các đường cong làm khớp tương ứng

Hình 3.23 (a) và (b) là ảnh giao thoa điển hình được ghi lại tại hai vị trí A và B (trước và sau 1 bước dịch chuyển). Tín hiệu giao thoa theo hướng x (vuông góc với các vân giao thoa) và đường cong làm khớp (theo biểu thức (3.9)) được thể hiện trên Hình 3.23 (c) và (d). Từ kết quả làm khớp, tần số vân giao thoa, góc nghiêng và lượng dịch chuyển được xác định. Lần lượt tính toán lượng dịch chuyển giữa 500 hình ảnh giao thoa thu được khi tăng điện áp cung cấp cho PZT từ 0 V đến 100V, kết quả lượng dịch chuyển theo điện áp thu được như thể hiện trên Hình 3.24. Hình 3.24 (a) là bước dịch chuyển mỗi khi tăng điện áp 0,2 V, cho thấy giá trị của các bước dịch chuyển không phải là hằng số mà dao động trong khoảng từ 11 nm đến 16 nm đối với mức tăng điện áp 0,2 V. Khi điện áp thấp (khoảng 5 V), lượng dịch chuyển nhỏ khoảng 11 nm và tăng dần khi điện áp cung cấp tăng và đạt cực đại 16 nm ở 35 V. Lượng dịch chuyển ở mỗi bước duy trì ở giá trị này cho đến khoảng 60 V và giảm dần khi điện áp

lớn hơn 60 V và giảm xuống khoảng 13 nm ở 100 V. Rõ ràng, dịch chuyển của PZT phụ thuộc phi tuyến vào điện áp đặt lên nó, đó là tính phi tuyến vốn có của các PZT. Ảnh hưởng của sự phi tuyến này được hạn chế bằng cách khảo sát nhiều lần dịch chuyển của PZT theo các mức điện áp; kết quả được lập thành bảng lượng dịch chuyển của PZT theo điện áp và lưu vào phần mềm điều khiển để tự động bù trừ khi đo cấu trúc hình học 3D bề mặt.



Hình 3.24: (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.

Hình 3.24 (b) so sánh lượng dịch chuyển đo được từ thực nghiệm với công bố của nhà sản xuất theo mức điện áp cung cấp. Đường liền nét là kết quả khảo sát thực nghiệm, đường nét đứt là công bố của nhà sản xuất. Để thấy rõ hơn, các kết quả đo dịch chuyển và công bố của nhà sản xuất ứng với các mức điện áp cung cấp từ 10 V đến 100 V được trình bày trong Bảng 3.3. Có thể thấy rằng kết quả khảo sát dịch chuyển của PZT phù hợp tốt với dữ liệu được cung cấp bởi nhà sản xuất (sai khác lớn nhất có thể xác định là 2% ở mức điện áp cung cấp khoảng 90 V).

*Bảng 3.3: Lượng dịch chuyển của PZT ở các mức điện áp khác nhau*

Điện áp cung cấp (V)	Lượng dịch chuyển hăng công bố ( $\mu\text{m}$ )	Lượng dịch chuyển đo được ( $\mu\text{m}$ )	Sai lệch ( $\mu\text{m}$ )
10	0.52	0.53	0.01
20	1.17	1.14	0.03
30	1.90	1.84	0.06
40	2.61	2.61	0.00
50	3.36	3.37	0.01
60	4.13	4.13	0.00
70	4.83	4.89	0.05
80	5.48	5.59	0.10
90	6.13	6.26	0.13
100	6.76	6.88	0.12

Như vậy, chúng tôi đã thực hiện được việc hiệu chỉnh dịch chuyển dọc trục cho hệ thống thực nghiệm được xây dựng. Việc hiệu chỉnh này được thực hiện bằng chính hệ thống thí nghiệm của chúng tôi kết hợp với sử dụng một mặt phẳng nghiêng. Ý tưởng trung tâm của kỹ thuật này là sử dụng bề mặt phẳng nghiêng để tạo ra hình ảnh WLI và phân tích tín hiệu cường độ giao thoa của hai hình ảnh giao thoa liên tiếp theo hướng x để xác định lượng dịch chuyển theo hướng z. Đáng chú ý là kỹ thuật này không đòi hỏi sử dụng bất kỳ cảm biến dịch chuyển nào khác. Kỹ thuật đo lường này hoàn toàn có thể áp dụng để đo lường vị trí vi mô có độ chính xác cao, không chỉ trong khảo sát PZT mà còn trong đo biến dạng hoặc các dịch chuyển nhỏ khác. Kết quả này đã được công bố trong bài báo [119].

### 3.3.3. Tần số cắt của mô hình thiết bị

Tần số cắt của thiết bị WLI là một yếu tố quan trọng xác định tần số không gian lớn nhất mà thiết bị có thể phát hiện. Trong hệ thống WLI có hai tần số cắt ảnh hưởng đến thiết bị gồm tần số cắt quang học và tần số cắt của dụng cụ.

Tần số cắt quang học xác định tần số không gian lớn nhất của hệ thống quang học. Tần số cắt quang học bị giới hạn bởi khẩu độ số của vật kính hiển vi. Để tính toán tần số cắt quang học của thiết bị, thông tin cần thiết là bước sóng ánh sáng và khẩu độ số của vật kính hiển vi. Tần số cắt quang học được rút ra từ tiêu chuẩn Sparrow [61]:

$$f_{optical} = \frac{NA}{0,47\lambda} \quad (3.12)$$

Mô hình thiết bị WLI sử dụng nguồn sáng LED trắng có phổ rộng, bước sóng trung tâm  $\lambda_0 = 578$  nm [Hình 3.13 (a)]. Tần số cắt quang học của hệ thống tương ứng với vật kính hiển vi 20X, NA = 0,4 tính toán theo biểu thức (3.12) là:  $1,47 \mu\text{m}^{-1}$ . Như vậy, khoảng cách ngang nhỏ nhất giữa hai điểm trên mẫu đo mà hệ thống quang học có thể phân biệt được là  $0,68 \mu\text{m}$ .

Tần số cắt dụng cụ là giới hạn tối đa của tần số không gian do cảm biến ảnh gây ra. Điều quan trọng cần đạt được là tần số cắt dụng cụ phải lớn hơn hoặc bằng tần số cắt quang học mới tận dụng được hết khả năng của hệ thống quang học. Mặt khác, tần số cắt dụng cụ không phụ thuộc vào NA và bước sóng hoạt động. Nó phụ thuộc vào độ phóng đại của hệ thống quang học và số pixel của cảm biến ảnh. Vì lý do này, tần số cắt dụng cụ có thể khác nhau ngay cả khi hai thiết bị sử dụng vật kính hiển vi có NA bằng nhau. Tần số cắt dụng cụ được tính theo công thức:

$$f_{inst} = \frac{N_x}{FOV_x \times 2} \quad (3.13)$$

trong đó,  $N_x$  là số điểm ảnh theo chiều x,  $FOV_x$  thị giới theo chiều x. Hệ số 2 ở dưới mẫu là do theo lý thuyết Nyquist, cần ít nhất 2 điểm ảnh để ghi lại ảnh vân giao thoa. Đối với hệ thí nghiệm đã xây dựng, tổng số điểm ảnh theo hướng x và y là 1280 pixel và 720 pixel, kích thước điểm ảnh là  $4,82 \mu\text{m}$ . Trong khi đó, thị giới chiều x và y của hệ thống khi sử dụng vật kính hiển vi 20X có kích thước tương ứng là  $308 \mu\text{m}$  và  $173 \mu\text{m}$ . Như vậy, tần số cắt dụng cụ theo hướng x và y có thể tính toán được là:  $2,08 \mu\text{m}^{-1}$  (lớn hơn tần số cắt quang học của thiết bị). Kết quả tính toán này cho thấy, các thành phần đã được lựa chọn là thích hợp để xây dựng mô hình thiết bị. Với các thành phần này, hệ thống tạo ảnh tận dụng được tối đa khả năng phân giải của hệ thống quang học.

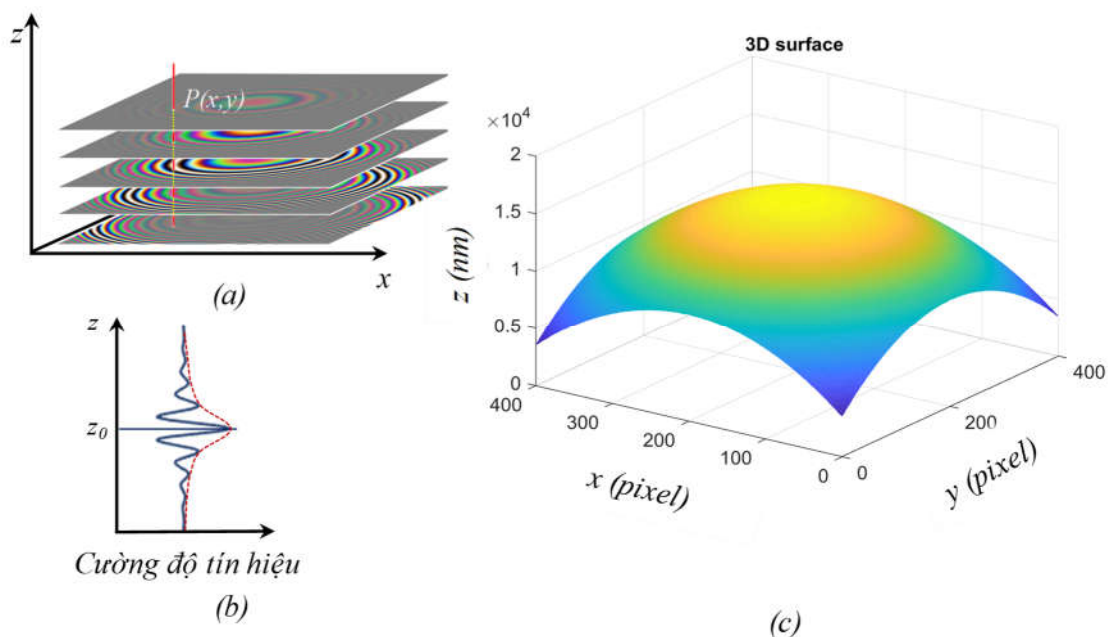
### **3.4. Phát triển kỹ thuật xử lý tín hiệu WLI**

Để trích xuất thông tin chiều cao của các điểm trên bề mặt cần phải xử lý tín hiệu ảnh giao thoa một cách hiệu quả. Phương pháp xử lý phổ biến được áp dụng trong nhiều thiết bị là phương pháp ước lượng pha (Mục 2.5.3) và phương pháp xử lý trong miền tần số (Mục 2.5.5). Các phương pháp này thực sự có hiệu quả khi chất lượng tín hiệu giao thoa tốt nhưng lại khó áp dụng khi tín hiệu giao thoa bị nhiễu. Do đó, chúng tôi đề xuất kết hợp phương pháp tìm cực đại với kỹ thuật làm khớp tín hiệu giao thoa với hàm lý thuyết để xử lý tín hiệu giao thoa khi chất lượng hình ảnh giao thoa thấp. Nhờ đó tận dụng được tốc độ nhanh của phương pháp cực đại tín hiệu và độ chính xác của phương pháp làm khớp.

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

Sau khi thu nhận được một loạt hình ảnh WLI tại các vị trí dịch chuyển khác nhau, các thuật toán cần được sử dụng để trích xuất thông tin chiều cao bề mặt. Quá trình xử lý tín hiệu tổng thể được minh họa ở sơ đồ trên Hình 3.25. Đầu tiên, tín hiệu giao thoa được trích xuất từ tập hợp các hình ảnh giao thoa đã thu nhận. Tiếp theo, các phương pháp xử lý WLI được áp dụng đối với từng

điểm ảnh để tìm ra vị trí ZOPD ( $z_0$ ). Như đã trình bày ở Mục 2.5, một số phương pháp xử lý đã được áp dụng là: phương pháp xác định đường bao biên điều [51, 132], phương pháp trọng tâm [6, 57], phương pháp giá trị cực đại, phương pháp ước lượng pha [15, 71], phương pháp phân tích trong miền tần số [41, 47, 48]. Sau bước này, tọa độ đám mây điểm thể hiện cấu trúc hình học 3D bề mặt được tạo ra. Các thông số của bề mặt như hình dạng, độ sáng, độ nhám... được trích xuất từ dữ liệu 3D này.



Hình 3.25: (a) Các hình ảnh giao thoa được ghi lại theo các vị trí  $z$ . (b) Tín hiệu WLI tại điểm  $P(x,y)$ , (c) Cấu trúc hình học bề mặt tái tạo từ kỹ thuật xử lý WLI

Ngoài những phương pháp trên, luận án đề xuất phương pháp làm khớp tín hiệu giao thoa với hàm lý thuyết để truy xuất độ cao bề mặt. Cơ sở của phương pháp này như sau:

Do hệ thống WLI sử dụng ánh sáng có độ dài kết hợp thấp, tín hiệu giao thoa chỉ xuất hiện trong phạm vi rất hẹp quanh vị trí có hiệu quang trình giữa hai nhánh giao thoa bằng 0 (ZOPD) và tuân theo phương trình sau [103, 150]:

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

trong đó,  $I_B$  là cường độ nền;  $\gamma$  là độ tương phản vân;  $l_c$  là độ dài kết hợp của nguồn sáng;  $z$  là vị trí quét dọc theo trục quang;  $\lambda_0$  là bước sóng trung tâm của nguồn sáng;  $z_0$  là vị trí dọc theo hướng quét trong đó đường bao của tín hiệu WLI là cực đại; và  $\varphi$  là độ lệch pha giữa các chùm sáng tham chiếu và chùm sáng phản xạ từ mẫu đo. Khác với phương trình (2.7) được xây dựng từ bản chất vật lý của quá trình hình thành tín hiệu giao thoa, phương trình (3.14) là phương trình thực nghiệm đơn giản thể hiện sát nhất tín hiệu giao thoa thu được từ thiết bị.

Nhiệm vụ trung tâm của việc xử lý dữ liệu WLI là xác định được vị trí ZOPD để lấy thông tin chiều cao các điểm trên bề mặt mẫu đo. Như vậy, cấu trúc hình dạng 3D của bề mặt được xác định bởi tập hợp các giá trị  $z_0$ , tức là vị trí đỉnh của tín hiệu giao thoa. Nếu xây dựng được hàm số khớp nhất với dữ liệu tín hiệu WLI đã thu được, ta hoàn toàn trích xuất được thông tin chiều cao bằng cách tìm đỉnh của hàm đó. Ngày nay, với sự phát triển của máy tính, việc làm khớp dữ liệu đo với hàm lý thuyết được thực hiện đơn giản theo thuật toán bình phương tối thiểu. Trong luận án này, công cụ làm khớp trong Matlab được sử dụng (Phụ lục II).

Hàm làm khớp được xây dựng theo phương trình (3.14) trong Matlab như sau:  $f(x) = DC + A * (\exp(-(x-b)*(x-b)/c)) * \cos(2 * \pi * f * x + (\phi * 180 / (\pi)))$

Trong đó, các tham số cần tìm gồm:

DC: Thành phần không đổi của dữ liệu, tương ứng với cường độ nền;

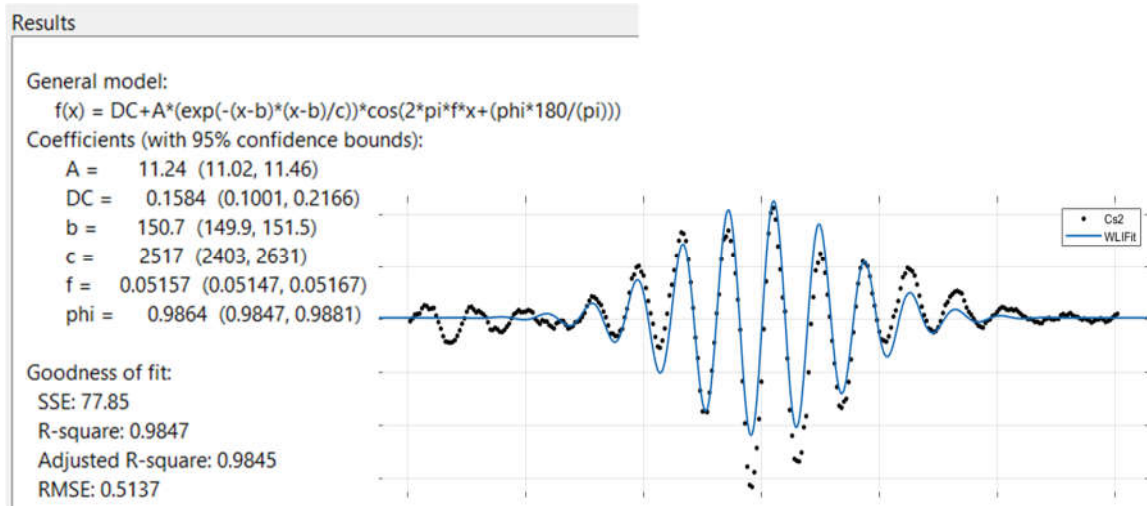
A: Biên độ tín hiệu, tương ứng với  $\gamma I_B$  trong biểu thức (3.14);

b: Vị trí đỉnh đường bao, tương ứng với  $z_0$ ;

c: Giá trị liên quan đến độ rộng đường bao, tương ứng với  $l_c^2$ ;

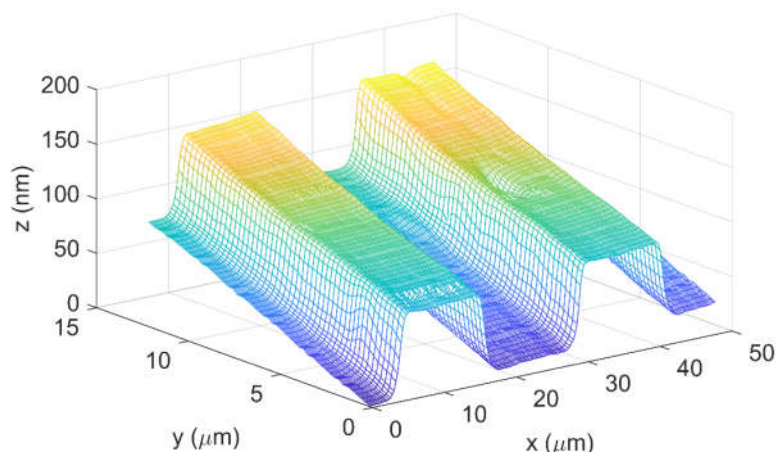


phi: Lượng lệch pha khi ánh sáng phản xạ trên bề mặt mẫu, tương ứng với  $\varphi$  (tính bằng rad).

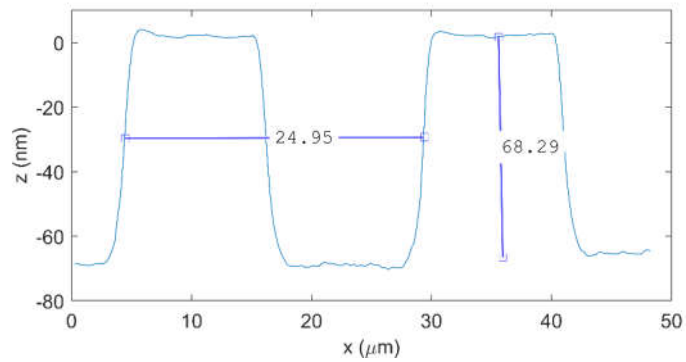


Hình 3.26: Ví dụ về làm khớp tín hiệu WLI

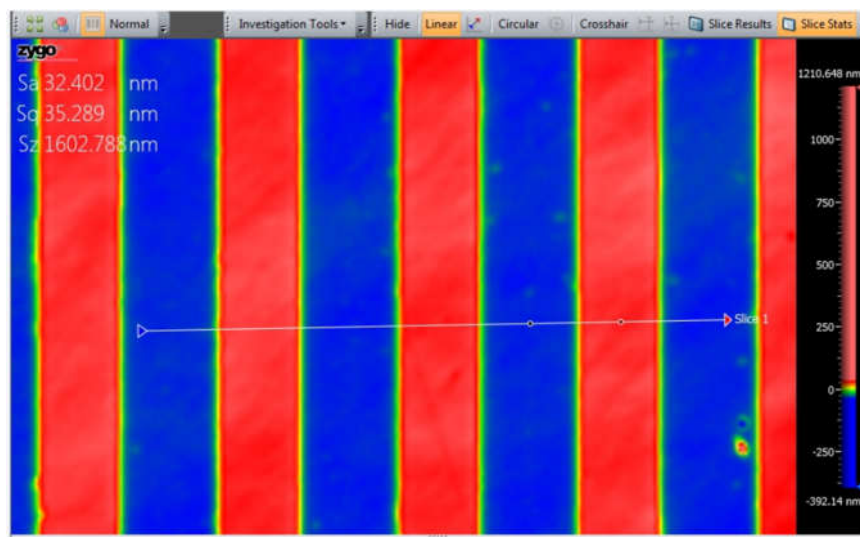
Hình 3.26 thể hiện tín hiệu WLI đo được tại một điểm ảnh (đường chấm) và đường cong làm khớp (đường liền nét). Trong kỹ thuật làm khớp này, toàn bộ dữ liệu của tín hiệu giao thoa đều được sử dụng trong tính toán nên đạt được độ chính xác cao và khả năng chống nhiễu rất tốt. Từ kết quả làm khớp tín hiệu, chúng ta không những xác định được đỉnh của tín hiệu giao thoa mà còn xác định được đường bao tín hiệu, tần số vân, pha... như các kỹ thuật xử lý khác.



