



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาระบบการวัดความเรียบพื้นผิวด้วยอินเตอร์เฟอริทรีแบบไมเคิลสัน

Development of Surface Roughness Measurement System based on
Michelson Interferometry

นางสาว ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณ 2559

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาระบบการวัดความเรียบพื้นผิวด้วยอินเตอร์เฟอริทรีแบบไมเคิลสัน

Development of Surface Roughness Measurement System based on
Michelson Interferometry

นางสาว ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

สงขทะเบียน 145942
ในเคือบง 11 ไลย. 2560

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2559

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ	การพัฒนากระบวนการวัดความเรียบพื้นผิวด้วยอินเตอร์เฟอโรเมทรีแบบไม่เคลสสัน		
แหล่งเงิน	เงินรายได้		
ประจำปีงบประมาณ	2559	จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน	50,000 บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย	1 ปี	ตั้งแต่	ต.ค. 2558 ถึง ก.ย. 2559
หัวหน้าโครงการ	นางสาว ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี สังกัด ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล.		

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาระบบอินเตอร์เฟอโรเมเตอร์แบบไม่เคลสสันร่วมกับเทคนิคการเลื่อนเฟสเพื่อทำการวัดความเรียบพื้นผิวของแก้วสไลด์ที่ใช้กันโดยทั่วไปในกระบวนการการเคลือบฟิล์มพร้อมด้วยโปรแกรมการประเมินค่าโครงสร้างของพื้นผิวจากรีวการแทรกสอด ในระบบอินเตอร์เฟอโรเมเตอร์มีกระจกความเรียบ $\lambda/20$ เป็นกระจกอ้างอิงซึ่งติดตั้งอยู่บนแท่นเลื่อนที่ถูกขับเคลื่อนด้วยผลึกเพียโซ อินเตอร์เฟอแกรมจะถูกบันทึกภาพด้วยกันทั้งหมด 5 เฟรม ได้แก่ตำแหน่งที่ทำการเลื่อนกระจกแล้วทำให้ความต่างเฟสของลำแสงทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $0, \lambda/2, \lambda, 3\lambda/2$ และ 2λ ภาพจะถูกบันทึกด้วยกล้อง CCD ที่ตำแหน่งของพิกเซลทุกตำแหน่งจากทั้ง 5 เฟรม จะถูกนำมาคำนวณหาความค่าความเข้มแสง หลังจากนั้นค่าความเข้มที่ตำแหน่งพิกเซลเดียวกันจะถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าความต่างเฟสของลำแสงอ้างอิงกับลำแสงที่มาจากกระจกทดสอบ โดยค่าความต่างเฟสดังกล่าวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสูงของพื้นผิวทดสอบซึ่งอ้างอิงจากความสูงของพื้นผิวอ้างอิง โดยพื้นผิวกระจกทดสอบที่ทราบค่าความเรียบ $\lambda/20$ และ จะทำให้เกิดภาพรีวการแทรกสอดจากอินเตอร์เฟอแกรมทั้ง 5 เฟรม ที่เกิดจากผลการประเมินค่าโครงสร้างของพื้นผิวทดสอบที่มีความเรียบ $\lambda/2$ ด้วยระบบอินเตอร์เฟอโรเมเตอร์พร้อมด้วยโปรแกรมที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นมาพบว่า ค่าโครงสร้างของพื้นผิวที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการวัดที่ได้จากเครื่องวัดค่าโครงสร้างทางการค้า และ ผลการวัดค่าโครงสร้างพื้นผิวของกระจกสไลด์ 2 แผ่น ซึ่งมีสีที่ต่างกัน พบว่า รีวการแทรกสอดของกระจกแผ่นแรกมีความไม่เป็นระเบียบ ในขณะที่รีวการแทรกสอดของกระจกแผ่นที่ 2 มีค่าโครงสร้างเป็นแบบอานม้า และเมื่อนำอินเตอร์เฟอแกรมมาวิเคราะห์ พบว่า พื้นผิวของกระจกแผ่นแรกมีความหยาบผิวเฉลี่ยรากที่สองและเฉลี่ยเป็น 571.1 ± 7.3 และ 448.8 ± 6.6 นาโนเมตร ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยรากที่สองและเฉลี่ยของกระจกแผ่นที่สองมีค่าเป็น 308.2 ± 6.3 และ 244.8 ± 5.8 นาโนเมตร ตามลำดับ

คำสำคัญ: เทคนิคการเลื่อนเฟส, ความหยาบพื้นผิว, ค่าโครงสร้างของพื้นผิว

Research Title Development of Surface Roughness Measurement System based on Michelson Interferometry

Researcher Miss S.Tipawan Khlayboonme
Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ABSTRACT

Phase-shifting interferometry based on Michelson interferometer is purposed to measure surface roughness of glass slides which are widely used as substrates for thin-film coating processes. For the interferometry system, an optical flat with a flatness of $\lambda/20$ is used as a reference mirror. The high accuracy of the phase-shifting is achieved by a piezoelectric-driven linear translation stage of the reference mirror. The reference-phase difference between the two-interfering beams is shifted by every $\lambda/2$ in phase-shifting. Five frames of interferograms under various phase differences of $0, \lambda/2, \lambda, 3\lambda/2$ and 2λ are recorded by a CCD camera. Each image pixel of these frames is interpreted to access interference intensity information by five-step phase-shifting algorithm for phase calculation, which in turn relates to surface height. The purpose-built interferometry is tested by the surfaces of two optical flats with flatness of $\lambda/10$ and $\lambda/4$, which are used as the test surfaces. Our measured flatness results are consistent with those of the commercial optical profilometer. The usefulness of the purpose-built interferometry is demonstrated on two types of the glass slides. Interference patterns of the one show irregular patterns while that of the other one shows astigmatism patterns. The surface profiles and flatness parameters was evaluated from those patterns. The flatness parameters of the one were $R_{rms} = 571.1 \pm 7.3$ and $R_a = 448.8 \pm 6.6$ nm and those of the other one were $R_{rms} = 308.2 \pm 6.3$ and $R_a = 244.8 \pm 5.8$ nm.

Keywords: Phase-shift interferometry, Surface roughness, Surface Profile

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดย การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VII
สารบัญตาราง	XIV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 แผนดำเนินงานวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	5
2.1 ความสำคัญของความเรียบบนพื้นผิวและวิธีการวัด	5
2.1.1 การวัดความหยาบผิวด้วยวิธีการแบบสัมผัส	6
2.1.2 วิธีการวัดความหยาบผิวแบบไม่สัมผัสด้วยการโพกัสของลำแสง	9
2.1.3 วิธีการวัดความเรียบพื้นผิวแบบไม่สัมผัสด้วยการแทรกสอดของลำแสง	10
2.2 การแทรกสอดของแสง	14
2.3 การตรวจสอบทางแสงและอินเตอร์เฟอริมิเตอร์	17
2.3.1 อินเตอร์เฟอริมิเตอร์อย่างง่าย	18
2.3.2 เชียร์ริงอินเตอร์เฟอริมิเตอร์	19
2.3.3 ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์	20
2.4 แหล่งกำเนิดแสง	23
2.4.1 แหล่งกำเนิดแสงประเภทไม่โคฮีเรนต์	23
2.4.2 แหล่งกำเนิดแสงประเภทโคฮีเรนต์ (Coherent light Sources)	23
2.4.3 ความเป็นโคฮีเรนต์	25
2.5 ตัวขยายลำแสง (Beam Expander)	27
2.6 ตัวแยกลำแสง (Beam Splitter)	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 เพียโซอิเล็กทริกซิตี (Piezoelectricity).....	29
2.8 การวิเคราะห์ลวดลายริ้วการแทรกสอด (Fringe Analysis).....	33
2.9 การวิเคราะห์เฟสด้วยเทคนิคการเลื่อนเฟส.....	35
2.9.1 แนวความคิดพื้นฐาน.....	35
2.9.2 วิธีการปรับเลื่อนเฟส (Phase Shifting Methods).....	37
2.9.3 การเก็บข้อมูล (Data Collection).....	39
2.9.4 อัลกอริทึมของอินเตอร์เฟอริเตอร์แบบเลื่อนเฟส (PSI Algorithms).....	41
2.9.5 การคืนรูปเฟส (Phase Unwrapping).....	49
2.9.6 การสอบเทียบการเลื่อนเฟส (Phase Shift Calibration).....	52
2.10 การวิเคราะห์ความหยาบผิว (Analysis of Surface Roughness).....	54
2.10.1 พารามิเตอร์เชิงแอมพลิจูด.....	56
2.10.2 พารามิเตอร์เชิงระยะทาง.....	58
2.10.3 พารามิเตอร์เชิงไฮบริด.....	58
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	60
3.1 ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์.....	61
3.1.1 เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน.....	61
3.1.2 กระจกสะท้อนแสง 45°	62
3.1.3 ตัวขยายลำแสง.....	62
3.1.4 ตัวแยกแสง.....	63
3.1.5 พื้นผิวอ้างอิงความเรียบสูง.....	64
3.1.6 ชุดขับเคลื่อนพื้นผิวอ้างอิง.....	64
3.1.7 พื้นผิวทดสอบ.....	67
3.1.8 กล้อง CCD.....	67
3.2 โปรแกรมประเมินค่าโครงสร้างพื้นผิว.....	67
3.2.1 ภาคส่วนการเตรียมและจัดการภาพอินเตอร์เฟอริแกรม.....	69
3.2.2 ภาคส่วนการคำนวณความสูงของพื้นผิว.....	72
3.2.3 หน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้ offsetwin.fig.....	75
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	79
4.1 ผลทดสอบการใช้งานโปรแกรมวิเคราะห์ และสร้างโครงสร้างสามมิติของพื้นผิว.....	79
4.1.1 สคริปต์ไฟล์ main.m.....	80
4.1.2 สคริปต์ไฟล์ main2.m.....	82
4.1.3 หน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้ offsetwin.fig.....	83