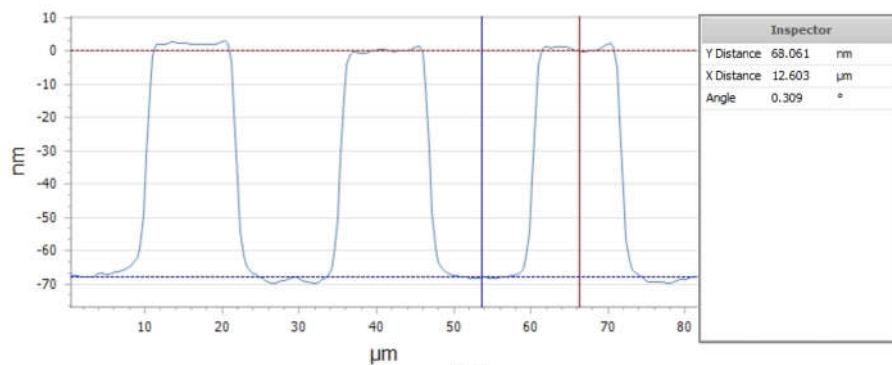
Hình 3.27: Cấu trúc hình học 3D của bề mặt một khu vực nhỏ của cách tử Ronchi 40 vạch/mm được tái tạo bằng kỹ thuật làm khớp tín hiệu WLI



Hình 3.28: Biên dạng 2D của bề mặt cách tử Ronchi đo được khi áp dụng kỹ thuật làm khớp tín hiệu WLI



(a)



(b)

Hình 3.29: (a) Biểu đồ màu thể hiện nhấp nhô bề mặt, (b) Biên dạng 2D của cách tử Ronchi 40 vạch/mm được đo bằng máy giao thoa kế ánh sáng trắng ZeGage của hãng Zygo.

Xác định đỉnh của tất cả các đường cong làm khớp của toàn bộ các điểm ảnh, chúng ta thu được tọa độ 3D của các điểm trên bề mặt cần đo. Chúng tôi đã áp dụng kỹ thuật làm khớp tín hiệu WLI nêu trên để đo và tái tạo cấu trúc hình học 3D bề mặt cách tử Ronchi 40 vạch/mm của công ty Edmund Industrial Optics. Do tốc độ xử lý bằng kỹ thuật này khá chậm nên chỉ một khu vực nhỏ ( $50 \text{ pixel} \times 200 \text{ pixel}$ ) được tái tạo. Hình 3.27 và Hình 3.28 thể hiện cấu trúc hình học 3D và 2D của bề mặt cách tử đã được đo bằng mô hình thiết bị mà chúng tôi xây dựng và được tái tạo bằng kỹ thuật làm khớp như trên. Trên Hình 3.29 là kết quả đo bề mặt cách tử này bằng máy đo biên dạng 3D quang học ZeGage, một hệ thống WLI thương mại của hãng Zygo (Mỹ). Theo thông số của nhà sản xuất cung cấp, độ rộng của mỗi cặp vạch là  $25 \mu\text{m}$ . Kết quả đo bằng mô hình thiết bị của chúng tôi là  $24,95 \mu\text{m}$ , và bằng thiết bị ZeGage là  $25,206 \mu\text{m}$  (sai lệch 1%). Chiều cao của vạch cách tử xác định được bằng mô hình thiết bị là  $68,29 \text{ nm}$ , bằng máy ZeGage là  $68,06 \text{ nm}$  (sai lệch 0,3%). Các kết quả cho thấy kỹ thuật xử lý cũng như mô hình thiết bị đo mà chúng tôi xây dựng đã hoạt động tốt, cho kết quả phù hợp tốt với thiết bị đo thương mại.

Ưu điểm lớn nhất của kỹ thuật làm khớp là khả năng xử lý tín hiệu WLI có nhiễu lớn, phù hợp với hệ thống thực nghiệm của luận án và trong các trường hợp không yêu cầu cao về điều kiện đo. Tuy nhiên, hạn chế của kỹ thuật này là tốc độ xử lý chậm.

### **3.4.2. Tái tạo biên dạng bề mặt sử dụng phối hợp phương pháp tìm 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, luận án 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 tìm cực đại.

Theo phương trình (3.14), đỉnh của hai cực đại liên tiếp trong tín hiệu giao thoa cách nhau một khoảng  $\lambda_0/2$ . Do ảnh hưởng của độ lệch pha khác nhau khi ánh sáng phản xạ trên bề mặt mẫu và ảnh hưởng của nhiễu nên việc xác định đỉnh của tín hiệu giao thoa theo phương pháp tìm cực đại tín hiệu gặp khó khăn, có thể xảy ra sự nhầm lẫn giữa hai cực đại gần nhau gây ra sai số  $\lambda_0/2$  [55]. Xét một bề mặt liên tục (bề mặt nhẵn), hai điểm cạnh nhau có độ cao  $z$  thỏa mãn điều kiện:  $|z(x, y + 1) - z(x, y)| < \frac{\lambda_0}{2}$ . Lợi dụng tính chất này, chúng tôi phát triển một thuật toán xác định nhanh vị trí ZOPD trên nền nhiễu lớn bằng cách sử dụng kết hợp thuật toán tìm cực đại tín hiệu với kỹ thuật làm khớp tín hiệu giao thoa.

**Thuật toán được đề xuất gồm các bước sau:**

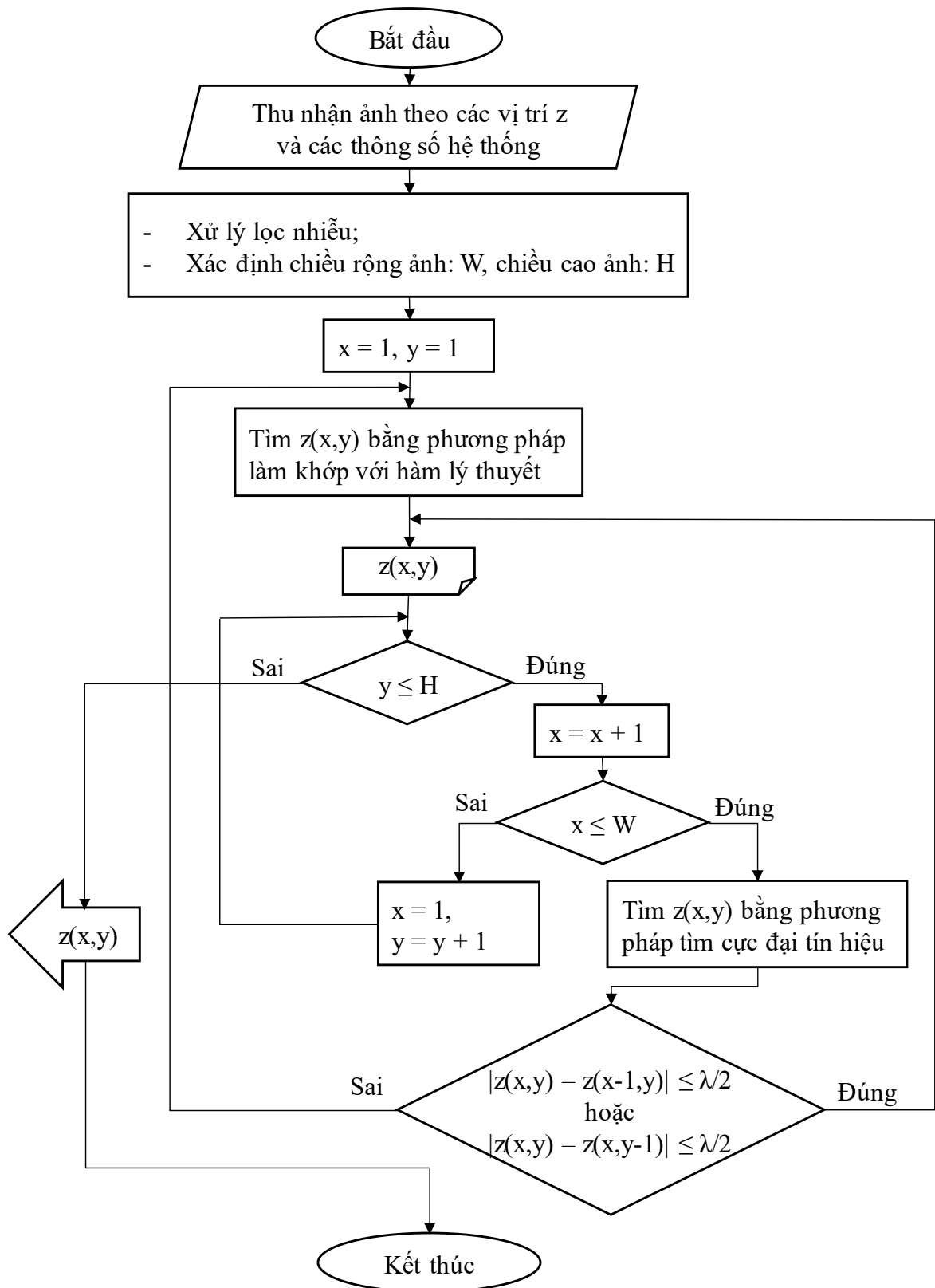
Bước 1: Thu nhận tín hiệu giao thoa tại mỗi điểm ảnh theo trục  $z$  và các thông số hệ thống.

Bước 2: Xử lý lọc nhiễu (trừ tín hiệu giao thoa này với thành phần không đổi của tín hiệu để loại bỏ ảnh hưởng của điều kiện đo ở các thời điểm khác nhau).

Bước 3: Xác định vị trí cực đại  $z(x, y)$  của tín hiệu WLI

Ở vị trí đầu tiên ( $x = 1, y = 1$ ), tín hiệu được xử lý bằng phương pháp làm khớp để xác định vị trí cực đại  $z(1,1)$  chính xác.

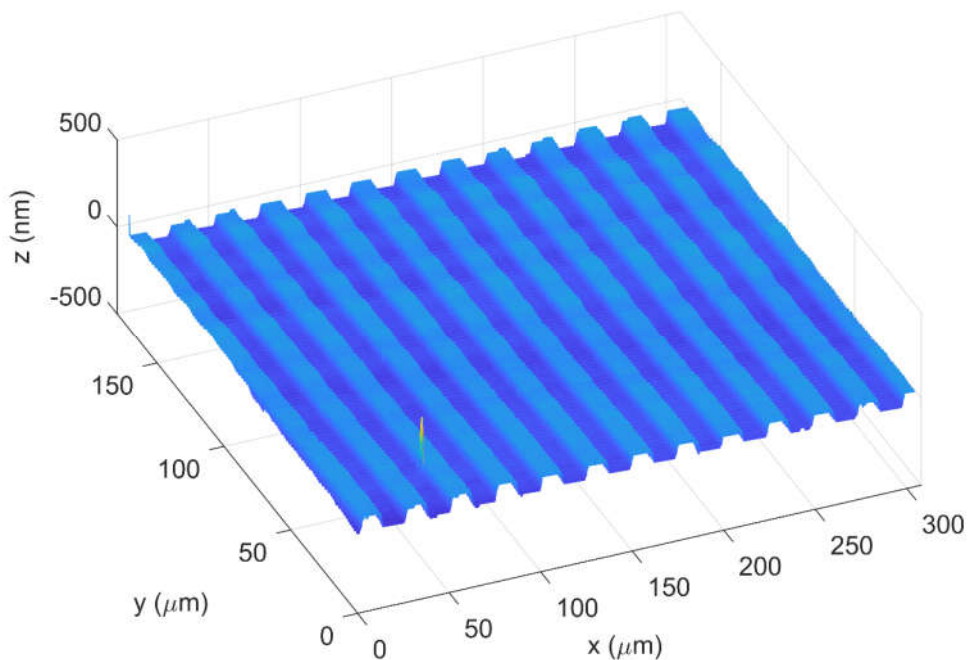
Ở vị trí lân cận tiếp theo: Để tăng tốc độ xử lý, phương pháp tìm cực đại tín hiệu được áp dụng. Sau đó, kiểm tra nếu  $|z(x, y + 1) - z(x, y)| < \frac{\lambda_0}{2}$  thì vị trí cực đại được xác nhận, nếu  $|z(x, y + 1) - z(x, y)| \geq \frac{\lambda_0}{2}$  thì vị trí cực đại sẽ được xác định lại bằng phương pháp làm khớp với phương trình lý thuyết tương tự đối với vị trí đầu tiên.



Hình 3.30: Lưu đồ thuật toán xử lý ảnh WLI kết hợp tìm cực đại với làm khớp

Tiếp tục lặp lại bước 3 để xác định độ cao  $z$  của tất cả các vị trí  $(x, y)$  ta nhận được cấu trúc hình học 3D của bề mặt chi tiết. Hình 3.30 thể hiện lưu đồ thuật toán xử lý ảnh WLI đã đề xuất.

Thuật toán này được áp dụng để tái tạo biên dạng bề mặt của cách tử Ronchi 40 vạch/mm trên toàn bộ thị giới của hệ (1280 pixel x 720 pixel). Hình 3.31 thể hiện kết quả tái tạo biên dạng 3D của bề mặt cách tử. Từ biên dạng này có thể trích xuất các thông số về độ cao, khoảng cách giữa các vạch. Kết quả thử nghiệm hai kỹ thuật xử lý cũng cho thấy: với cùng một tập hợp 500 ảnh giao thoa (kích thước vùng ảnh xử lý  $50 \text{ pixel} \times 200 \text{ pixel}$ ) và cùng điều kiện tính toán, thời gian để xử lý và tái tạo bề mặt bằng kỹ thuật kết hợp nhanh hơn 2650 lần so với kỹ thuật làm khớp.



*Hình 3.31: Cấu trúc hình học 3D của bề mặt cách tử Ronchi 40 vạch/mm được tái tạo từ kỹ thuật kết hợp tìm cực đại với làm khớp*

Như vậy, tốc độ xử lý được cải thiện rất nhiều khi kết hợp hai kỹ thuật trên. Kỹ thuật tái tạo cấu trúc hình học 3D bề mặt sử dụng phối hợp phương pháp tìm cực đại và phương pháp làm khớp tín hiệu WLI đã được chúng tôi

công bố trong bài báo [118]. Các kết quả thực nghiệm trình bày trong Chương 4 sau đây đều sử dụng kỹ thuật kết hợp này để xử lý tín hiệu giao thoa.

### 3.5. Kết luận chương 3

Chương 3 đã đạt được những kết quả chính sau:

- Đã phân tích, tính toán và lựa chọn các thành phần chức năng và từ đó xây dựng thành công một mô hình thiết bị hiển vi WLI sử dụng vật kính Mirau có thông số cơ bản sau: 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  $1,47 \mu\text{m}^{-1}$ . Hệ vi dịch chuyển sử dụng gốm áp điện PZT có phạm vi dịch chuyển khoảng 7000 nm, sai số lớn nhất trong phạm vi dịch chuyển là 2%, bước dịch chuyển nhỏ nhất cỡ 10 nm đã được thiết kế, chế tạo thành công.

- Đã phát triển mô hình toán học có tính đến ảnh hưởng khác nhau của các thành phần màu và độ nhạy của cảm biến; trên cơ sở đó thực hiện thành công việc mô phỏng các hình ảnh giao thoa và hoạt động của thiết bị.

- Đã đề xuất phương pháp và thực hiện hiệu chuẩn trục ngang, trục dọc cho mô hình thiết bị WLI. Đặc biệt đã đề xuất và áp dụng phương pháp mới để hiệu chuẩn trục dọc cho hệ thống WLI.

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

Mô hình thiết bị được xây dựng, bao gồm cả phần cứng và phần mềm, đã hoạt động đúng, kết quả đo thử nghiệm trên mẫu chuẩn là cách tử Ronchi thương mại phù hợp với kết quả đo đối chứng trên thiết bị ZeGage của hãng Zygo.

## **Chương 4**

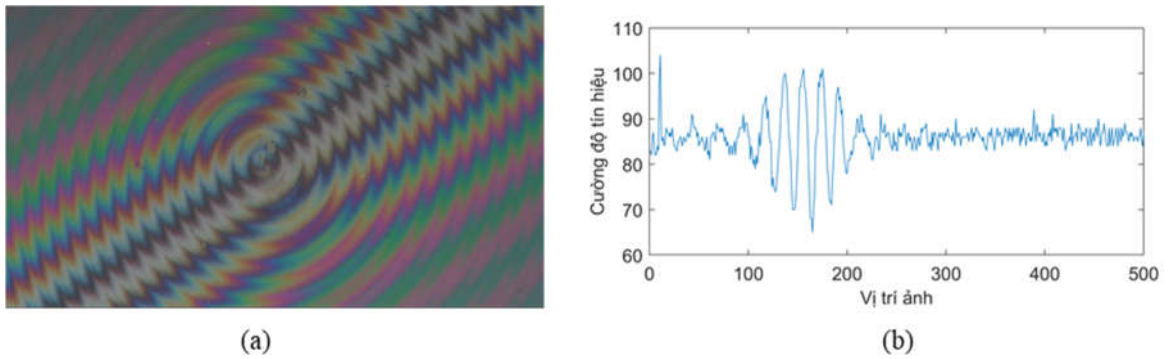
### **MỘT SỐ KẾT QUẢ ĐO CẤU TRÚC HÌNH HỌC 3D BỀ MẶT SỬ DỤNG MÔ HÌNH THIẾT BỊ**

Trên cơ sở các kết quả đã đạt được ở Chương 3, chương này sẽ ứng dụng mô hình thiết bị 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. Đầu tiên, mô hình thiết bị đã xây dựng được sử dụng để thu nhận hình ảnh WLI của một số bề mặt chi tiết quang, cơ. Những hình ảnh WLI này sau đó được xử lý để trích xuất thông tin về cấu trúc hình học 3D bề mặt.

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

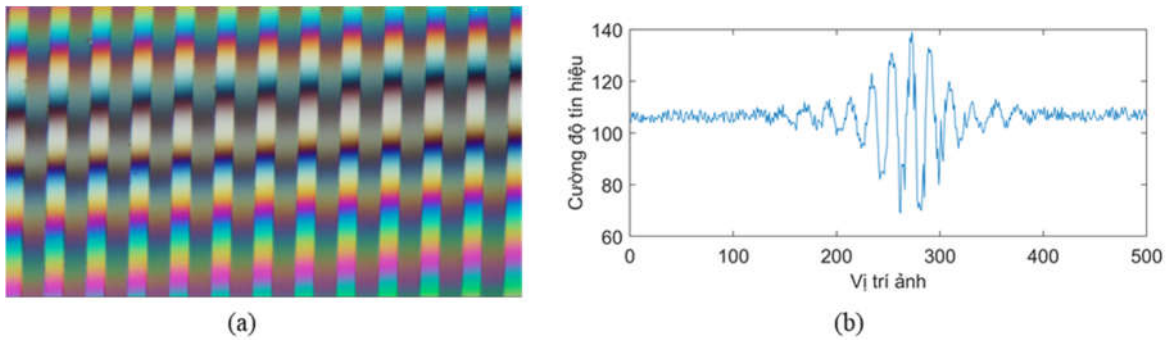
Chúng tôi đã sử dụng mô hình thiết bị WLI đã xây dựng để quan sát bề mặt của một số mẫu chi tiết quang, cơ chính xác. Tùy thuộc vào cấu trúc hình học 3D bề mặt, vật liệu chế tạo mà hình ảnh và tín hiệu giao thoa thu được sẽ khác nhau về cường độ và độ tương phản giữa vân trung tâm và nền. Một số hình ảnh và tín hiệu WLI mà chúng tôi nhận được từ hệ thống thực nghiệm thể hiện trên các Hình 4.1, Hình 4.2, Hình 4.3, Hình 4.4. Hình ảnh vân giao thoa thu được phản ánh đúng tính chất đặc trưng điển hình của cấu trúc hình học bề mặt mẫu đo. Cụ thể, Hình 4.1 (a) cho thấy hình ảnh các vết dao tiện để lại trên bề mặt. Hình 4.2 (a) cho thấy cấu trúc thẳng, tuần hoàn của các vạch cách tử. Hình 4.3 (a) cho thấy cấu trúc hình học bề mặt của một chòm cầu thông qua các vân giao thoa tròn, đồng tâm có tần số tăng dần từ đỉnh cầu ra biên. Hình 4.4 (a) cho thấy các vết xước trên bề mặt mẫu do phương pháp gia công để lại.





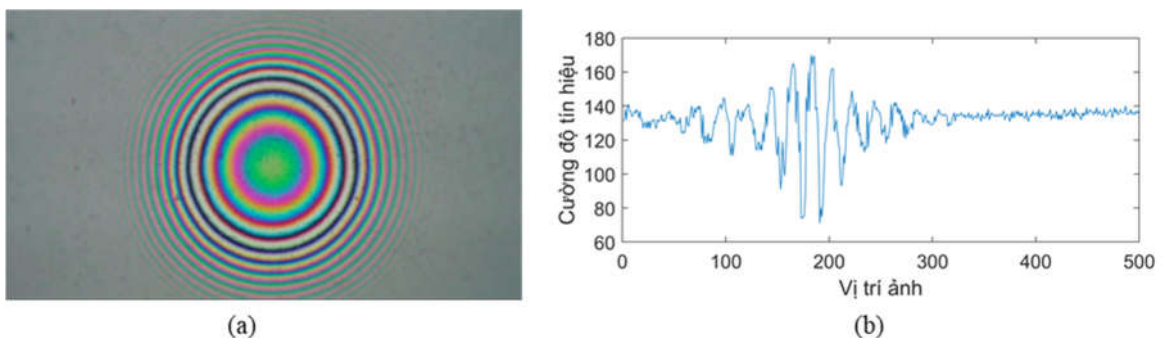
Hình 4.1: (a) Hình ảnh giao thoa của mẫu mặt nạ pha gia công theo phương pháp tiện siêu chính xác bằng mũi kim cương trên vật liệu nhựa PMMA.

(b) Tín hiệu giao thoa của một điểm ảnh.

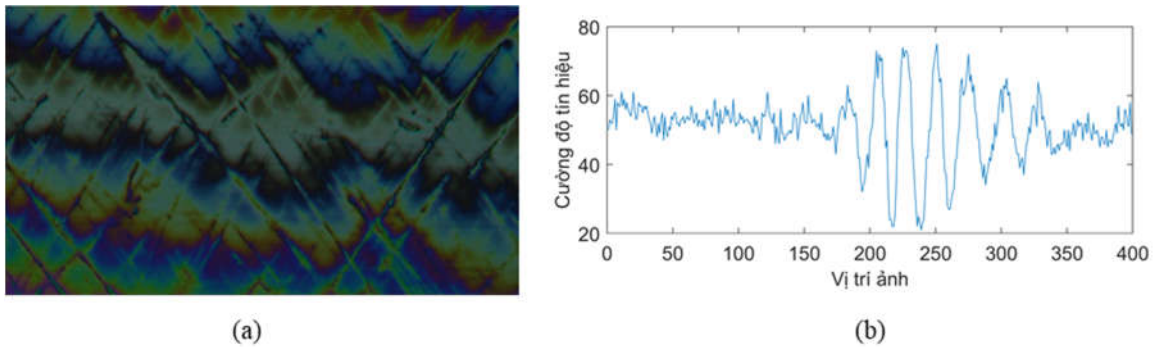


Hình 4.2: (a) Hình ảnh giao thoa của mẫu cách tử Ronchi 40 vạch/mm.

(b) Tín hiệu giao thoa của một điểm ảnh.



Hình 4.3: (a) Hình ảnh giao thoa của mẫu bề mặt viên bi kim loại trên vòng đo của cầu ké. (b) Tín hiệu giao thoa của một điểm ảnh.

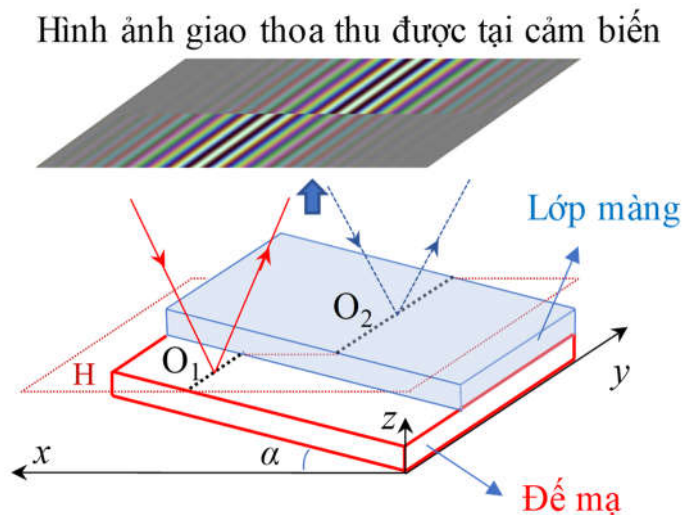


Hình 4.4: (a) Hình ảnh giao thoa của bề mặt mẫu chuẩn độ nhám N3-Flat lapping. (b) Tín hiệu giao thoa của một điểm ảnh.

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

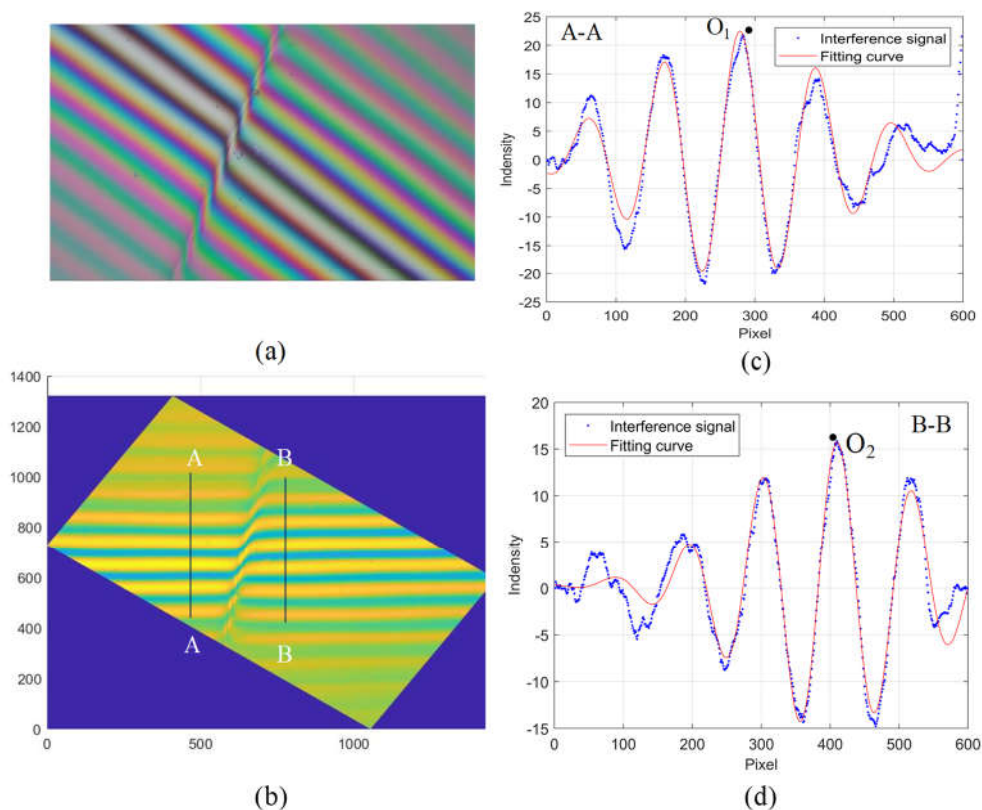
### 4.2.1. Đo chiều dày màng mỏng quang học sử dụng một hình ảnh WLI

Các kỹ thuật xử lý được trình bày và đề xuất trước đây đều cho kết quả là cấu trúc hình học 3D của bề mặt. Từ dữ liệu 3D này, các thông số khác được trích xuất. Tuy nhiên, trong một số trường hợp ta chỉ cần xác định một vài thông số nào đó như độ cao bề mặt bậc, chiều dày lớp màng... Khi đó, không nhất thiết phải xử lý toàn bộ dữ liệu WLI đã thu nhận. Mục này đề xuất một phương pháp mới để đo chiều dày lớp màng quang học bằng thiết bị WLI.



Hình 4.5: Sơ đồ nguyên lý xử lý một ảnh để tính độ dày lớp màng

Hình 4.5 thể hiện nguyên lý xử lý một ảnh WLI để tính độ dày màng. Phương pháp xử lý ảnh tương tự phương pháp khảo sát lượng dịch chuyển đã trình bày ở Chương 3. Thông tin chiều cao ( $z$ ) được xác định thông qua lượng dịch ngang của vân giao thoa trung tâm. Độ dày màng được tính toán từ thông tin vị trí đỉnh của hai hệ vân giao thoa  $O_1O_2$  và góc nghiêng ( $\alpha$ ) của mẫu. Điểm khác biệt so với việc đo dịch chuyển là hai hệ vân giao thoa cùng nằm trên một ảnh WLI duy nhất. Như thể hiện ở Hình 4.5, mẫu đặt nghiêng một góc ( $\alpha$ ) nên vị trí  $O_1$ ,  $O_2$  là hai vị trí có cùng độ cao và vân sáng trung tâm trên hình ảnh WLI thu được sẽ đi qua hai vị trí này. Qua xử lý hình ảnh, khoảng cách các vân giao thoa trung tâm và góc nghiêng được xác định, từ đó tính toán được độ dày màng mỏng.



Hình 4.6: (a) Hình ảnh WLI thu được tại biên lớp màng mỏng (b) Hình ảnh WLI đã được xoay để lấy mẫu, (c), (d) Tín hiệu giao thoa và đường cong làm khớp của các đường AA và BB

Hình 4.6 (a) là hình ảnh WLI thu nhận được tại biên của lớp màng. Trong thực tế hình ảnh giao thoa thường bị nghiêng so với trục x, y (tức là vân giao thoa không song song với trục x hoặc y). Do đó, để xác định được độ dày màng theo phương pháp này ta phải tiến hành xác định hướng của vân giao thoa trên mặt phẳng x,y. Kỹ thuật này được thực hiện đơn giản thông qua xác định phương của vân sáng trung tâm và xoay ảnh [3], như thể hiện ở Hình 4.6 (b). Hình 4.6 (c), (d) thể hiện tín hiệu giao thoa thu được từ thực nghiệm và đường cong làm khớp để xác định vị trí các vân trung tâm và góc nghiêng của mẫu đo.

*Bảng 4.1: Kết quả đo độ dày màng,  $d = 338 \pm 7$  nm*

Lần đo	Chiều dày màng (nm)	Lần đo	Chiều dày màng (nm)
1	336	6	330
2	328	7	337
3	345	8	347
4	333	9	346
5	336	10	345
Trung bình (nm)		<b>338</b>	
Độ lệch chuẩn (nm)		<b>7</b>	

Để kiểm chứng phương pháp đo, một mẫu màng mỏng đơn lớp  $MgF_2$  được phủ trên đế thủy tinh K8 bằng kỹ thuật E-Beam trên máy Univex 400 (hãng Leybold) được sử dụng làm mẫu đo. Độ dày màng được đo bằng thiết bị Alpha Step D500 cho kết quả  $338 \pm 88$  nm. Áp dụng kỹ thuật đo đã đề xuất trên với 10 hình ảnh giao thoa thu được với các góc nghiêng khác nhau, kết quả xác định độ dày màng được tổng hợp trong Bảng 4.1. Với số lần đo thực nghiệm là 10 nên trong chương này các kết quả thực nghiệm được xử lý với giả thuyết rằng các kết quả đo tuân theo phân phối Student. Kết quả độ dày màng được ước lượng theo giá trị trung bình:  $d = \bar{d} + t^{N-1}(0,99) \times \frac{S}{\sqrt{N}} = 338 \pm 7$  nm, trong

đó: N là số lần đo,  $t^{N-1}(0,99) = 3,25$  được lấy theo xác suất phân bố Student, khoảng tin cậy 99%. Kết quả này phù hợp với kết quả đo từ thiết bị Alpha Step.



Hình 4.7: Hình ảnh giao thoa thu được tại biên lớp màng dày 1200 nm

Hình 4.7 là hình ảnh giao thoa của một mẫu màng mỏng  $MgF_2$  khác được chúng tôi chế tạo có độ dày màng  $1200 \pm 100$  nm (đo bằng thiết bị Alpha Step D500). Kết quả đo độ dày màng theo phương pháp chúng tôi đề xuất thể hiện ở Bảng 4.2 với giá trị độ dày trung bình là 1219 nm và độ lệch chuẩn là 12 nm. Mẫu màng mỏng quang học này cũng đã được kiểm tra bằng hiển vi lực nguyên tử Enviroscope của Hãng Brüker (tại Phòng thí nghiệm Kỹ thuật Điện và Điện tử Paris - Geeps) cho kết quả chiều dày lớp màng cỡ 1189 nm (Phụ lục IV).

Bảng 4.2: Kết quả đo độ dày màng bằng phương pháp xử lý một ảnh WLI

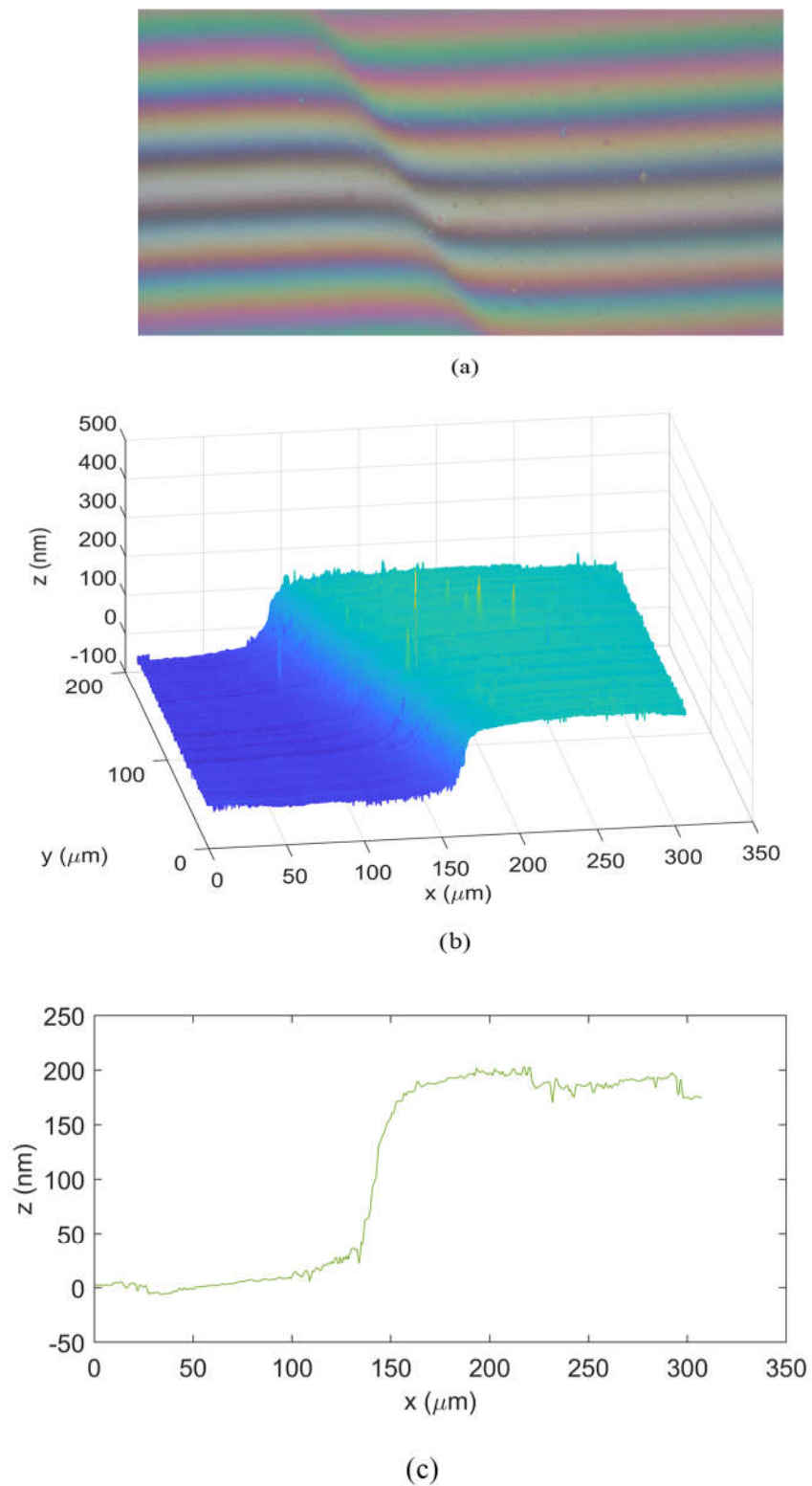
Lần đo	Chiều dày màng (nm)	Lần đo	Chiều dày màng (nm)
1	1208	6	1224
2	1223	7	1223
3	1232	8	1200
4	1224	9	1199
5	1231	10	1222
Trung bình (nm)		<b>1219</b>	
Độ lệch chuẩn (nm)		<b>12</b>	

Các kết quả đo độ dày màng quang học ở trên cho thấy hiệu quả của phương pháp đo màng mỏng sử dụng một ảnh WLI đã đề xuất. Ưu điểm nổi bật của phương pháp đo này là đơn giản và đủ chính xác. Kỹ thuật xử lý một ảnh WLI không sử dụng đến hệ vi dịch chuyển nên kết quả đo không chịu ảnh hưởng bởi độ chính xác của hệ này. Tuy nhiên, các mẫu màng mỏng cần đo phải được mạ trên đế phẳng và coi sự lệch pha của ánh sáng phản xạ trên bề mặt đế và bề mặt màng mỏng là như nhau. Hơn nữa, phép đo này chỉ thực hiện được tại biên của lớp màng. Đây chính là nhược điểm của kỹ thuật xử lý này. Kết quả nghiên cứu này đã được công bố trong bài báo [120].

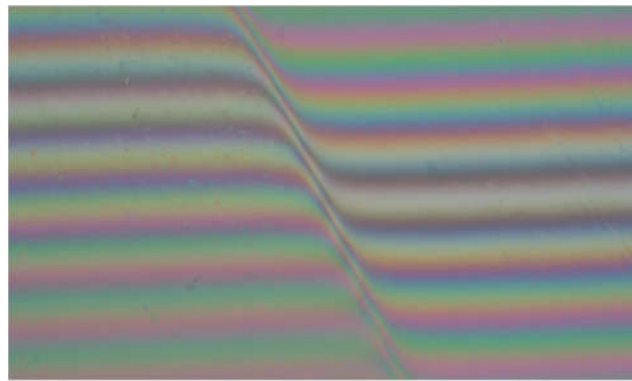
Các hạn chế của kỹ thuật xử lý một ảnh WLI có thể được khắc phục bằng kỹ thuật xử lý nhiều hình ảnh WLI để xây dựng cấu trúc hình học 3D của bề mặt màng mỏng. Các kết quả thực nghiệm công bố trong các mục sau đều sử dụng kỹ thuật xử lý nhiều ảnh WLI.

#### **4.2.2. Đo màng mỏng bằng phương pháp xử lý nhiều ảnh WLI**

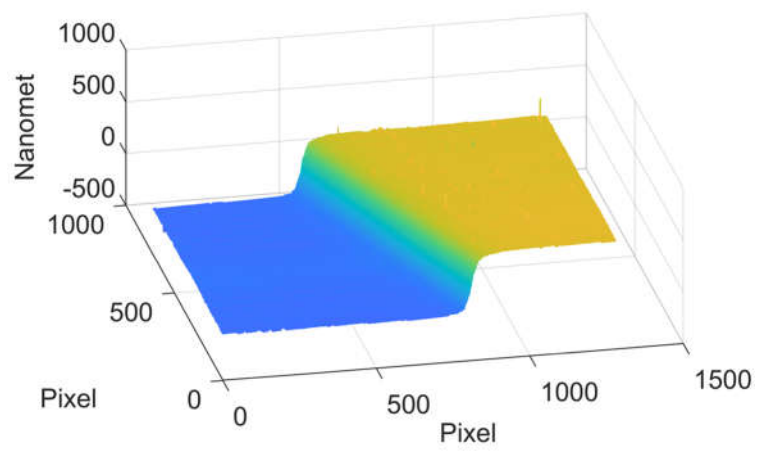
Kỹ thuật đo độ dày màng trình bày ở mục trước chỉ cho giá trị độ dày mà không cho cấu trúc hình học 3D của biên lớp màng. Áp dụng kỹ thuật đo và xử lý ảnh giao thoa đã trình bày ở Chương 3, chúng tôi đã thực hiện việc đo và tái tạo cấu trúc hình học 3D của hai lớp màng  $MgF_2$  có độ dày cỡ 500 nm và 200 nm. Các độ dày này được kiểm soát trong quá trình chế tạo màng bằng kỹ thuật dao động thạch anh. Hình 4.8 và Hình 4.9 thể hiện kết quả đo biên dạng 3D của vùng biên các lớp màng. Độ dày các lớp màng cũng có thể xác định thông qua đường cắt ngang của biên lớp màng như thể hiện ở Hình 4.8 (c) và Hình 4.9 (c). Kết quả đo phù hợp tốt với thông số độ dày được xác lập và kiểm soát trên thiết bị mạ màng.