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลของการปรับค่าตัวแปรในโปรแกรมสร้างภาพจำลองโครงสร้างพื้นผิว	84
4.2.1 จำนวนช่วงพิกเซล (Span)	85
4.2.2 ขนาดขอบเขตที่ใช้ตัดขอบภาพอินเตอร์เฟอแกรม	86
4.2.3 ระดับค่าขีดเริ่มสำหรับการปรับสีพื้นหลัง	87
4.3 ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์	87
4.4 การควบคุมระยะกระจัดด้วยชุดขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริก	88
4.5 ค่าโครงสร้างพื้นผิวของ Optical flat $\lambda/4$ และ $\lambda/10$	91
4.5.1 ผลการวัดความเรียบของพื้นผิว Optical flat $\lambda/4$	92
4.5.2 ผลการวัดความเรียบของพื้นผิว Optical flat $\lambda/10$	97
4.6 ผลการวัดความเรียบพื้นผิวของ Microscope Slide	102
4.6.1 อินเตอร์เฟอแกรมของ Microscope Slide A	102
4.6.2 ภาพถ่ายรีจิสเตอร์แทรกสอดของแสงของ Microscope Slide B	107
4.7 ผลการวัดความเรียบของพื้นผิวด้วย Phase-shift interferometer	113
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	115
5.1 สรุปผลการวิจัย	115
5.2 ข้อเสนอแนะ	116
บทที่ 6 สรุปผลผลิต - ชิ้นงาน	117
เอกสารอ้างอิง	119
ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย	124
หัวหน้าโครงการวิจัย	125