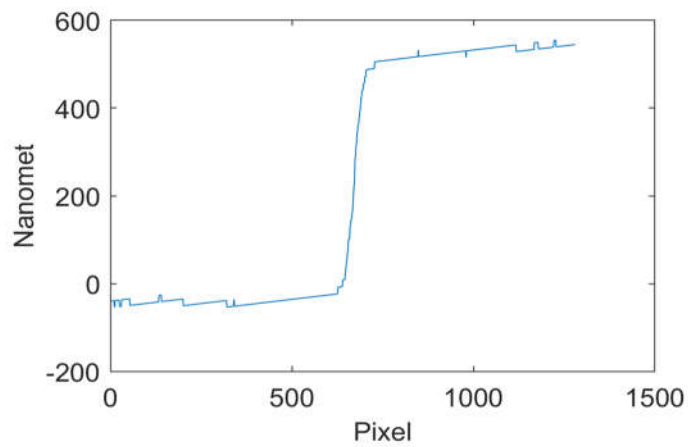
Hình 4.8: Kết quả đo cấu trúc hình học 3D của biên lớp màng  $MgF_2$  dày 200 nm (a) Hình ảnh giao thoa thực nghiệm, (b) cấu trúc hình học 3D và (c) đường cắt ngang của biên lớp màng.



(a)



(b)



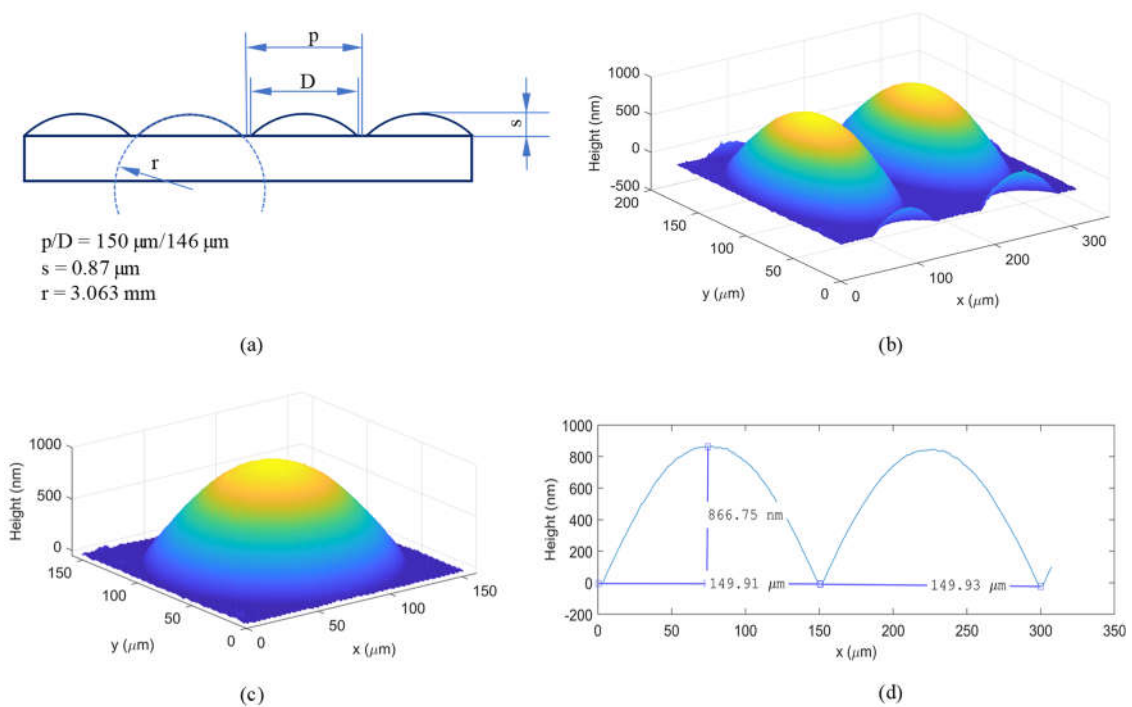
(c)

Hình 4.9: Kết quả đo cấu trúc hình học 3D của biên lớp màng  $MgF_2$  dày 500 nm (a) Hình ảnh giao thoa thực nghiệm, (b) cấu trúc hình học 3D và (c) đường cắt ngang của biên lớp màng.



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

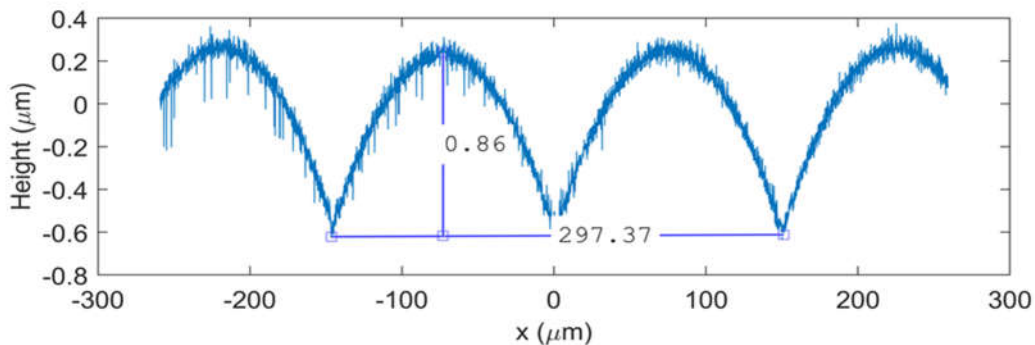
Vi thấu kính và ma trận vi thấu kính được sử dụng rộng rãi trong các thiết bị quang học hiện đại [58, 124, 143, 164], chẳng hạn để nâng cao hiệu quả ghép nối giữa đầu các sợi quang, nâng cao hiệu quả thu nhận ánh sáng của các cảm biến ảnh, trong các cảm biến mặt sóng, kính hiển vi đồng tiêu, trong các hệ thống xử lý tín hiệu quang song song,... Mỗi vi thấu kính thường có kích thước cỡ một vài micromet tới hàng trăm micromet. Việc kiểm soát kích thước, cấu trúc hình học bề mặt của vi thấu kính và ma trận vi thấu kính là cần thiết không chỉ trong quá trình chế tạo mà ngay cả trong việc phát triển các ứng dụng của chúng.



Hình 4.10: Kết quả đo bề mặt ma trận vi thấu kính MLA150-7AR, (a) Các thông số hình học do nhà sản xuất công bố, (b) Kết quả đo cấu trúc hình học 3D của hai vi thấu kính và (c) của một vi thấu kính bằng mô hình thiết bị của chúng tôi, (d) đường cắt ngang qua đỉnh của hai vi thấu kính

Sử dụng mô hình thiết bị đã xây dựng, chúng tôi tiến hành thực nghiệm đo cấu trúc hình học bề mặt của một ma trận vi thấu kính thương mại MLA150-7AR của hãng Thorlab (Anh). Các thông số hình dạng của MLA150-7AR được nhà sản xuất công bố là [Hình 4.10 (a)]: khoảng cách vi thấu kính  $p = 150 \mu\text{m}$ , đường kính thông quang của vi thấu kính  $D = 146 \mu\text{m}$ , độ cao chỏm cầu  $s = 0,87 \mu\text{m}$ , bán kính cong mặt cầu  $r = 3,063 \text{ mm}$ .

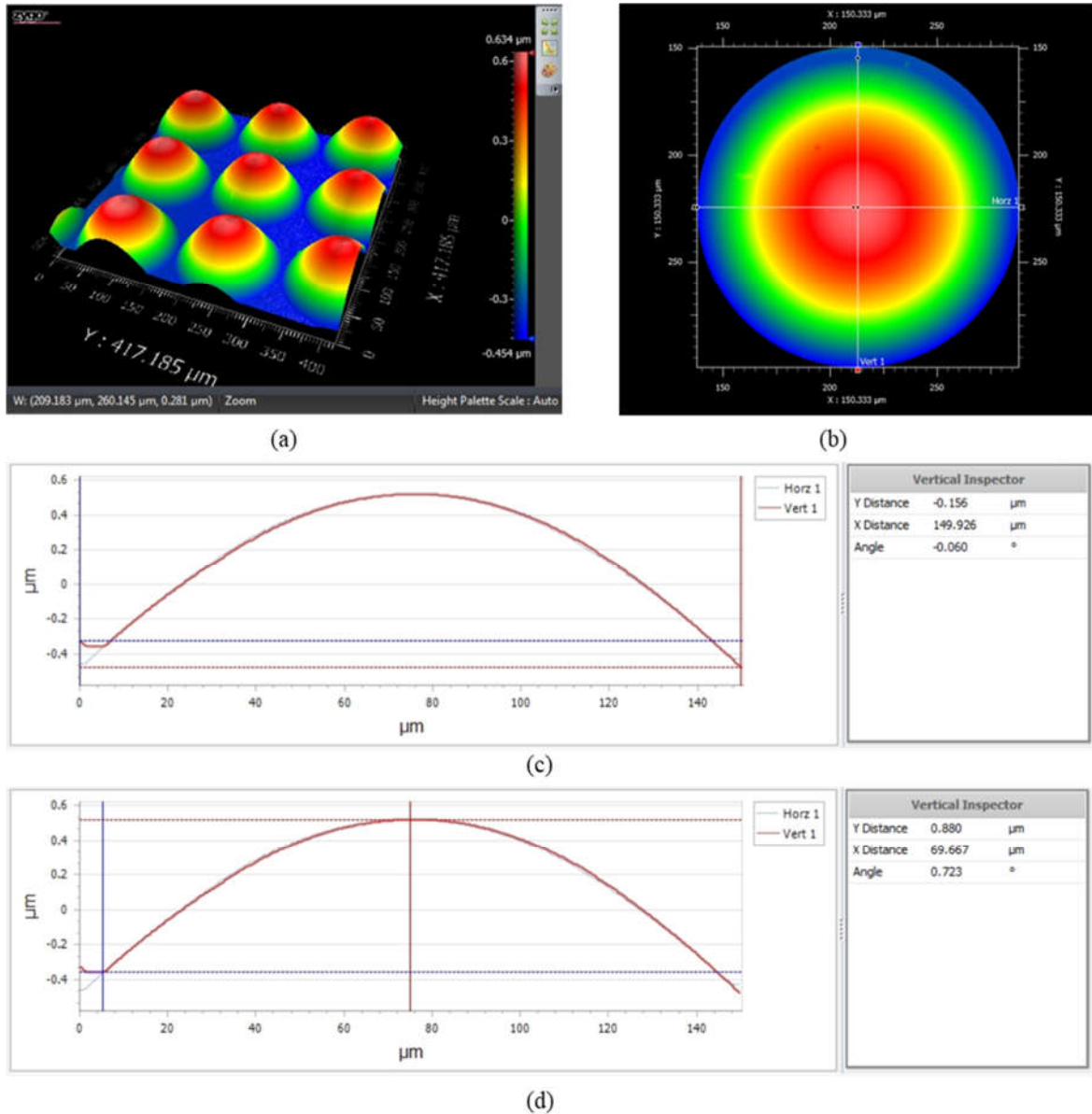
Kết quả đo các thông số của ma trận vi thấu kính được thể hiện ở Hình 4.10. Rõ ràng, kết quả đo bằng mô hình mà chúng tôi xây dựng ( $p_m = 149,91 \mu\text{m}$ ,  $s_m = 0,867 \mu\text{m}$ ) phù hợp rất tốt với công bố của nhà sản xuất.



Hình 4.11: Biên dạng cắt ngang bề mặt ma trận vi thấu kính MLA150-7AR, được đo bằng máy Alpha Step D500

Để đối chứng kết quả đo trên với các phương pháp đo khác, chúng tôi đã thực nghiệm đo biên dạng 2D của bề mặt ma trận vi thấu kính này trên máy đo Alpha Step D500 (hãng KLA) và thiết bị đo biên dạng quang học ZeGage (hãng Zygo). Đường cắt ngang qua đỉnh của các vi thấu kính được xác định bằng máy đo tiếp xúc Alpha Step D500 như thể hiện ở Hình 4.11. Biên dạng này cho thấy thông số hình học như đường kính thông quang, độ cao chỏm cầu phù hợp tốt với kết quả đo khi sử dụng mô hình thiết bị đã xây dựng (Hình 4.10). Ma trận vi thấu kính là linh kiện quang học có bề mặt nhẵn là những chỏm cầu. Tuy nhiên, kết quả đo sử dụng Alpha Step còn cho thấy nhược điểm của phương

pháp đo tiếp xúc này là có nhiều lớn hơn nhiều so với phương pháp đo bằng WLI và có thể gây trầy xước bề mặt làm việc của ma trận vi thấu kính.



Hình 4.12: Kết quả đo cấu trúc hình học 3D bề mặt ma trận vi thấu kính MLA150 - 7AR bằng giao thoa kế ánh sáng trắng ZeGage (hãng Zygo), (a) Hình ảnh cấu trúc hình học 3D, (b) Cấu trúc hình học một vi thấu kính được trích xuất từ dữ liệu 3D, (c) Kết quả xác định đường kính thông quang và (d) độ cao chòm cầu của một vi thấu kính.

Kết quả đo bằng hiển vi giao thoa kế ánh sáng trắng thương mại ZeGage được thể hiện trên Hình 4.12. Diện tích phân bề mặt đo được bằng thiết bị ZeGage lớn hơn so với khi đo bằng mô hình thiết bị đã xây dựng. Điều này là do thông số của 2 hệ thống khác nhau như: diện tích cảm biến ảnh, kích thước điểm ảnh, thông số của vật kính giao thoa... Tuy nhiên, cấu trúc hình học 3D và các thông số hình học của ma trận vi thấu kính khi bằng thiết bị ZeGage tương đồng với kết quả đo trên mô hình thiết bị. Điều này một lần nữa khẳng định mô hình thiết bị mà chúng tôi xây dựng đã hoạt động tốt và cho kết quả tin cậy.

#### **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**

Một trong những phép đo phổ biến nhất trong chế tạo thấu kính là đo bán kính cong của các bề mặt cầu. Ngay cả với thấu kính phi cầu thì bán kính cong ở đỉnh cũng là một thông số quan trọng phải được đo kiểm. Phương pháp đo phổ biến nhất là đo thông qua chiều cao hoặc độ võng của chỏm cầu. Tuy nhiên, phương pháp này hầu như không thể áp dụng cho trường hợp cần đo các thấu kính kích thước nhỏ và rất nhỏ (cỡ một vài milimet trở xuống).

Đối với các vi thấu kính, độ cao của bề mặt chỏm cầu có thể nhỏ hơn vài chục micromet và đường kính thông quang của nó có thể chỉ vài trăm micromet. Khi đó, ta cần phải dùng các kỹ thuật hiển vi như AFM, SEM, hoặc một số loại máy đo biên dạng chính xác cao, máy đo bằng giao thoa ánh sáng [104, 155]. Mỗi phương pháp đo có các ưu điểm và nhược điểm riêng [63, 148], chẳng hạn, máy đo tiếp xúc có thể gây hỏng bề mặt chi tiết, hoặc chi phí và thời gian để thực hiện các phép đo AFM, SEM cao. Đối với phép đo bán kính cong của bề mặt vi cầu, kính hiển vi đồng tiêu, hoặc kính hiển vi WLI là thiết bị phù hợp nhất.

Như ta đã thấy, kính hiển vi WLI cho phép đo cấu trúc hình học 3D của bề mặt chi tiết cỡ micromet hoặc nanomet [17, 95, 168]. Đây là thiết bị rất hữu dụng để đo cấu trúc hình học bề mặt quang học và các thông số khác về hình dạng bao gồm cả bán kính cong [43, 52]. Trong mỗi phép đo, ta thu nhận được hàng triệu điểm dữ liệu biểu diễn cấu trúc hình học 3D bề mặt và từ đó có thể trích xuất các thông tin khác nhau. Tuy vậy, khi xác định bán kính cong của mặt cầu, để giảm khối lượng và thời gian tính toán, đa số thiết bị WLI thương mại sử dụng biên dạng 2D cắt ngang qua đỉnh của bề mặt nên độ chính xác sẽ bị hạn chế. Sai số đo bán kính sẽ giảm đi nếu ta sử dụng toàn bộ tập dữ liệu 3D của bề mặt bằng cách làm khớp tập dữ liệu đó với một mặt cầu (thay vì một đường tròn). Thuật toán làm khớp mặt cầu nhanh do Sumith Y.D. đề xuất [162] là một thuật toán hiệu quả và thích hợp để xác định bán kính mặt cầu. Tuy nhiên, cho đến nay, không có báo cáo nào về việc áp dụng thuật toán này vào xử lý dữ liệu của thiết bị WLI. Vì thế, trong phần này, chúng tôi sẽ áp dụng thuật toán làm khớp mặt cầu nhanh để xác định bán kính cong của vi thấu kính.

Bản chất của kỹ thuật đo bán kính này là tìm ra một mặt cầu lý tưởng mà sát nhất có thể với tập hợp dữ liệu 3D đo được của các điểm trên bề mặt. Bề mặt cầu là tập hợp các điểm trong không gian có khoảng cách bằng nhau (bán kính  $R$ ) đến một điểm (tâm  $O(x_0, y_0, z_0)$ ). Việc làm khớp này chính là đi tìm vị trí tâm mặt cầu và bán kính sao cho tổng bình phương khoảng cách từ các điểm dữ liệu đến mặt cầu lý tưởng là nhỏ nhất. Với một tập hợp các điểm dữ liệu  $P_i(x_i, y_i, z_i)$ , biểu thức (4.1) cần đạt giá trị cực tiểu [162]:

$$e = \sum_{i=1}^N \left[ R^2 - (x_i - x_0)^2 - (y_i - y_0)^2 - (z_i - z_0)^2 \right]^2, \quad (4.1)$$

Đặt:

$$\Lambda = R^2 - (x_i - x_0)^2 - (y_i - y_0)^2 - (z_i - z_0)^2, \quad (4.2)$$

$$\Pi^2 = (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2, \quad (4.3)$$

Để tìm cực tiểu của hàm  $e(R, x_0, y_0, z_0)$  với các biến là  $R, x_0, y_0$  và  $z_0$ , lấy đạo hàm phương trình (4.1) theo các biến đó và đặt bằng 0. Ta có:

$$\partial e / \partial R = 4 \sum R \Lambda = 0 \Leftrightarrow \sum \Lambda = 0, \quad (4.4)$$

Suy ra:

$$\sum R^2 = \sum \Pi^2 \Leftrightarrow NR^2 - \sum \Pi^2 = 0, \quad (4.5)$$

Đạo hàm phương trình (4.1) theo  $x_0$ , ta có:

$$\partial e / \partial x_0 = 2 \sum \Lambda (-2(x_i - x_0)) \cdot (-1) = 0 \Leftrightarrow \sum \Lambda x_i = \sum \Lambda x_0, \quad (4.6)$$

Từ phương trình (4.4) và phương trình (4.6):

$$\sum \Lambda x_i = 0 \Rightarrow \sum R^2 x_i - \sum \Pi^2 x_i = 0 \Leftrightarrow R^2 \Sigma_x - \sum \Pi^2 x_i = 0, \quad (4.7)$$

Nhân phương trình (4.5) với  $\Sigma_x$ :

$$NR^2 \Sigma_x - \sum \Pi^2 \Sigma_x = 0, \quad (4.8)$$

Nhân phương trình (4.7) với  $N$ :

$$NR^2 \Sigma_x - N \sum \Pi^2 x_i = 0, \quad (4.9)$$

Từ phương trình (4.8) và (4.9), ta có:

$$\begin{aligned} N \sum \Pi^2 x_i - \sum \Pi^2 \Sigma_x &= (N \Sigma_{x^3} + N \Sigma_{xy^2} + N \Sigma_{xz^2} - \Sigma_{x^2} \Sigma_x - \Sigma_{y^2} \Sigma_x - \Sigma_{z^2} \Sigma_x) \\ &+ x_0 (-2N \Sigma_{x^2} + 2 \Sigma_x^2) + y_0 (-2N \Sigma_{xy} + 2 \Sigma_x \Sigma_y) + z_0 (-2N \Sigma_{xz} + 2 \Sigma_x \Sigma_z) = 0 \end{aligned}, \quad (4.10)$$

Thực hiện tương tự với các biến  $y_0, z_0$  ta nhận được 2 phương trình sau:

$$\begin{aligned} N \sum \Pi^2 y_i - \sum \Pi^2 \Sigma_y &= (N \Sigma_{x^2 y} + N \Sigma_{y^3} + N \Sigma_{yz^2} - \Sigma_{x^2} \Sigma_y - \Sigma_{y^2} \Sigma_y - \Sigma_{z^2} \Sigma_y) \\ &+ x_0 (-2N \Sigma_{xy} + 2 \Sigma_x \Sigma_y) + y_0 (-2N \Sigma_{y^2} + 2 \Sigma_y^2) + z_0 (-2N \Sigma_{yz} + 2 \Sigma_y \Sigma_z) = 0 \end{aligned}, \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} N \sum \Pi^2 z_i - \sum \Pi^2 \Sigma_z &= (N \Sigma_{x^2 z} + N \Sigma_{y^2 z} + N \Sigma_{z^3} - \Sigma_{x^2} \Sigma_z - \Sigma_{y^2} \Sigma_z - \Sigma_{z^2} \Sigma_z) \\ &+ x_0 (-2N \Sigma_{xz} + 2 \Sigma_x \Sigma_z) + y_0 (-2N \Sigma_{yz} + 2 \Sigma_y \Sigma_z) + z_0 (-2N \Sigma_{z^2} + 2 \Sigma_z^2) = 0 \end{aligned}, \quad (4.12)$$

Giải hệ phương trình (4.10) - (4.12) ta xác định được tâm cầu  $O(x_0, y_0, z_0)$ . Thay giá trị  $x_0, y_0, z_0$  và phương trình (6) chúng ta xác định được bán kính R theo biểu thức:

$$R^2 = \frac{1}{N} \left[ \Sigma_{x^2} + \Sigma_{y^2} + \Sigma_{z^2} - 2x_0 \Sigma_x - 2y_0 \Sigma_y - 2z_0 \Sigma_z \right] + (x_0^2 + y_0^2 + z_0^2), \quad (4.13)$$

Sai số bình phương trung bình (MSE) được xác định:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum (R_i - R)^2, \quad (4.14)$$

Áp dụng thuật toán làm khớp như trình bày trên và sử dụng tập hợp dữ liệu 3D của bề mặt được đo như ở mục 4.1.2.3, chúng tôi xác định được bán kính cong của vi thấu kính trong ma trận vi thấu kính MLA150 - 7AR là  $r_m = 3,088 \pm 0,026 \text{ mm}$ , khá phù hợp với giá trị công bố của nhà sản xuất là  $r = 3,063 \text{ mm}$ .

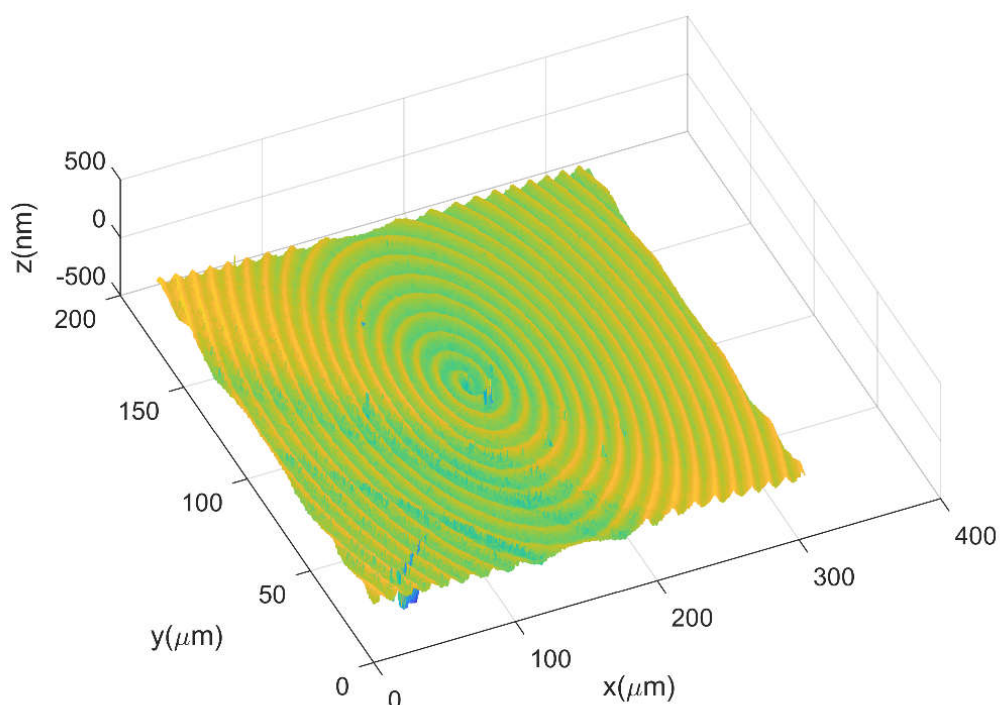
Để đánh giá độ lặp lại của kết quả, chúng tôi đã đo thực nghiệm nhiều lần với các điều kiện đo không đổi, kết quả thể hiện trong Bảng 4.3. Số liệu trong Bảng 4.3 cho thấy độ lặp lại tốt của các kết quả đo lường trên mô hình thiết bị của chúng tôi. Phương pháp xử lý dữ liệu 3D để trích xuất bán kính cong của các chỏm cầu được công bố trong bài báo [118].

*Bảng 4.3: Kết quả xác định bán kính của vi thấu kính.*

Lần đo	Bán kính (mm)	Lần đo	Bán kính (mm)
1	3,096	6	3,082
2	3,100	7	3,115
3	3,078	8	3,039
4	3,054	9	3,085
5	3,105	10	3,125
Giá trị trung bình (mm)		<b>3,088</b>	
Độ lệch chuẩn (mm)		<b>0,026</b>	

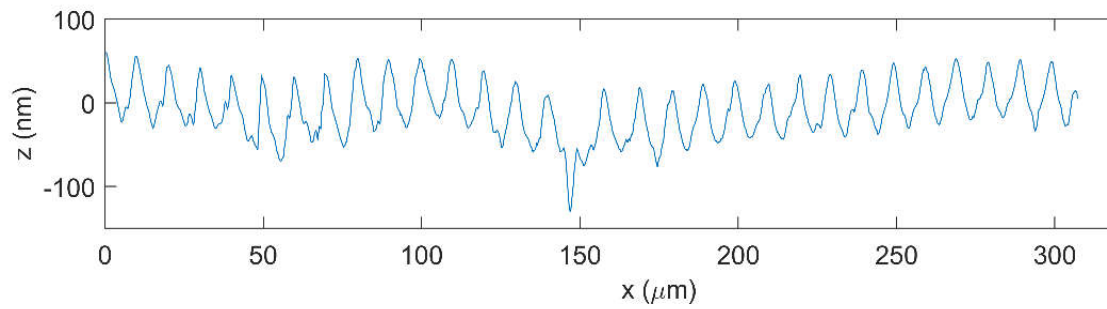
#### 4.2.5. Đo cấu trúc hình học 3D bề mặt chi tiết quang gia công bằng phương pháp tiện sử dụng mũi kim cương đơn điểm

Chúng tôi đã đo biên dạng bề mặt của một mặt nạ pha bậc 3 được gia công bằng phương pháp tiện siêu chính xác sử dụng mũi kim cương đơn điểm (Single-Point Diamond Turning – SPDT). Thông thường trên bề mặt chi tiết quang học được gia công bằng phương pháp SPDT luôn có các vết đặc trưng do dao tiện để lại. Hình dạng, kích thước vết dao trên bề mặt được kiểm soát nhỏ hơn  $\frac{1}{4}$  bước sóng làm việc. Sử dụng mô hình thiết bị WLI đã xây dựng, chúng tôi đã đo được cấu trúc hình học 3D và 2D của bề mặt mặt nạ pha chế tạo bằng phương pháp SPDT trên vật liệu PMMA như trên 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 với chiều cao mấp mô cỡ 80 nm. Bước của dao tiện trong quá trình gia công cũng xác định được là 10  $\mu\text{m}$ .



Hình 4.13: Cấu trúc hình học 3D của bề mặt mặt nạ pha gia công bằng phương pháp SPDT



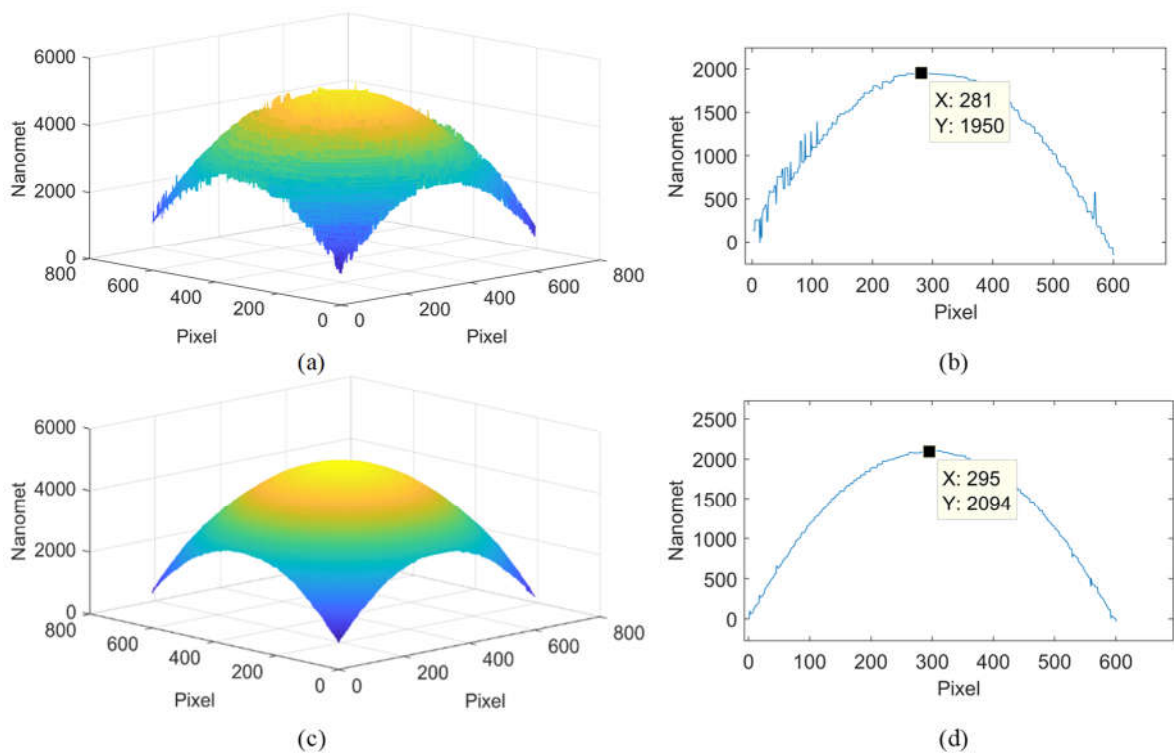


Hình 4.14: Biên dạng đường cắt ngang bề mặt chi tiết mặt nạ pha

Những kết quả đo này cho thấy khả năng ứng dụng mô hình thiết bị của chúng tôi trong đo kiểm bề mặt chi tiết quang học và kiểm soát chất lượng gia công chi tiết quang bằng phương pháp SPDT, điều mà hiện nay còn đang gặp rất nhiều khó khăn do tình trạng thiếu trang thiết bị ở trong nước.

### 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 đo cấu trúc hình học 3D và mặt cắt ngang qua đỉnh của chỏm cầu (a, b) bằng thuật toán tìm cực đại, (c, d) bằng thuật toán kết hợp.

Bề mặt chi tiết cơ khí được đo là chỏm cầu của một viên bi kim loại gắn trên vòng đo của cầu kế Spherometer có đường kính được hãng Trioptics (Đức) công bố là 2,5077 mm. Hình 4.15 (a, b) là kết quả tái tạo cấu trúc hình học 3D và đường cắt ngang qua đỉnh khi các hình ảnh giao thoa thực nghiệm được xử lý bằng thuật toán tìm cực đại. Rõ ràng, bề mặt và đường cong thu được có một số điểm nhấp nhô bất thường. Điều này là do quá trình xử lý vân giao thoa gặp lỗi do sai số thứ tự vân gây ra các bước nhảy bằng nửa bước sóng. Khi sử dụng thuật toán kết hợp kỹ thuật tìm cực đại với kỹ thuật làm khớp tín hiệu WLI, các sai số thứ tự vân được loại bỏ và kết quả thu được hoàn toàn không có các điểm bất thường [Hình 4.15 (c, d)].

Từ kết quả đo cấu trúc hình học 3D của bề mặt chỏm cầu kim loại, áp dụng thuật toán làm khớp mặt cầu nhanh (mục 4.1.2.4), đường kính của chỏm cầu tính toán được là  $D = 2,5232$  mm, độ cao chỏm cầu khoảng  $2 \mu\text{m}$  trong phạm vi đo  $144 \mu\text{m} \times 144 \mu\text{m}$  ( $600 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$ ). So với giá trị bán kính do hãng Trioptics công bố, kết quả đo có sự sai lệch 2%. Một nguyên nhân quan trọng gây ra sai số này là do khu vực chỏm cầu được đo có kích thước quá bé so với kích thước của viên bi. Điều này có thể khắc phục được nếu dùng vật kính hiển vi có độ phóng đại nhỏ hơn hoặc cảm biến với kích thước lớn hơn.

#### 4.3.2. Đánh giá chất lượng bề mặt

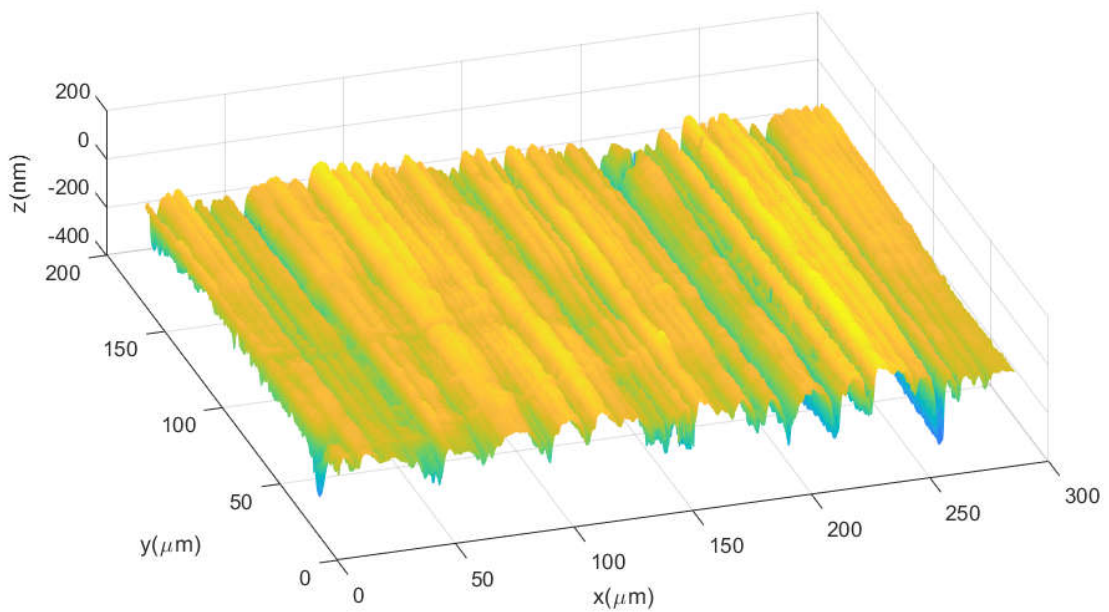
Sử dụng mô hình thiết bị đã xây dựng, chúng tôi đã đo bề mặt một số mẫu độ nhám tiêu chuẩn (Hình 4.16).

Mẫu N2 - Grinding (Hình 4.16) được sản xuất bằng phương pháp mài, có độ nhám trung bình  $R_a = 50$  nm và đã được kiểm định tại Viện đo lường Việt Nam. Kết quả đo cấu trúc hình học 3D bề mặt mẫu N2- Grinding được thể hiện ở Hình 4.17. Đường cắt ngang bề mặt tại vị trí  $y = 360$  (pixel) được thể hiện

trong Hình 4.18. Cắt nhiều đường tại các vị trí y khác nhau và tính toán thông số độ nhám Ra của bề mặt theo phương x thu được kết quả trên Hình 4.19.

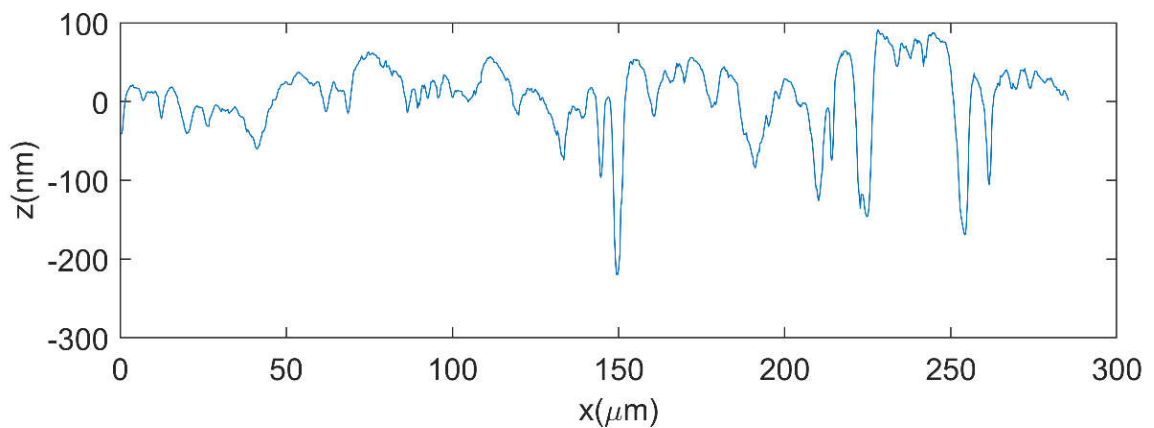


Hình 4.16: Bộ mẫu độ nhám tiêu chuẩn

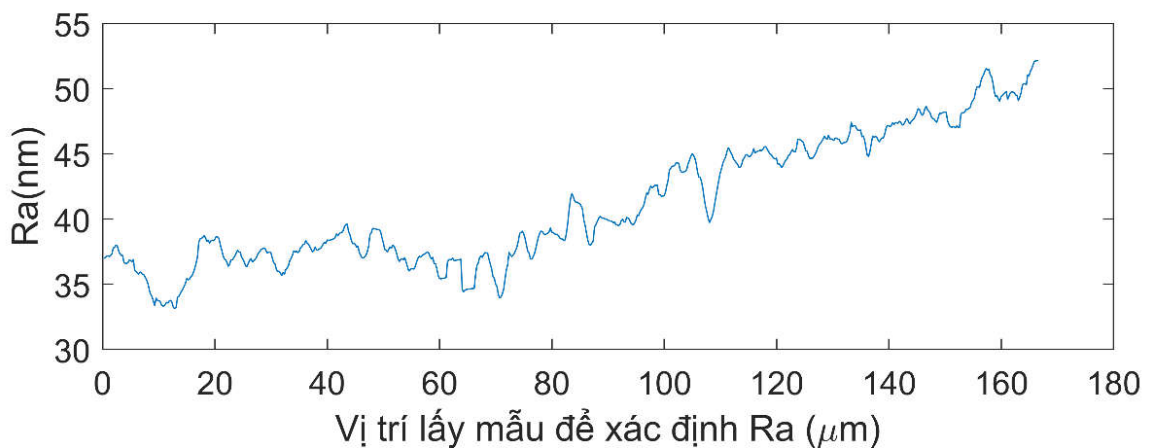


Hình 4.17: Kết quả đo cấu trúc hình học 3D bề mặt mẫu N2-Grinding

Từ Hình 4.19 ta thấy giá trị thông số nhám Ra xác định được theo các đường lấy mẫu khác nhau là các giá trị rời rạc và nằm trong khoảng từ 35 nm đến 55 nm, tức là xung quanh giá trị được công bố. Điều này là dễ hiểu bởi việc đánh giá độ nhám với chỉ một thông số Ra là phụ thuộc vào vị trí và hướng của các đường lấy mẫu theo chiều dài chuẩn, sai số đánh giá độ nhám thường đến 30% khi đo các bề mặt có Ra nhỏ hơn 1  $\mu\text{m}$  [121].