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2. 1	โครงสร้างของพื้นผิวที่มีสัดส่วนความลึกกับความกว้าง ค่าต่าง ๆ ที่ถูกประเมินจากการใช้เข็มที่ปลายเข็มมีรัศมีขนาด 25 mm	6
ภาพที่ 2. 2	โครงสร้างและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบ STM	7
ภาพที่ 2. 3	โครงสร้างและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบ AFM	8
ภาพที่ 2. 4	ไมโครสโคปีแบบคอนโฟคอลกำลังแสงที่ไม่ถูกโฟกัสด้วยช่องรับแสงที่มีรูขนาดเล็ก ...	9
ภาพที่ 2. 5	เทคนิค PSI ที่ใช้งานร่วมกับไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์	11
ภาพที่ 2. 6	ลวดลายรี้วการแทรกสอดของแผ่นเรียบเชิงแสง	12
ภาพที่ 2. 7	ความคมชัดของรี้วการแทรกสอดที่เกิดจากพื้นผิวที่มีความขรุขระ เป็นขั้นแต่ละขั้นห่างกันมากกว่า $\lambda/4$ เมื่อใช้แสงสีแดงและแสงสีเขียว	13
ภาพที่ 2. 8	ความคมชัดของตำแหน่งรี้วการแทรกสอดขึ้นอยู่กับการเลื่อนตำแหน่งของพื้นผิว เมื่อระดับความสูงอยู่ในระนาบโฟกัสรี้วการแทรกสอดจะมีความคมชัดสูงสุด	13
ภาพที่ 2. 9	การซ้อนทับของคลื่น y_1 และ y_2	15
ภาพที่ 2. 10	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงสูงสุด เฉลี่ย และ ต่ำที่สุด	16
ภาพที่ 2. 11	ลวดลายรี้วการแทรกสอดที่มีความคมชัดความแตกต่างกัน	17
ภาพที่ 2. 12	การแทรกสอดแบบหักล้างและแบบเสริมสร้างเนื่องจากผลต่างทางเดินแสง	17
ภาพที่ 2. 13	อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์อย่างง่าย	19
ภาพที่ 2. 14	เส้นทางการเดินของแสง 2 ลำ ในเซียมเฟลต	19
ภาพที่ 2. 15	ลวดลายรี้วการแทรกสอดของลักษณะลำแสงขนานและไม่ขนาน ที่เกิดจากเซียมเฟลตอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์	20
ภาพที่ 2. 16	ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์	21
ภาพที่ 2. 17	ตำแหน่งภาพของกระจก M2 แสดงให้เห็นระยะห่างระหว่างกระจก	21
ภาพที่ 2. 18	การเกิดรี้วแทรกสอดจากแหล่งกำเนิดแสงเสมือน	22
ภาพที่ 2. 19	รี้วแทรกสอดที่จุดกึ่งกลางแบบเสริม (ซ้าย) และแบบหักล้าง (ขวา) แสงเดินทางถึง ฉากด้วยระยะทางต่างกัน $\lambda/2$ (กระจกเลื่อนไปเป็นระยะ $\lambda/4$)	22
ภาพที่ 2. 20	การเปล่งแสงและการดูดกลืนแสงของอะตอม	24
ภาพที่ 2. 21	โพรงกำเนิดแสงของเลเซอร์กระจกสองบาน	25
ภาพที่ 2. 22	ความเป็นโคฮีเรนซ์ของลำแสง	26
ภาพที่ 2. 23	(L1-L2) ต้องน้อยกว่า LC จึงจะเกิดการแทรกสอด	26
ภาพที่ 2. 24	Keplerian Beam Expander (ดัดแปลงมาจาก	27
ภาพที่ 2. 25	Galilean Beam Expander (ดัดแปลงมาจาก	27
ภาพที่ 2. 26	(a) ตัวแยกลำแสง [43] และ (b) การแยกลำแสงของตัวแยกลำแสง	28
ภาพที่ 2. 27	ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก	29

สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 2. 28	ปรากฏการณ์เพียวโซอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นในผลึกควอตซ์ เมื่อมีแรงภายนอกกระทำ	29
ภาพที่ 2. 29	ปรากฏการณ์เพียวโซอิเล็กทริกแบบย้อนกลับ	30
ภาพที่ 2. 30	การจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์	31
ภาพที่ 2. 31	ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวัสดุเพียวโซ กับโพลาริเซชันหลังจากเพิ่มและลดสนามไฟฟ้า	31
ภาพที่ 2. 32	ชุดอุปกรณ์ขับเคลื่อนด้วยเพียวโซอิเล็กทริก	32
ภาพที่ 2. 33	องค์ประกอบของชุดอุปกรณ์ขับเคลื่อนเพียวโซอิเล็กทริก และลักษณะการยืดและหดตัวในขณะเพิ่มแรงดันไฟฟ้า และหลังจากลดแรงดันไฟฟ้า.....	33
ภาพที่ 2. 34	วิธีการประเมินภาพอินเตอร์เฟอแกรมด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบดั้งเดิม	34
ภาพที่ 2. 35	การวิเคราะห์ด้วยฟูเรียร์.....	34
ภาพที่ 2. 36	อินเตอร์เฟอเมทรีแบบเลื่อนเฟส.....	35
ภาพที่ 2. 37	การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงของพิกเซลหนึ่งบนอินเตอร์เฟอแกรม ด้วยการเลื่อนเฟสอ้างอิง	37
ภาพที่ 2. 38	วิธีการปรับเลื่อนเฟส	37
ภาพที่ 2. 39 (ต่อ)	วิธีการปรับเลื่อนเฟส	38
ภาพที่ 2. 40	เทคนิคการปรับเลื่อนเฟสเชิงเวลา	39
ภาพที่ 2. 41	(ด้านบน) ภาพอินเตอร์เฟอแกรม 4 เฟรมเมื่อความต่างเฟสเปลี่ยนไปครั้งละ 90° และ (ด้านล่าง) ความเข้มแสง เมื่อสแกนตามเส้นผ่านศูนย์กลางของเฟรม	45
ภาพที่ 2. 42	ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\sin(\alpha)$ กับ ความต่างเฟสที่ถูกเลื่อนไป	48
ภาพที่ 2. 43	ตัวอย่างเฟสซ้อนรูปจากอินเตอร์เฟอแกรม 4 เฟรม.....	50
ภาพที่ 2. 44	การคืนรูปเฟส (a) เฟสซ้อนรูป (b) เฟสถอดรูป	50
ภาพที่ 2. 45	กระบวนการคืนรูปเฟสของ PSI	51
ภาพที่ 2. 46	ขั้นตอนการคืนรูปเฟสในแนวเส้นตรงของเฟสซ้อนรูปที่ได้จากภาพที่ 2.45.....	51
ภาพที่ 2. 47	อินเตอร์เฟอแกรม 5 เฟรม ที่เกิดจากการเลื่อนเฟสครั้งละ $\pi/2$ หรือ 90°	52
ภาพที่ 2. 48	(a) ข้อมูลเฟสมอดูโล 2π (b) ข้อมูลเฟสที่ unwrapped เสร็จเรียบร้อย	52
ภาพที่ 2. 49	ความเข้มแสงแนวเส้นตรงหนึ่งที่ลากผ่านภาพทั้ง 5 เฟรม เมื่อเฟสที่แท้จริงถูกเลื่อนไป 90° และ 97°	53
ภาพที่ 2. 50	แผนภาพฮิสโตแกรมการกระจายข้อมูลของเฟสที่ถูกเลื่อนไป	53
ภาพที่ 2. 51	องค์ประกอบของความหยาบละเอียดพื้นผิว.....	54
ภาพที่ 2. 52	ตัวอย่างเค้าโครงร่างพื้นผิว 3 มิติ ที่มีเพียงความขรุขระและความเป็นลอนบนพื้นผิว พร้อมทั้งแสดงเค้าโครงร่าง 2 มิติ	55
ภาพที่ 2. 53	เค้าโครงร่าง 2 มิติของพื้นผิวที่แตกต่างกันแต่มีค่า Ra เท่ากัน	55