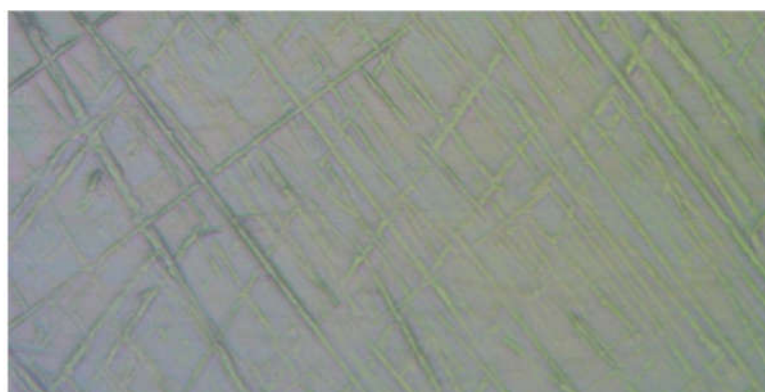
Hình 4.18: Một lát cắt ngang bề mặt mẫu chuẩn độ nhám N2-Grinding



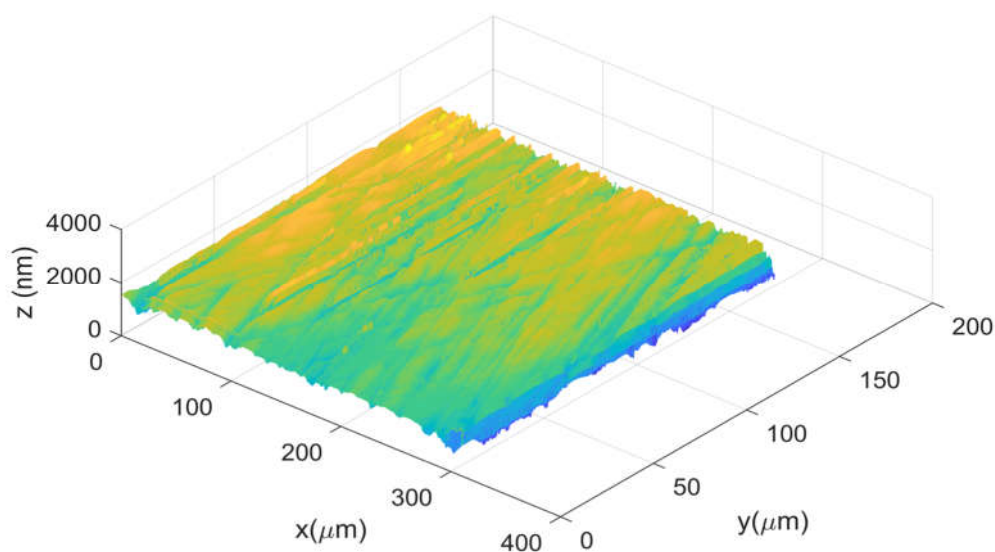
Hình 4.19: Kết quả tính độ nhám Ra của bề mặt mẫu N2-Grinding theo các mặt cắt ngang khác nhau

Với một mẫu chuẩn độ nhám khác là N3-Flat lapping (gia công bằng phương pháp mài phẳng) được nhà sản xuất công bố có  $Ra = 100 \text{ nm}$ , Hình

4.20 thể hiện ảnh chụp bề mặt qua kính hiển vi và cấu trúc hình học 3D của nó mà chúng tôi đã đo được. Kết quả tính toán thông số nhám Ra theo hai đường cắt ngang ở hai vị trí khác nhau lần lượt là: 95,05 nm và 102,04 nm (Hình 4.21), rất gần với giá trị công bố của nhà sản xuất mẫu chuẩn.



(a)

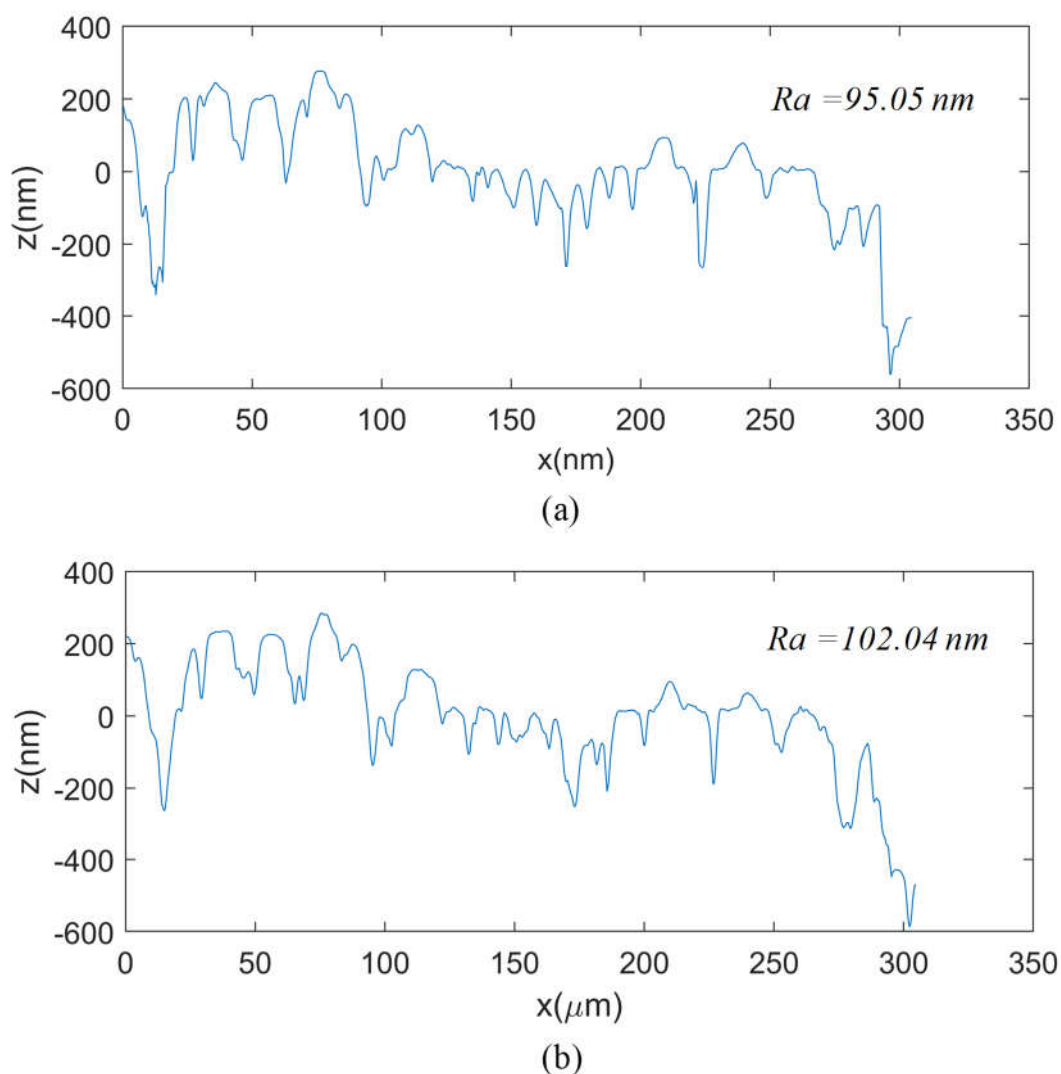


(b)

Hình 4.20: (a) Ảnh chụp bề mặt và (b) cấu trúc hình học 3D bề mặt mẫu chuẩn độ nhám N3 - Flat lapping thu được từ thực nghiệm.

Như vậy, với cấu hình hiện có, mô hình thiết bị WLI mà chúng tôi đã xây dựng cho phép đo cấu trúc hình học 3D của bề mặt các mẫu độ nhám chuẩn

N3, N2 với chiều cao mấp mô bề mặt cỡ vài chục tới hàng trăm nanomet. Kết quả đo cho thấy sự phù hợp tốt với công bố của nhà sản xuất.



Hình 4.21: Biên dạng đường cắt ngang bề mặt mẫu chuẩn độ nhám N3- Flat lapping tại hai vị trí khác nhau

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

WLI là một kỹ thuật mạnh mẽ nhưng cũng có những hạn chế. WLI có thể thu nhận tập dữ liệu lớn về cấu trúc hình học và cung cấp ước tính định lượng các tham số hình học bề mặt. Tuy nhiên, đối với trường hợp bề mặt chi tiết quang, cơ, người ta thấy rằng độ chính xác của phương pháp WLI phụ thuộc

vào cả hình dạng, độ nhám, vật liệu của bề mặt cần đo. Do đó, không thể đưa ra tuyên bố chung về độ không đảm bảo đo [98]. Tuy nhiên, nếu các giới hạn chung của thiết bị đã xây dựng được biết, có thể xác định khi nào thiết bị sẽ hoạt động tốt nhất, khi nào có thể xảy ra sai số đo và có những điều chỉnh phù hợp. Ngoài mẫu đo, các yếu tố chính ảnh hưởng đến độ chính xác của thiết bị bao gồm: độ chính xác của bộ vi dịch chuyển; chất lượng của hệ tạo ảnh giao thoa (vật kính hiển vi giao thoa, cảm biến ảnh); sự thay đổi phổ, cường độ của nguồn sáng; tốc độ đo, điều kiện đo. Tất cả các yếu tố này gây nên sai số đo của mô hình thiết bị.

*Bảng 4.4 Bảng tổng hợp các kết quả đo sử dụng mô hình thiết bị*

STT	Đại lượng được đo	Kết quả đo	Kết quả đối chứng	Sai lệch	Ghi chú
1	Chiều cao bậc cách tử Ronchi (nm)	68,29	68,06	0,3%	So với máy ZeGage
2	Khoảng cách vạch cách tử Ronchi ( $\mu\text{m}$ )	24,95	25,206	1%	So với máy ZeGage
3	Chiều cao chỏm cầu của vi thấu kính ( $\mu\text{m}$ )	0,867	0,87	0,46%	Số liệu công bố của Nhà sản xuất
			0,88	1,4%	So với máy ZeGage
			0,86	0,8%	So với máy AlphaStep
4	Khoảng cách các vi thấu kính ( $\mu\text{m}$ )	149,91	150	0,06%	Số liệu công bố của Nhà sản xuất
			149,9	0,01%	So với máy ZeGage
			148,7	0,8%	So với máy AlphaStep

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 ở Bảng 4.4 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:  $1280 \times 720$  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 gôm 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 <https://doi.org/10.1117/1.OE.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 <https://doi.org/10.1117/1.OE.58.12.124105>

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

### Tiếng Việt

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, (1), pp.410-415.
2. 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*. pp.386-392.
3. 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*. pp.389-393.

### Tiếng Anh

4. A Dragoset, R., et al., (1986) "Scanning tunneling microscopy applied to optical surfaces", *Optics letters*. 11, pp.560-2.
5. A. Dragoset, R., T. Vorburger, (1987) "Scanning Tunneling Microscopy (STM) Of A Diamond-Turned Surface And A Grating Replica", *Metrology: Figure and Finish*. 749, pp.54-58.
6. Ai, C., E.L. Novak (1997), Centroid approach for estimating modulation peak in broad-bandwidth interferometry, United States Patent, 08446019.
7. Al-Jumaily, G.A., et al., (1987) "Frequency Response Characteristics Of A Mechanical Surface Profilometer", *Optical Engineering*. 26, (9), pp.953-958.

8. Alexander, S., et al., (1989) "An Atomic-Resolution Atomic Force Microscope Implemented Using an Optical Lever", *Applied Physics*. 65, pp.164-167.
9. Andrew, T., R. Radu, A.B. Liam, (2018) "Surface Topography: Metrology and Properties", IOP Publishing. pp.8.
10. Arashlouzadeh, A. (2014), Surface Roughness Measurement: Multi-band Frequency Shift Interferometer based on Polarization Measurement, Halmstad University, Halmstad.
11. B. Chapman, G., (1991) "Confocal Microscopy by T. Wilson", American Microscopical Society. 110, pp.194-196.
12. Bar-Cohen, Y., et al. (2015), Actuators using piezoelectric stacks and displacement enhancers, SPIE, San Diego, California.
13. Bennett, J.M., J.H. Dancy, (1981) "Stylus profiling instrument for measuring statistical properties of smooth optical surfaces", *Applied Optics*. 20, (10), pp.1785-1802.
14. Bennett, J.M., V. Elings, K. Kjoller, (1991) "Precision metrology for studying optical surfaces", *Optics and Photonics News*. 2, (5), pp.14-18.
15. Bhushan, B., J. C. Wyant, C. L. Koliopoulos, (1985) "Measurement of Surface Topography of Magnetic Tapes by Mirau Interferometry", *Applied Optics*. 24, pp.1489.
16. Bhushan, B., F. Harald, M. Tomitori (2004), *Applied Scanning Probe Methods IX*, Springer, New York.
17. Bhushan, B., J.C. Wyant, C.L. Koliopoulos, (1985) "Measurement of surface topography of magnetic tapes by Mirau interferometry", *Applied Optics*. 24, (10), pp.1489-1497.
18. Binnig, G., C.F. Quate, C. Gerber, (1986) "Atomic Force Microscope", *Physical Review Letters*. 56, (9), pp.930-933.

19. Binnig, G.K. (1988), Atomic force microscope and method for imaging surfaces with atomic resolution, United States Patent, 4,724,318.
20. Blunt, L., X. Jiang (2003), Advanced Techniques for Assessment Surface Topography: Development of a Basis for 3D Surface Texture Standards "Surfstand", Elsevier Science, Oxford.
21. Bonnell, D. (2000), Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy: Theory, Techniques, and Applications, VCH New York.
22. C Park, M., S. W Kim, (2001) "Compensation of phase change on reflection in white-light interferometry for step height measurement", Optics letters. 26, pp.420-422.
23. C. Montgomery, P., J.-P. Fillard, (1993) "Peak fringe scanning microscopy: submicron 3D measurement of semiconductor components", SPIE. 1775, pp.12-23.
24. C. Wyant, J., C. L. Koliopoulos, B. Bhushan, D. and Basila, (1986) "Development of a Three-Dimensional Noncontact Digital Optical Profiler", Tribology. 108, pp.1-8.
25. Chand, M., et al., (2011) "Roughness measurement using optical profiler with self-reference laser and stylus instrument — A comparative study", Indian Journal of Pure & Applied Physics. 49, pp.335-339.
26. Cheng, Y.-Y., J.C. Wyant, (1985) "Multiple-wavelength phase-shifting interferometry", Applied Optics. 24, (6), pp.804-807.
27. Chim, S.S.C., G.S. Kino, (1990) "Correlation microscope", Optics Letters. 15, (10), pp.579-581.
28. Chim, S.S.C., G.S. Kino, (1991) "Phase measurements using the Mirau correlation microscope", Applied Optics. 30, (16), pp.2197-2201.

29. Cho, C.-H., (2016) "Three-dimensional measurement technology for additive manufacturing", Conference on Lasers and Electro-Optics. pp.JTh2A.10.
30. Chong, W.K., X. Li, Y.C. Soh (2012), "Phosphor-Based White Light Emitting Diode (LED) for Vertical Scanning Interferometry (VSI)", Interferometry – Research and Applications in Science and Technology. pp.82-98. InTech, Singapore.
31. Colonna de Lega, X., P. De Groot, (2005) "Optical Topography Measurement of Patterned Wafers", American Institute of Physics. 788, pp.432-436.
32. Colonna de Lega, X., P. De Groot, (2008) "Characterization of materials and film stacks for accurate surface topography measurement using a white-light optical profiler", SPIE. 6995, pp.9.
33. Creath, K., (1987) "Step height measurement using two-wavelength phase-shifting interferometry", Applied Optics. 26, (14), pp.2810-6.
34. Creath, K., (1989) "Calibration of numerical aperture effects in interferometric microscope objectives", Applied Optics. 28, pp.3333-8.
35. Creath, K. (1988), V Phase-Measurement Interferometry Techniques, WYKO Corporation, USA.
36. Damian, V., et al., (2009) "White light interferometry applications in nanometrology", SPIE. 7297, pp.72971H-1.
37. Danzebrink, H.U., et al., (2006) "Advances in Scanning Force Microscopy for Dimensional Metrology", Annals of the CIRP. 55, pp.841-878.
38. Davidson, M., K. Kaufman, I. Mazor, F. Cohen, (1987) "An Application Of Interference Microscopy To Integrated Circuit Inspection And Metrology", Proc. SPIE. 775, pp.233-249.



39. Davidson, M., K. Kaufman, I. Mazor, F. Cohen, (1987) "An Application Of Interference Microscopy To Integrated Circuit Inspection And Metrology", SPIE. 775, pp.233-249.
40. De Chiffre, L., H. Kunzmann, G.N. Peggs, D.A. Lucca, (2003) "Surfaces in Precision Engineering, Microengineering and Nanotechnology", CIRP Annals. 52, (2), pp.561-577.
41. De Groot, P. (1995), Method and apparatus for surface topography measurement by spatial-frequency analysis of interferograms, United States Patent, 5,398,113.
42. De Groot, P. (2015), "Interference microscopy for surface structure analysis". pp.791–828.
43. De Groot, P., (2019) "A review of selected topics in interferometric optical metrology", Reports on Progress in Physics. 82, (5), pp.056101.
44. De Groot, P., (2015) "Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography", Advances in Optics and Photonics. 7, (1), pp.1-65.
45. De Groot, P. (2011), Coherence Scanning Interferometry, Springer, Berlin.
46. De Groot, P., J. Biegen (2016), ZYGO Objective Chart,
47. De Groot, P., L. Deck, (1994) "Surface profiling by frequency-domain analysis of white light interferograms", SPIE. 2248, pp.101-104.
48. De Groot, P., L. Deck, (1995) "Surface Profiling by Analysis of White-light Interferograms in the Spatial Frequency Domain", SPIE. 42, pp.389-401.
49. De Groot, P., L. Deck (1995), Surface Profiling by Analysis of White-light Interferograms in the Spatial Frequency Domain,

50. Deck, L., P. De Groot, (1995) "High-speed non-contact profiler based on scanning white light interferometry", *Int. J. Mach. Tools Manufact.* 35, (2), pp.147-150.
51. Dresel, T., G. Häusler, H. Venzke, (1992) "Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar", *Applied Optics.* 31, pp.919-25.
52. Drexler, W., et al., (2014) "Optical coherence tomography today: speed, contrast, and multimodality", *Journal of Biomedical Optics.* 19, (7), pp.1-34, 34.
53. Duboust, N., et al., (2016) "An optical method for measuring surface roughness of machined Carbon Fibre Reinforced Plastic composites", *Journal of Composite Materials.* 51, pp.1-44.
54. Fang, F., Z. Zeng, X. Zhang, L. Jiang, (2016) "Measurement of micro-V-groove dihedral using white light interferometry", *Optics Communications.* 359, pp.297-303.
55. Gao, F., R. Leach, J. Petzing, J. Coupland, (2007) "Surface Measurement Errors Using Commercial Scanning White Light Interferometers", *IOP Publishing.* 19, pp.015303.
56. Gao, F., R. Leach, J. Petzing, J. Coupland (2007), *Surface Measurement Errors Using Commercial Scanning White Light Interferometers*,
57. Gianto, G., F. Salzenstein, P. Montgomery, (2016) "Comparison of envelope detection techniques in coherence scanning interferometry", *Applied Optics.* 55, (24), pp.6763-6774.
58. Gómez-Varela, A., et al. (2017), "Sol-Gel Glass Coating Synthesis for Different Applications: Active Gradient-Index Materials, Microlens Arrays and Biocompatible Channels", *Recent Applications in Sol-Gel Synthesis.* pp.231-252.

59. Grimm, T., G. Wiora, G. Witt (2015), Characterization of typical surface effects in additive manufacturing with confocal microscopy,
60. Groot, P.J.d., X.C.d. Lega, M.F. Fay, (2008) "Transparent film profiling and analysis by interference microscopy", *Optical Engineering and Applications*. 7064, pp.70640I-1-70640I-6.
61. Groot, X.C.d.L.a.P.d., (2012) "“Lateral resolution and instrument transfer function as criteria for selecting surface metrology instruments,” in *Imaging and Applied Optics Technical Papers*", OSA Technical Digest (online) paper OTu1D.4.,
62. Grous, A. (2013), *Applied Metrology for Manufacturing Engineering*,
63. H. Cohen, S., M. L. Lightbody (2002), *Atomic Force Microscopy/Scanning Tunneling Microscopy 3*, Kluwer Academic, USA.
64. Haberland, R., (1987) "In-Process Optical Metrology For Precision Machining", *Fourth International Symposium on Optical and Optoelectronic Applied Sciences and Engineering*. 0802, pp.4.
65. Haeusler, G., J. Neumann, (1993) "Coherence radar: an accurate 3D sensor for rough surfaces", *Proc. SPIE*. 1822, pp.200-205.
66. Haeusler, G., J. Neumann, (1993) "Coherence radar: an accurate 3D sensor for rough surfaces", *Applications in Optical Science and Engineering*. 1822, pp.6.
67. Harasaki, A., J. C. Wyant, (2000) "Fringe Modulation Skewing Effect in White-Light Vertical Scanning Interferometry", *Applied Optics*. 39, pp.2101-6.
68. Harasaki, A., J. Schmit, J. C. Wyant, (2000) "Improved Vertical-Scanning Interferometry", *Applied Optics*. 39, pp.2107-15.

69. Harasaki, A., J. Schmit, J. C. Wyant, (2001) "Offset of Coherent Envelope Position Due to Phase Change on Reflection", *Applied Optics*. 40, pp.2102-6.
70. Hariharan, P. (2007), *White-Light Interference Microscopy*, Springer, Berlin.
71. Hariharan, P., K. Larkin, M. Roy, (1994) "The Geometric Phase: Interferometric Observations with White Light", *Modern optics*. 41, pp.663-667.
72. Hillmann, W., H. Kunzmann, (1990) "Surface Profiles Obtained by Means of Optical Methods — Are They True Representations of the Real Surface?", *Annals of the CIRP*. 39, pp.581-583.
73. ISO25178-2 (2012), *Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal —*, Switzerland.
74. ISO-25178-601 (2010), *Geometrical product specifications (GPS)— Surface texture: areal—Part 601: nominal characteristics of contact (stylus)instruments* (Geneva: International Organization for Standardization),
75. ISO-25178-606 (2015), *Geometrical product specifications (GPS) -- Surface texture: Areal -- Part 606: Nominal characteristics of non-contact (focus variation) instruments*,
76. ISO/FDIS-25178-604 (2013), *Geometrical product specifications (GPS)— —Surface texture: areal —Part 604: nominal characteristics of non-contact (coherence scanning interferometry) instruments* (Geneva: International Organization for Standardization),
77. J. Caber, P., (1993) "Interferometric profiler for rough surfaces. *Appl. Optics*, 32 (19), 3438-41", *Applied Optics*. 32, pp.3438-41.