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 2. 54	ความหยาบผิวยอดสูงสุด.....	56
ภาพที่ 2. 55	ความหยาบผิวจุดต่ำสุด.....	56
ภาพที่ 2. 56	ความหยาบผิวจุดสูงสุด-ต่ำสุด	57
ภาพที่ 2. 57	ความหยาบผิวเฉลี่ย	57
ภาพที่ 2. 58	ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง	58
ภาพที่ 2. 59	ความกว้างเฉลี่ยของเค้าโครงความหยาบผิว	58
ภาพที่ 2. 60	พารามิเตอร์ไฮบริด	59
ภาพที่ 2. 61	เค้าโครงร่างของพื้นผิวที่ได้จากการตีความจาก ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์เชิงแอมพลิจูด	59
ภาพที่ 3. 1	ผังการทำงาน	60
ภาพที่ 3. 2	ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์พร้อมชุดขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริก	61
ภาพที่ 3. 3	แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม - นีออน.....	62
ภาพที่ 3. 4	กระจกสะท้อนแสง 45°	62
ภาพที่ 3. 5	ตัวขยายลำแสง ประกอบด้วย เลนส์นูน 2 ชั้น ขนาด 10 mm และ 250 mm วางห่างกัน 260 mm พร้อมด้วยไอริสวางอยู่ระหว่างเลนส์ทั้งสอง.....	63
ภาพที่ 3. 6	Thorlabs- SI500 Shearing Interferometer, 25.4-50 mm Beam Diameter Shearplate.....	63
ภาพที่ 3. 7	Thorlab BS016 Beamsplitter	63
ภาพที่ 3. 8	Ocean Thin Films Optical flat ความเรียบ $\lambda/20$	64
ภาพที่ 3. 9	(a) Piezo-electric actuator และ (b) แท่นเลื่อนพร้อมไมโครมิเตอร์ที่มี Piezo- electric actuator ติดตั้งไว้ภายใน.....	64
ภาพที่ 3. 10	ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้าของ Piezo-electric actuator และ หน้าต่างเชื่อมต่อผู้ใช้งาน	65
ภาพที่ 3. 11	(a) ตัวตรวจวัดความเข้มแสง และ (b) ดิจิตอลมัลติมิเตอร์	65
ภาพที่ 3. 12	ผังการทำงานของชุดคำสั่งควบคุมการทำงานสำหรับการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับ Piezo-electric actuator.....	66
ภาพที่ 3. 13	ผังการทำงานของโปรแกรมการประเมินเค้าโครงร่างจาก PSI	68
ภาพที่ 3. 14	ผังการทำงานของโปรแกรมย่อย main	69
ภาพที่ 3. 15	ภาพเปรียบเทียบภาพสีกับภาพสเกลสีเทาที่ได้จากการแปลง ด้วยวิธีการเฉลี่ยและการถ่วงดุลระดับสี (a) ภาพระดับสี RGB และ ภาพสเกลสีเทาที่ได้จากการแปลงด้วย วิธีการ (b) เฉลี่ย (c) ถ่วงดุล	70
ภาพที่ 3. 16	หน้าต่างสำหรับเลือกขอบเขตภาพภาพอินเตอร์เฟอริแกรม.....	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 3. 17	อินเตอร์โปรแกรมที่ถูกเลือกขอบเขตของภาพแล้วทั้ง 5 เฟรม.....	71
ภาพที่ 3. 18	คลิกเมาส์ครั้งที่ 1 เพื่อกำหนดจุดศูนย์กลางของวงกลม.....	71
ภาพที่ 3. 19	คลิกเมาส์ครั้งที่ 2 เพื่อกำหนดรัศมีของวงกลม.....	72
ภาพที่ 3. 20	ภาพก่อนและหลังการตัดขอบภาพ.....	72
ภาพที่ 3. 21	ผังการทำงานของโปรแกรมย่อย main2.....	73
ภาพที่ 3. 22	ผลของสัญญาณรบกวนที่มีต่อภาพ.....	73
ภาพที่ 3. 23	ภาพก่อน (a) และ หลัง (b) Thersholding.....	74
ภาพที่ 3. 24	อัลกอริทึมการปรับแก้ค่าเฟสจากผลของฟังก์ชันอาร์กแทน.....	74
ภาพที่ 3. 25	Algorithm for Phase unwrapping process.....	75
ภาพที่ 3. 26	เฟสของหน้าคลื่นจากอินเตอร์โปรแกรม 5 เฟรม เมื่อ.....	75
ภาพที่ 3. 27	ภาพหน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้ offsetwin.fig แสดงการจำลองโครงสร้างสามมิติของพื้นผิว.....	76
ภาพที่ 3. 28	ผลการเกลี่ยภาพด้วยคำสั่ง Smooth (a) ก่อนเกลี่ยภาพ และ (b) หลังเกลี่ยภาพ....	76
ภาพที่ 3. 29	ภาพหน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้ pewin.fig แสดงค่าความผิดพลาดในการเลื่อนเฟส.....	77
ภาพที่ 3. 30	ผังการทำงานของโปรแกรมย่อยที่ร่วมกัน จนสามารถวิเคราะห์เค้าโครงร่างพื้นผิวจากรีการแทรกสอด ด้วยเทคนิคการเลื่อนเฟสที่เกิดจากการเรียกโปรแกรมย่อย.....	78
ภาพที่ 4. 1	ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์พื้นผิว.....	79
ภาพที่ 4. 2	ภาพหน้าต่างสำหรับตัดภาพถ่ายแบบสี่เหลี่ยม (a) หน้าจอตัดรูปภาพ (b) ผลลัพธ์จากการตัดรูปภาพ.....	80
ภาพที่ 4. 3	(a) หน้าจอสำหรับตัดภาพถ่ายแบบวงกลม.....	81
ภาพที่ 4. 4	ผลลัพธ์ก่อน (a) และ หลัง (b) ตัดขอบวงกลมของอินเตอร์โปรแกรม.....	81
ภาพที่ 4. 5	ผลลัพธ์จากการเรียกใช้โปรแกรม main2.m (a) เฟส (b) เฟสมอดุโล 2π และ (c) Unwrapped Phase.....	82
ภาพที่ 4. 6	การทำเทรส์โฮลด์เพื่อปรับสีพื้นหลังของภาพ และกำจัดสัญญาณรบกวนเบื้องต้น.....	82
ภาพที่ 4. 7	ภาพหน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้ offsetwin.fig แสดงการจำลองโครงสร้างสามมิติของพื้นผิว.....	83
ภาพที่ 4. 8	ผลการเกลี่ยภาพด้วยคำสั่ง Smooth (a) ก่อนเกลี่ยภาพ และ (b) หลังเกลี่ยภาพ.....	84
ภาพที่ 4. 9	ภาพหน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้ pewin.fig แสดงค่าความผิดพลาดในการเลื่อนเฟส.....	84
ภาพที่ 4. 10	เขียนเพลตอินเตอร์โปรแกรมเตอร์ถูกติดตั้งเข้ากับไมเคลสันอินเตอร์โปรแกรมเตอร์.....	88
ภาพที่ 4. 11	ผลการวัดความขนานของลำแสง เมื่อ (a) เปิดรูรับแสงบางส่วน (b) เปิดรูรับแสงทั้งหมด.....	88