78. Jiang, X., D. J. Whitehouse (2012), Technological shifts in surface metrology,
79. Jiang, X., P. Scott, D.J. Whitehouse, L. Blunt, (2007) "Paradigm shifts in surface metrology. Part I. Historical philosophy", Proceedings of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 463, pp.2049-2070.
80. Jiang, X., P. Scott, D.J. Whitehouse, L. Blunt, (2007) "Paradigm shifts in surface metrology. Part II. The current shift", Proceedings of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 463, pp.2071-2099.
81. K, L.R. (2001), Measurement good practice guide no 37: The measurement of surface texture using stylus instruments, National Physical Laboratory, London.
82. K, L.R. (2010), The measurement of rough surface topography using coherence scanning interferometry, National Physical Laboratory,
83. K. Creath, Y.Y.C., and J. Wyant, (1985) "Contouring aspheric surface using two-wavelength phase shifting interferometry", Optica Acta: International Journal of Optics. 32,
84. Kaplonek, W., C. Lukianowicz (2012), Coherence Correlation Interferometry in Surface Topography Measurements, InTech,
85. Kato, T., (2001) "A method to synthesize interference color chart with personal computer", Jour . Geol. Soc. Japan. 107, pp.64-67.
86. Kato, T., (2001) "Synthesized interference color chart with personal computer", The Journal of the Geological Society of Japan. 107, (1), pp.I-II.
87. Kim, S.-W., M. Kang, S. Lee (1999), White light phase-shifting interferometry with self-compensation of PZT scanning errors, SPIE,

88. Kim, S.W., G.H. Kim, (1999) "Thickness-Profile Measurement of Transparent Thin-Film Layers by White-Light Scanning Interferometry", *Applied Optics*. 38, (28), pp.5968-73.
89. Kino, G.S., S.S.C. Chim, (1990) "Mirau correlation microscope", *Applied Optics*. 29, (26), pp.3775-3783.
90. Kitagawa, K., (2013) "Thin-film thickness profile measurement by three-wavelength interference color analysis", *Optical Society of America*. 52, pp.1998-2007.
91. Kiyono, S., W. Gao, S. Zhang, T. Aramaki, (2000) "Self-calibration of a scanning white light interference microscope", *Optical Engineering*. 39, (10), pp.2720-2725, 6.
92. Kohno, T., N. Ozawa, K. Miyamoto, T. Musha, (1988) "High precision optical surface sensor", *Applied Optics*. 27, (1), pp.103-108.
93. Kuwamura, S., I. Yamaguchi, (1997) "Wavelength scanning profilometry for real-time surface shape measurement", *Applied Optics*. 36, (19), pp.4473-4482.
94. Larkin, K., (1996) "Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry", *Journal of the Optical Society of America*. 13, pp.832-843.
95. Larkin, K., (1996) "Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry", *Optical Society of America*. 13, (4), pp.832-843.
96. Leach, R. (2001), *The Measurement of Surface Texture Using Stylus Instruments*, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, United Kingdom.
97. Leach, R. (2011), *Optical Measurement of Surface Topography*, Springer, Berlin.

98. Leach, R., et al. (2008), Guide to the measurement of smooth surface topography using coherence scanning interferometry, National Physical Laboratory, Hampton Road, Teddington, Middlesex.
99. Leach, R., et al., (2012) "Calibration of areal surface topography measuring instruments: Are we there yet?", American Society for precision Engineering. 54, pp.15-19.
100. Lee, K.-W., et al., (2011) "Three-Dimensional Hybrid Integration Technology of CMOS, MEMS, and Photonics Circuits for Optoelectronic Heterogeneous Integrated Systems", Electron Devices, IEEE Transactions on. 58, pp.748-757.
101. Lega, P.d.G.a.X.C.d., (2004) "Signal modeling for low-coherence height-scanning interference microscopy", Applied Optics. 43, pp.4821.
102. Lehmann, P., (2006) "Systematic effects in coherence peak and phase evaluation of signals obtained with a vertical scanning white-light Mirau interferometer", Proc. SPIE. 6188, pp.618811.
103. Li, M., C. Quan, C. Tay, (2008) "Continuous wavelet transform for micro-component profile measurement using vertical scanning interferometry". 40, pp.920-929.
104. Lin, C.-S., et al., (2010) "An automatic evaluation method for the surface profile of a microlens array using an optical interferometric microscope", Measurement Science & Technology. 21, pp.9.
105. M. Bennett, J., (1964) "Precise Method for Measuring the Absolute Phase Change on Reflection", OSA. 54, pp.612-13.
106. M. Knowles, K., (2001) "Electron Microscopy and Analysis", Journal of Microscopy. 203, pp.232-233.
107. Malacara, D. (2007), Optical Shop Testing, 3rd Edition, Wiley-Interscience, Canada.

108. Malacara, D. (2007), Surface Profilers, Multiple Wavelength, and White Light Interferometry, Wiley-Interscience, United States of America.
109. Mc Mullan, D., (2006) "Scanning electron microscopy 1928-1965", Scanning. 17, pp.175-11.
110. Miks, A., J. Novak, P. Novak, (2006) "Colorimetric method for phase evaluation", Journal of the Optical Society of America. 23, pp.894-901.
111. Ming-Hsing Shen, C.-H.H., Wei-Chung Wang, (2014) "Center Wavelength Measurement Based on Higher Steps PhaseShifting Algorithms in White-Light Scanning Interferometry", Procedia Engineering. 79, pp.447-455.
112. Minsky, M. (1961), Microscopy apparatus, United States Patent, 3013467.
113. Mirau, A.H. (1952), Interferometer, United States Patent, 2612074
114. Mitsui, K., (1986) "In-proces sensors for surface roughness and their applications", Precision Engineering. 8, pp.212-220.
115. Montgomery, P., F. Anstotz, G. Johnson, R. Kiefer, (2007) "Real time surface morphology analysis of semiconductor materials and devices using 4D interference microscopy", J Mater Sci: Mater Electron. 19, pp.194-198.
116. N, B. (1982), Optical System for Surface Topography Measurement, United States Patent, 4,340,306
117. Nägele, D.T., (2008) "White Light LEDs –Importance of Accepted Measurement Standards", Instrument Systems GmbH. (10), pp.1-5.
118. Nhue Nguyen Phan, Hai Hoang Le, Dung Chi Duong, (2019) "Surface curvature measurement of microlenses using a white-light interference microscope and fast geometric fit algorithm", Opt. Eng. 58, (12), pp.124105.



119. Nhue Nguyen Phan, Hai Hoang Le, Dung Chi Duong, Duong Van Ta, (2019) "Measurement of nanoscale displacements using a Mirau white-light interference microscope and an inclined flat surface", *Optical Engineering*. 58, (6), pp.1-6, 6.
120. Nhue Phan Nguyen, Hai Le Hoang, Dung Duong Chi, (2019) "Measuring optical coating thickness using a single shot white light interference pattern", *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật, Học viện KTQS*. Số 189, pp.19-27.
121. Nielsen, H.S., (1991) "The effects of calibration in surface roughness measurements", *Measurement*. 9, (3), pp.111-114.
122. Ogien, J., A. Dubois, (2016) "High-resolution full-field optical coherence microscopy using a broadband light-emitting diode", *Optics Express*. 24, (9), pp.9922-9931.
123. Oldenbourg, R., M. Shribak (2010), "Microscopes". pp.28.1-28.62.
124. Olivieri, F., et al., (2016) "Fabrication of polymer lenses and microlens array for lab-on-a-chip devices", *Optical Engineering*. 55, pp.081319-16.
125. Peter de Groot, L.D.a.V.B., (2017) "Limits to resolution in optical dimensional metrology", Zygo Corporation, Middlefield, CT USA.
126. Peter de Groot, X.C.d.L., Jim Kramer, and Michael Turzhitsky, (2002) "Determination of fringe order in white-light interference microscopy", *Applied Optics*. 41, pp.4571-8.
127. Pfrtner, A., J. Schwider, (2002) "Dispersion Error in White-Light Linnik Interferometers and its Implications for Evaluation Procedures", *Applied Optics*. 40, pp.6223-8.
128. Quan, C., C. Jui Tay, I. Reading, (2006) "Study on the use of white light interferometry for multifiber-end surface profile measurement", *Optical Engineering*. 45, (5), pp.9.

129. R Corle, T., C.-H. Chou, G. S Kino, (1987) "Depth response of confocal optical microscopes", *Optics Letters*. 11, pp.770-2.
130. R. Corle, T., (1997) "Confocal Scanning Optical Microscopy and Related Imaging Systems", *Optical Engineering*. 36, (6), pp.1821-1822.
131. Richard Leach (auth.), R.L.e., (2013) "Characterisation of Areal Surface Texture", Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
132. S. Lee, B., T. C. Strand, (1990) "Profilometry with a Coherence Scanning Microscope", *Applied Optics*. 29, pp.3784-8.
133. Sandoz, P., (1996) "An algorithm for profilometry by white light phase shifting interferometry", *Modern Optics*. 43, pp.1545-1554.
134. Sandoz, P., (1997) "Wavelet transform as a processing tool in white-light interferometry", *Optics Letters*. 22, pp.1065-7.
135. Sandoz, P., R. Devillers, A. Plata, (1997) "Unambiguous profilometry by fringe-order identification in white-light phase-shifting interferometry", *Journal of Modern Optics*. 44, pp.519-534.
136. Saraç, Z., A. Dursun, S. Yerdelen, F. Necati Ecevit, (2005) "Wavelet phase evaluation of white light interferograms", *IOP Publishing*. 16, pp.1878.
137. Sarid, D., D. Iams, V. Weissenberger, L. Stephen Bell, (1988) "Compact scanning-force microscope using a laser diode", *Optics Letters*. 13, pp.1057-9.
138. Sawatari, T., R.B. Zipin, (1979) "Optical Profile Transducer", *Optical Engineering*. 18, pp.4.
139. Schmit, J., F. Serry (2006), "Characterization and Measurement of Microcomponents with the Atomic Force Microscope (AFM)", *Optical Inspection of Microsystems*. pp.121-143. Taylor & Francis Group, 270, Madison Avenue , NewYork.

140. Schneir, J., et al., (1989) "Scanning Tunneling Microscopy Of Optical Surfaces", SPIE. 1164, pp.112-10.
141. Schreiber, H., J. H. Bruning (2007), "Phase Shifting Interferometry", Field Guide to Interferometric Optical Testing. FG10, pp.547-666. SPIE Publications, Washington, USA.
142. Sheppard, C., T. Wilson, (1981) "The theory of the direct-view confocal microscope", Journal of Microscopy. 124, pp.107-117.
143. Sinzinger, S., J. Jahns (2003), Microoptics, 2nd, Revised and Enlarged Edition, Wiley-VCH, Weinheim.
144. Srinivasan, V., H.C. Liu, M. Halioua, (1984) "Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects", Applied Optics. 23, (18), pp.3105-3108.
145. Suematsu, M., M. Takeda, (1991) "Wavelength-shift interferometry for distance measurements using the Fourier transform technique for fringe analysis", Applied Optics. 30, (28), pp.4046-4055.
146. T Blunt, R., (2006) "White Light Interferometry—a production worthy technique for measuring surface roughness on semiconductor wafers", CS MANTECH Conference,. pp.59-4.
147. Tiziani, H.J., H.-M. Uhde, (1994) "Three-dimensional analysis by a microlens-array confocal arrangement", Applied Optics. 33, (4), pp.567-572.
148. Tsukada, M., et al. (2011), Theory of Non-Contact Atomic Force Microscopy, Springer, Berlin.
149. Upputuri, P.K., M. Pramanik, K. Mohan Nandigana, M. Prasad Kothiyal, (2016) "Multi-colour microscopic interferometry for optical metrology and imaging applications", Optics and Lasers in Engineering. 84, pp.10-25.

150. Vo, Q., F. Fang, X. Zhang, H. Gao, (2017) "Surface recovery algorithm in white light interferometry based on combined white light phase shifting and fast Fourier transform algorithms", *Applied Optics*. 56, pp.8174-8185.
151. Wang, S., et al. (2017), *Hysteresis Modeling and Control of Piezoelectric Actuator*, Tampa, Florida, USA.
152. Whitehouse, D.J., (1997) "Surface metrology", *Measurement Science and Technology*. 8, (9), pp.955.
153. Whitehouse, D.J. (2002), *Handbook of Surface and Nanometrology*, CRC Press, Florida, USA.
154. Windecker, R., M. Fleischer, H. J. Tiziani, (1999) "White-light interferometry with an extended zoom range", *Journal of Modern Optics*. 46, pp.1123-1135.
155. Windecker, R., M. Fleischer, K. Körner, H. Tiziani, (2001) "Testing micro devices with fringe projection and white-light interferometry", *Optics and Lasers in Engineering*. 36, pp.141-154.
156. Windecker, R., H.J. Tiziani, (1999) "Optical roughness measurements using extended white-light interferometry", *Optical Engineering*. 38, (6), pp.1081-1087, 7.
157. Wu, J., et al., (2017) "Nano step height measurement using an optical method", *Sensors and Actuators*. 257, pp.92-97.
158. Wyant, J., (2002) "White Light Interferometry", *Proc. SPIE*. 4737, pp.98-107.
159. Wyant, J.C., K. Creath, (1992) "Advances in interferometric optical profiling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 32, (1), pp.5-10.

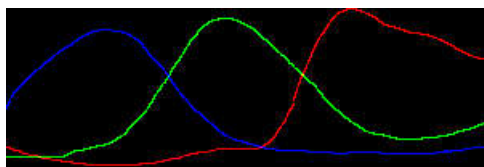
160. Xu, D., et al., (2018) "Development of a Nonresonant Piezoelectric Motor With Nanometer Resolution Driving Ability", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 23, (1), pp.444-451.
161. Yatagai, T., (1994) "Recent progress in white-light interferometry", *International Conference on Interferometry '94*. 2340, pp.338-345.
162. Yesudasan, S., (2015) "Fast Geometric Fit Algorithm for Sphere Using Exact Solution", *arXiv:1506.02776v1*.
163. Yoshizawa, T. (2009), *Handbook of Optical Metrology: Principles and Applications*, CRC Press, United States of America
164. Yuan, W., L. Li, W.-B. Lee, C.-Y. Chan, (2018) "Fabrication of Microlens Array and Its Application: A Review", *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 31, pp.9.
165. Yuen Kuan Yong, M., IEEE, and Andrew J. Fleming, Member, IEEE, (2015) "Piezoelectric Actuators With Integrated High-Voltage Power Electronics", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 20, (2), pp.611 - 617.
166. Zhong, Q., D. Inniss, K. Kjoller, V.B. Elings, (1993) "Fractured polymer/silica fiber surface studied by tapping mode atomic force microscopy", *Surface Science Letters*. 290, (1), pp.L688-L692.
167. Zhou, Y., et al., (2017) "Dimensional metrology of smooth micro structures utilizing the spatial modulation of white-light interference fringes", *Optics and Laser Technology*. 93, pp.187-193.
168. Schmit, J., A. Olszak, (2002) "High-precision shape measurement by white-light interferometry with real-time scanner error correction", *Applied Optics*. 41, (28), pp.5943-5950.

## PHỤ LỤC

### I. Chương trình MathCad mô phỏng sự hình thành vân giao thoa ánh sáng trắng

#### 1. Xác định độ nhạy của cảm biến ảnh:

$S_{ccd} := \text{READRGB}("2.bmp")$



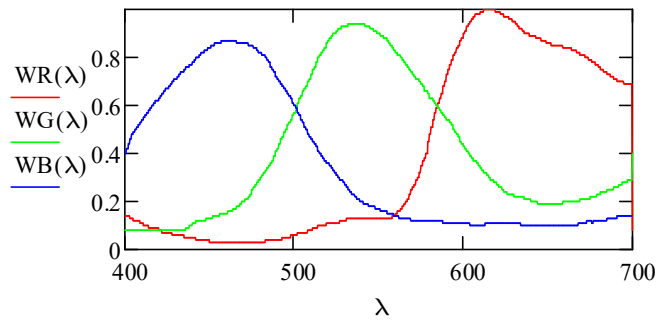
$S_{ccd}$

$$\text{WR}(\lambda) := \left| \begin{array}{l} \text{mt} \leftarrow \text{submatrix}(S_{ccd}, 0, 99, \text{trunc}(\lambda - 400), \text{trunc}(\lambda - 400)) \\ \text{a} \leftarrow (100 - \text{match}(\text{max}(\text{mt}), \text{mt})) \\ \frac{\text{a}_0}{100} \end{array} \right.$$

$$\text{WG}(\lambda) := \left| \begin{array}{l} \text{mt} \leftarrow \text{submatrix}(S_{ccd}, 0, 99, \text{trunc}(\lambda - 100), \text{trunc}(\lambda - 100)) \\ \text{a} \leftarrow (100 - \text{match}(\text{max}(\text{mt}), \text{mt})) \\ \frac{\text{a}_0}{100} \end{array} \right.$$

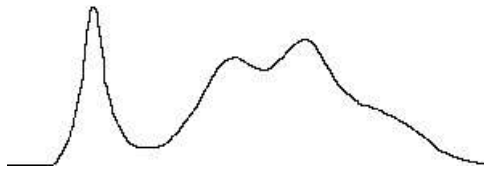
$$\text{WB}(\lambda) := \left| \begin{array}{l} \text{mt} \leftarrow \text{submatrix}(S_{ccd}, 0, 99, \text{trunc}(\lambda + 200), \text{trunc}(\lambda + 200)) \\ \text{a} \leftarrow (100 - \text{match}(\text{max}(\text{mt}), \text{mt})) \\ \frac{\text{a}_0}{100} \end{array} \right.$$

Độ nhạy phổ của cảm biến



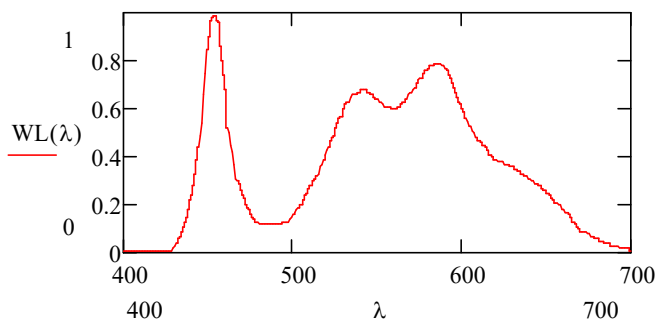
## 2. Phổ phát xạ của LED trắng

```
Wled := READRGB("WhiteLEDDo.bmp")
```



Wled

```
WL(λ) := | mt ← submatrix(Wled, 0, 99, trunc(λ - 400), trunc(λ - 400))
          | a ← (100 - match(min(mt), mt))
          |  $\frac{a_0}{100}$ 
```

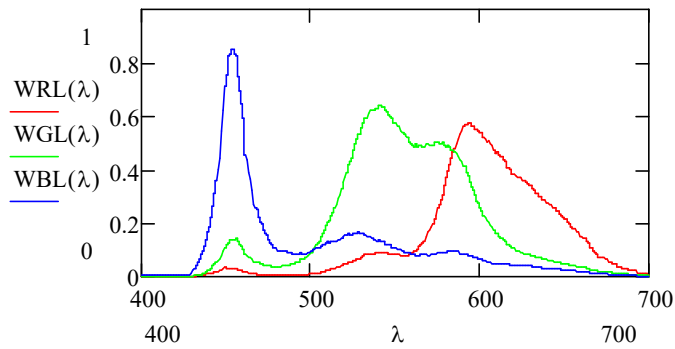


## 3. Tổng hợp trọng số mức tín hiệu tại cảm biến khi sử dụng nguồn sáng LED

$$\text{WRL}(\lambda) := \text{WL}(\lambda) \text{WR}(\lambda)$$

$$\text{WGL}(\lambda) := \text{WL}(\lambda) \text{WG}(\lambda)$$

$$\text{WBL}(\lambda) := \text{WL}(\lambda) \text{WB}(\lambda)$$



## 5. Thông số hệ thống giao thoa ánh sáng trắng:

Vật kính hiển vi giao thoa Mirau:

$$C_1 := 1$$

$$\text{NA} := 0.4$$

$$\lambda := 578$$

$$\theta_0 := \text{asin}(\text{NA}) = 0.412$$

$$k := 2 \frac{\pi}{\lambda}$$

$$\Phi := 0$$

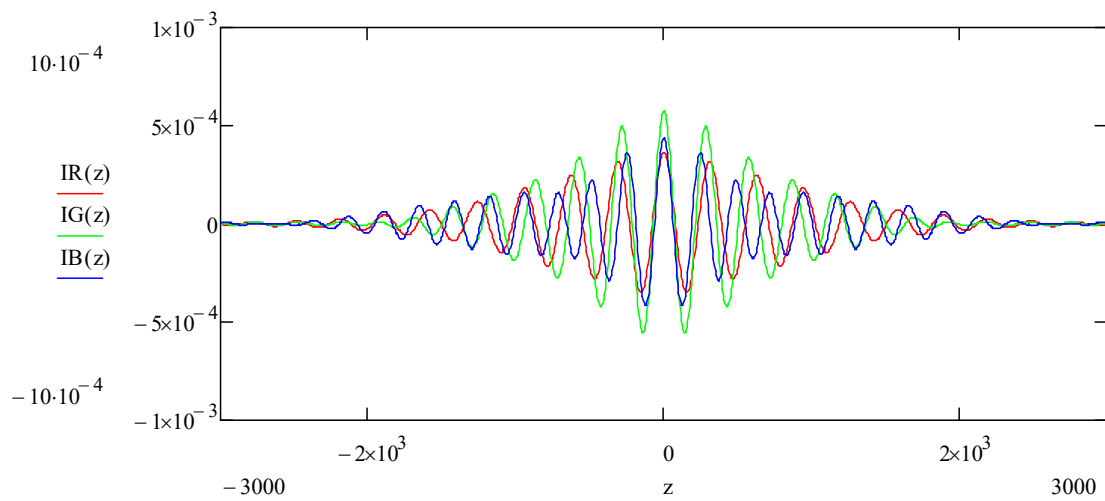
$$I(z, \lambda) := \int_0^{\theta_0} \left( 2 \frac{\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot \cos \left[ 2 \left( 2 \frac{\pi}{\lambda} \right) \cdot z \cdot \cos(\theta) + \Phi \right] \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \, d\theta$$

$$\text{IR}(z) := \int_{400}^{700} \text{WRL}(\lambda) \cdot \int_0^{\theta_0} \left( 2 \frac{\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot \cos \left[ 2 \left( 2 \frac{\pi}{\lambda} \right) \cdot z \cdot \cos(\theta) + \Phi \right] \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \, d\theta \, d\lambda$$



$$IG(z) := \int_{400}^{700} WGL(\lambda) \cdot \int_0^{\theta_0} \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot \cos \left[ 2 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) \cdot z \cdot \cos(\theta) + \Phi \right] \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \, d\theta \, d\lambda$$

$$IB(z) := \int_{400}^{700} WBL(\lambda) \cdot \int_0^{\theta_0} \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot \cos \left[ 2 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) \cdot z \cdot \cos(\theta) + \Phi \right] \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \, d\theta \, d\lambda$$



```
RZ := | for i ∈ 0..6400
      |   RZi ← IR(i)
      | RZ
```

```
GZ := | for i ∈ 0..6400
      |   RZi ← IG(i)
      | RZ
```

```
BZ := | for i ∈ 0..6400
      |   RZi ← IB(i)
      | RZ
```

$$\text{map}(\text{mt}) := \left| \begin{array}{l} \text{solon} \leftarrow \max(\text{GZ}) \\ \text{sonho} \leftarrow \min(\text{GZ}) \\ \text{tl} \leftarrow \frac{\text{solon} - \text{sonho}}{255} \\ \text{trunc}\left(\frac{\text{mt} - \text{sonho}}{\text{tl}}\right) \end{array} \right.$$

$$\text{RZ} := \text{map}(\text{RZ})$$

$$\text{GZ} := \text{map}(\text{GZ})$$

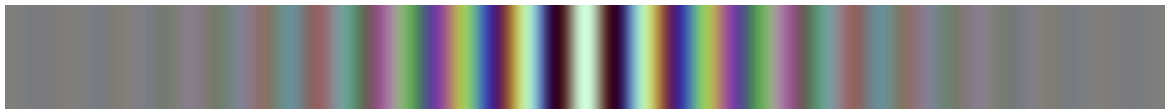
$$\text{BZ} := \text{map}(\text{BZ})$$

6. Tạo hình ảnh giao thoa từ bề mặt đặt trung bằng ma trận hai chiều có độ cao  $h(x,y)$

$$\text{WLI3}(\text{mt}) := \left| \begin{array}{l} \text{M} \leftarrow \text{cols}(\text{mt}) \\ \text{N} \leftarrow \text{rows}(\text{mt}) \\ \text{for } x \in 0..M-1 \\ \quad \text{for } y \in 0..N-1 \\ \quad \quad \left| \begin{array}{l} i \leftarrow \text{trunc}( \text{mt}_{y,x} ) \\ i \leftarrow 6400 \text{ if } i \geq 6400 \\ \text{IMG}_{y,x} \leftarrow \text{RZ}_i \\ \text{IMG}_{y,x+M} \leftarrow \text{GZ}_i \\ \text{IMG}_{y,x+2 \cdot M} \leftarrow \text{BZ}_i \end{array} \right. \\ \text{IMG} \end{array} \right.$$

7. Tạo mặt phẳng nghiêng và mô phỏng hình ảnh giao thoa

$$\text{WLI3}(\text{mt}) := \left| \begin{array}{l} \text{M} \leftarrow \text{cols}(\text{mt}) \\ \text{N} \leftarrow \text{rows}(\text{mt}) \\ \text{for } x \in 0..M-1 \\ \quad \text{for } y \in 0..N-1 \\ \quad \quad \left| \begin{array}{l} i \leftarrow \text{trunc}( \text{mt}_{y,x} ) \\ i \leftarrow 6400 \text{ if } i \geq 6400 \\ \text{IMG}_{y,x} \leftarrow \text{RZ}_i \\ \text{IMG}_{y,x+M} \leftarrow \text{GZ}_i \\ \text{IMG}_{y,x+2 \cdot M} \leftarrow \text{BZ}_i \end{array} \right. \\ \text{IMG} \end{array} \right.$$



WLI3(mpn(1deg))

Hình ảnh vân giao thoa của mặt phẳng nghiêng 1 độ

### 9. Tạo mặt cầu lõm và mô phỏng hình ảnh giao thoa:

Ma tran mat cau loi

kich thuoc 1280x720

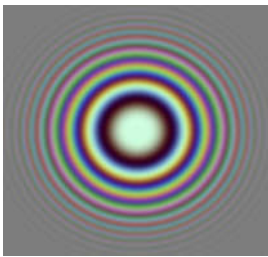
X := X - 640

Y := Y - 360

```
MatCau(R, z) :=
  M ← 400
  N ← 400
  for x ∈ 0..M - 1
    for y ∈ 0..N - 1
      iy,x ← trunc  $\sqrt{R^2 - 250^2(x - 200)^2 - 250^2(y - 200)^2} - R + z$ 
    i
```

mc := MatCau(500000, 10)

Anh := WLI3(mc)



Anh

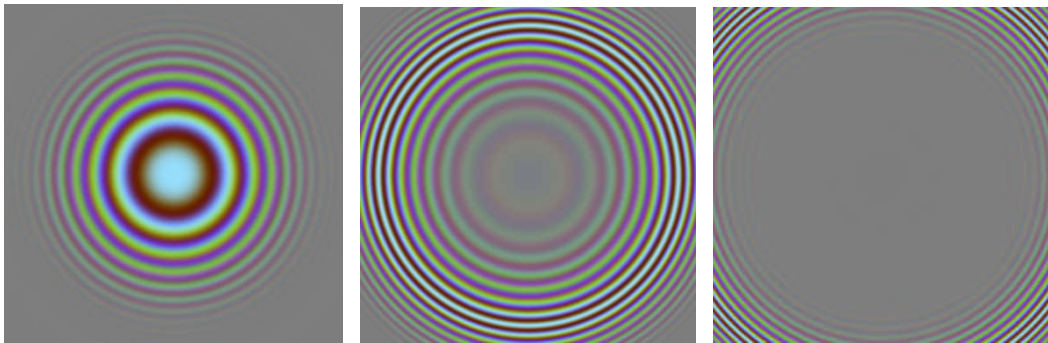
10. Tạo 400 hình ảnh giao thoa đối với mặt cầu bán kính 0.5mm; các hình ảnh cách nhau 20 nano, vị trí bắt đầu từ -2000nano đến 6000 nano

```

Tao(ok) :=
  for i ∈ 0..400
  |
  | z ← -2000 + i·20
  | mc ← MatCau(500000, z)
  | anh ← WLI3(mc)
  | ten ← concat("C:\KetQuaThiNghiem\AnhMoPhong\AnhMatCauLEDCCD\", num2str(i), ".bmp")
  | WRITERGB(ten, anh)
  |
  i

```

Kết quả tạo hình ảnh giao thoa thứ 100, 200, 300



## II. Chương trình xác định thị giới và hiệu chỉnh kích thước ngang của hệ hiển vi giao thoa ánh sáng trắng

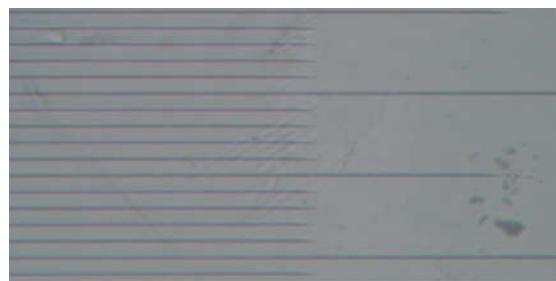
### 1. Đọc ảnh đầu vào

```
AnhNgang := READRGB("AnhNgang.jpg")
```

```
AnhDoc := READRGB("AnhDoc.jpg")
```



AnhNgang

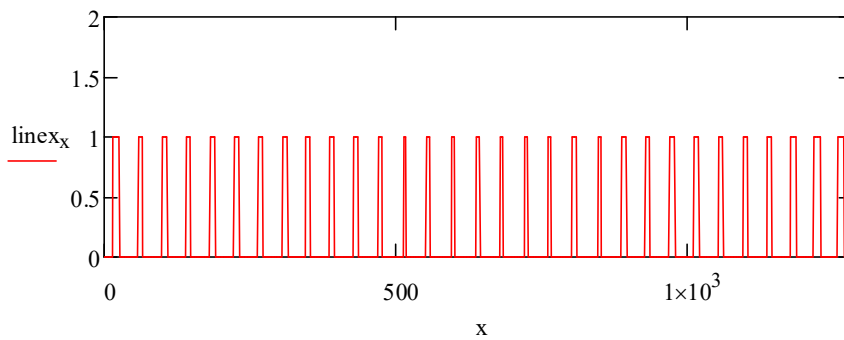


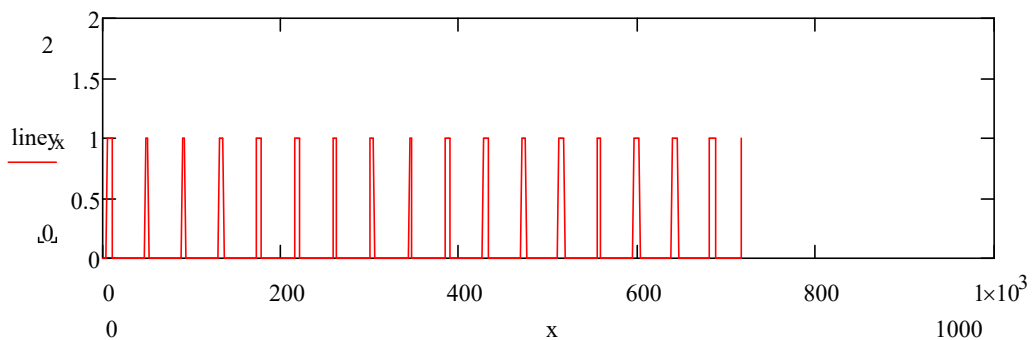
AnhDoc

## 2. Xác định đường cắt ngang

$$\text{Line}(y) := \begin{cases} \text{for } i \in 0.. \frac{\text{cols}(\text{AnhNgang})}{1} - 3 \\ \quad \text{tb} \leftarrow \frac{1 \cdot (\text{AnhNgang}_{y,i} + \text{AnhNgang}_{y,i+1} + \text{AnhNgang}_{y,i+2})}{3} \\ \quad L_i \leftarrow 0 \text{ if } \text{tb} > 133 \\ \quad L_i \leftarrow 1 \text{ otherwise} \\ L \end{cases}$$

linex := Line(630)



$$\text{Line2}(x) := \begin{cases} \text{for } i \in 0.. \text{rows}(\text{AnhDoc}) - 3 \\ \quad \text{tb} \leftarrow \frac{(\text{AnhDoc}_{i,x} + \text{AnhDoc}_{i+1,x} + \text{AnhDoc}_{i+2,x})}{3} \\ \quad L_i \leftarrow 0 \text{ if } \text{tb} > 120 \\ \quad L_i \leftarrow 1 \text{ otherwise} \\ L \end{cases}$$


## 3. Xác định khoảng cách trung bình giữa các vạch

```

Xunglen := | cs ← 0
            | kc0 ← 0
            | for i ∈ 0..  $\frac{\text{cols}(\text{AnhNgang})}{1} - 4$ 
            | | Ai ← 1 if linexi = 0 ∧ linexi+1 ≥ 1
            | | Ai ← 0 otherwise
            | | if Ai = 1
            | | | cs ← cs + 1
            | | | kccs ← i
            | | | dtcs ← kccs - kccs-1
            | dt

```

```

kc := | tong ← 0 = 41.467
      | m ← 0
      | for i ∈ 2.. length(Xunglen) - 1
      | | tong ← tong + Xungleni
      | | m ← m + 1
      |  $\frac{\text{tong}}{m}$ 

```

```

Xunglen := | cs ← 0
            | kc0 ← 0
            | for i ∈ 0.. rows(AnhDoc) - 4
            | | Ai ← 1 if linexi = 0 ∧ linexi+1 ≥ 1
            | | Ai ← 0 otherwise
            | | if Ai = 1
            | | | cs ← cs + 1
            | | | kccs ← i
            | | | dtcs ← kccs - kccs-1
            | dt

```

$$kcdoc := \left| \begin{array}{l} \text{tong} \leftarrow 0 \\ \text{m} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 2.. \text{length}(\text{Xunglen}) - 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{tong} \leftarrow \text{tong} + \text{Xunglen}; \\ \text{m} \leftarrow \text{m} + 1 \end{array} \right. \\ \text{tong} \\ \text{m} \end{array} \right. = 41.438$$

#### 4. Xác định kích thước pixel

$$\text{Pixel} := \frac{10000 \cdot 2}{(kc + kcdoc)} = 240.086$$

### III. Code chương trình phục hồi 3D bề mặt bằng kỹ thuật làm khớp

```
% Fitting Algorithm - Thuật toán làm khớp
clc;
clear all;
close all hidden

% Lấy dữ liệu-----
h=hgload('LD.fig');
get(h);
ch=get(h,'Children');
l=get(ch,'Children');
y = get(l,'Ydata');
x = get(l,'Xdata');
y1 = y{1};x1 = x{1};
y2 = y{2};x2 = x{2};
y3 = y{3};x3 = x{3};
y4 = y{4};x4 = x{4};
y5 = y{5};x5 = x{5};
y6 = (y1+y1+y3+y4+y5)/5;
% Plot fit with data.
figure('Name','PZT');

%Lượng dịch chuyển
id= x5;
pos = y6;
```

```

plot(id,pos,'m','LineWidth',2);
%plot(x1,y1);
%legend( h, 'The signal of real images', 'The matching
function', 'Location', 'NorthEast' );
% Label axes
ylabel 'Displacement (\mum) '
xlabel 'Voltage (V) '
axis([0 500 0 8000])
%grid minor
set(gca,'XTick',0:50:500)
set(gca,'YTick',0:500:8000)
%-
%D?ng hình 3D
%% Picture Input
thumuc = 'D:\KQ-10-12-2018\8';
%thumuc = 'D:\KQ-10-12-2018\1';
folder = dir([thumuc,'*.jpg']);
Npicture=size(folder,1);
Nx=720;
Ny=1280;

%% Cycle input picture
I=zeros(Npicture,Nx,Ny);
for i=1:Npicture
    fullpath=[thumuc,'\',int2str(i-1),'.jpg'];
    RGB = imread(fullpath);
    grayImage = rgb2gray(RGB);
    I(i, :, :) =medfilt2(grayImage,[3,3]);
end

%Chon vung du lieu can phuc hoi
%I = I(:,1:720,1:1280);
I = I(:,450:500,290:490);
[sz1,sz2,sz3] = size(I);

%Lay tin hieu giao thoa cu 1 diem
i =10;
j=10;
Cs = I(:,i,j);
CsTB = smooth(Cs,25);
CsL = Cs - CsTB;
%Xac dinh vi tri max va min
[Ma,idma] = max(CsL);
[Mi,idmi] = min(CsL);

```



```

delta =100;
% Set up fitype and options.
ft      =      fitype(      'DC+A*(exp(-(x-b)*(x-
b)/(c)))*cos(2*pi*f*x+phi)',      'independent',      'x',
'dependent', 'y' );
opts = fitoptions( 'Method', 'NonlinearLeastSquares'
);
opts.Display = 'Off';
opts.Robust = 'LAR';
if (Ma - Mi>10)
    %V? tri tuong phan lon nhat
    tam =round((idma+idmi)/2);
    %tim toa do theo phuong phap lam khop
    %Tinh toan lai delta (vung lay du lieu de lam
khop)
    if ((tam<=delta) || (tam > Npicture-delta))
        if (tam<=delta)
            delta = tam -1;
        end
        if (tam > Npicture-delta)
            delta = Npicture - tam ;
        end
    end
    %Lay du lieu lam khop
    Cs2 = CsL(tam-delta:tam+delta,1,1);
    Cs2 = smooth(Cs2); %Lam min tin hieu
    try
        %Lam khop tin hieu
        opts.Lower = [10 -10 delta-25 1000 -Inf -
Inf];
        opts.StartPoint = [50 0.694828622975817
delta 1500 0.05 0.4387];
        opts.Upper = [120 10 delta+25 2000 Inf Inf];
        % tim toa do theo phuong pha FIT duong cong
        [xData, yData] = prepareCurveData( [], Cs2
);
        % Fit model to data.
        [fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft,
opts );
        yfitted = feval(fitresult,xData);
        [ypk,idxTho] = max(yfitted);
        yfitted      =      feval(fitresult,[idxTho-
1:0.001:idxTho+1]);

```

```

        [ypk,idxTinh] = max(yfitted);
        ViTriMax = idxTho-1+idxTinh*0.001;

        Height(i,j) = tam - delta + ViTriMax;
        %Noi suy ra gia tri thuc
        Topo(i,j) = interp1(id,y6,Height(i,j));

        %delta = floor(0.5/fitresult.f+1);
    catch
    end
end

for i = 1:sz2
    for j =1:sz3
        Cs = I(:,i,j);
        CsTB = smooth(Cs,25);
        CsL = Cs - CsTB;
        %Xac dinh vi tri max va min
        [Ma,idma] = max(CsL);
        [Mi,idmi] = min(CsL);
        delta =100;
        if (Ma - Mi>10)
            %V? tri tuong phan lon nhat
            tam =round((idma+idmi)/2);
            %tim toa do theo phuong phap lam khop
            %Tinh toan lai delta (vung lay du lieu de lam
khop)

            if ((tam<=delta) || (tam > Npicture-delta))
                if (tam<=delta)
                    delta = tam -1;
                end
                if (tam > Npicture-delta)
                    delta = Npicture - tam ;
                end
            end
            end
            %Lay du lieu lam khop
            Cs2 = CsL(tam-delta:tam+delta,1,1);
            Cs2 = smooth(Cs2); %Lam min tin hieu
            try
                %Lam khop tin hieu
                opts.Lower = [10 -10 delta-25 1000 -Inf
-Inf];

```

```

        opts.StartPoint = [50 0.694828622975817
delta 1500 0.05 0.4387];
        opts.Upper = [120 10 delta+25 2000 Inf
Inf]; % tim toa do theo phuong pha FIT duong cong
        [xData, yData] = prepareCurveData( [],
Cs2 );

        % Fit model to data.
        [fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft,
opts );

        yfitted = feval(fitresult,xData);
        [ypk,idxTho] = max(yfitted);
        yfitted      =      feval(fitresult,[idxTho-
1:0.001:idxTho+1]);
        [ypk,idxTinh] = max(yfitted);
        ViTriMax = idxTho-1+idxTinh*0.001;

        Height(i,j) = tam - delta + ViTriMax;
        %Noi suy ra gia tri thuc
        Topo(i,j) = interp1(id,y6,Height(i,j));
    catch
    end
end
end
end

figure(1)
mesh(Topo);

```

**IV. Ảnh chụp kết quả đo chiều dày màng bằng hiển vi lực nguyên tử  
Enviroscope của Hãng Brüker (tại Phòng thí nghiệm Kỹ thuật Điện và  
Điện tử Paris - Geeps)**