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4. 12	ความเข้มแสงที่พิกเซลหนึ่งบนรีวการแทรกสอด ที่เปลี่ยนตามแรงดันไฟฟ้าของเพียโซ.....	89
ภาพที่ 4. 13	แรงดันไฟฟ้าที่เลื่อนระยะเฟสจาก 0 ถึง 2π เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 20 ถึง 60 V.....	89
ภาพที่ 4. 14	แรงดันไฟฟ้าที่เลื่อนระยะเฟสจาก 0 ถึง 2π เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 40 ถึง 70 V.....	90
ภาพที่ 4. 15	แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับ Piezoelectric ที่มีผลต่อการขับเคลื่อน	90
ภาพที่ 4. 16	แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับ Piezoelectric ที่ใช้เลื่อนระยะเฟสจาก 0 ถึง 2π	91
ภาพที่ 4. 17	กระจกทดสอบความเรียบ $\lambda/4$ ยี่ห้อ Ocean Thin films ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.6 mm.....	92
ภาพที่ 4. 18	อินเตอร์เฟอแกรมของ Optical flat $\lambda/4$ ชุดที่ 1	92
ภาพที่ 4. 19	อินเตอร์เฟอแกรมของ Optical flat $\lambda/4$ ชุดที่ 2	92
ภาพที่ 4. 20	อินเตอร์เฟอแกรมของ Optical flat $\lambda/4$ ชุดที่ 3	93
ภาพที่ 4. 21	การกระจายข้อมูลเฟสที่ถูกเลื่อนไป ในขณะที่ทำการวัดพื้นผิวของ Optical flat $\lambda/4$	93
ภาพที่ 4. 22	ผลการประมวล Interferograms ชุดที่ 1 ของ Optical flat $\lambda/4$	94
ภาพที่ 4. 23	ผลการประเมินความเรียบพื้นผิว Optical flat $\lambda/4$ โดยใช้ Interferograms ชุดที่ 1.....	94
ภาพที่ 4. 24	ผลการประมวล Interferograms ชุดที่ 2 ของ Optical flat $\lambda/4$	94
ภาพที่ 4. 25	ผลการประเมินความเรียบพื้นผิว Optical flat $\lambda/4$ โดยใช้ Interferograms ชุดที่ 2.....	95
ภาพที่ 4. 26	ผลการประมวล Interferograms ชุดที่ 3 ของ Optical flat $\lambda/4$	95
ภาพที่ 4. 27	ผลการประเมินความเรียบพื้นผิว Optical flat $\lambda/4$ โดยใช้ Interferograms ชุดที่ 3.....	96
ภาพที่ 4. 28	Optical flat $\lambda/10$ ยี่ห้อ Ocean Thin films ขนาด \varnothing 25.6 mm.....	97
ภาพที่ 4. 29	อินเตอร์เฟอแกรมของกระจกทดสอบความเรียบ $\lambda/10$ ชุดที่ 1	97
ภาพที่ 4. 30	อินเตอร์เฟอแกรมของกระจกทดสอบความเรียบ $\lambda/10$ ชุดที่ 2.....	97
ภาพที่ 4. 31	อินเตอร์เฟอแกรมของกระจกทดสอบความเรียบ $\lambda/10$ ชุดที่ 3.....	98
ภาพที่ 4. 32	การกระจายข้อมูลเฟสที่ถูกเลื่อนไป ในขณะที่ทำการวัดพื้นผิวของ Optical flat $\lambda/10$	98
ภาพที่ 4. 33	ผลการประมวล Interferograms ชุดที่ 1 ของ Optical flat $\lambda/10$	99
ภาพที่ 4. 34	ผลการประเมินความเรียบพื้นผิว Optical flat $\lambda/10$ โดยใช้ Interferograms ชุดที่ 1.....	99
ภาพที่ 4. 35	ผลการประมวล Interferograms ชุดที่ 2 ของ Optical flat $\lambda/10$	99
ภาพที่ 4. 36	ผลการประเมินความเรียบพื้นผิว Optical flat $\lambda/10$ โดยใช้ Interferograms ชุดที่ 2.....	100

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4. 37 ผลการประมวล Interferograms ชุดที่ 3 ของ Optical flat $\lambda/10$	100
ภาพที่ 4. 38 ผลการประเมินความเรียบพื้นผิว Optical flat $\lambda/10$ โดยใช้ Interferograms ชุดที่ 3.....	101
ภาพที่ 4. 39 อินเตอร์เฟรแกรมของ Microscope Slide A ชุดที่ 1.....	102
ภาพที่ 4. 40 อินเตอร์เฟรแกรมของ Microscope Slide A ชุดที่ 2.....	102
ภาพที่ 4. 41 อินเตอร์เฟรแกรมของ Microscope Slide A ชุดที่ 3.....	102
ภาพที่ 4. 42 การกระจายข้อมูลเฟสที่ถูกเลื่อนไป ในขณะที่ทำการวัดพื้นผิวของ Microscope Slide A	103
ภาพที่ 4. 43 ผลการประมวล Interferograms ชุดที่ 1 ที่ได้จาก Microscope Slide A.....	103
ภาพที่ 4. 44 ผลการประเมินความเรียบพื้นผิวของ Microscope Slide A โดยใช้ Interferograms ชุดที่ 1.....	104
ภาพที่ 4. 45 ผลการประมวล Interferograms ชุดที่ 2 ที่ได้จาก Microscope Slide A.....	104
ภาพที่ 4. 46 ผลการประเมินความเรียบพื้นผิวของ Microscope Slide A โดยใช้ Interferograms ชุดที่ 2.....	105
ภาพที่ 4. 47 ผลการประมวล Interferograms ชุดที่ 3 ที่ได้จาก Microscope Slide A.....	105
ภาพที่ 4. 48 ผลการประเมินความเรียบพื้นผิวของ Microscope Slide A โดยใช้ Interferograms ชุดที่ 3.....	106
ภาพที่ 4. 49 อินเตอร์เฟรแกรมของ Microscope Slide B ชุดที่ 1.....	107
ภาพที่ 4. 50 อินเตอร์เฟรแกรมของ Microscope Slide B ชุดที่ 2.....	107
ภาพที่ 4. 51 อินเตอร์เฟรแกรมของ Microscope Slide B ชุดที่ 3.....	107
ภาพที่ 4. 52 การกระจายข้อมูลเฟสที่ถูกเลื่อนไป ในขณะที่ทำการวัดพื้นผิวของ Microscope Slide B.....	108
ภาพที่ 4. 53 ผลการประมวล Interferograms ชุดที่ 1 ที่ได้จาก Microscope Slide B.....	108
ภาพที่ 4. 54 ผลการประเมินความเรียบพื้นผิวของ Microscope Slide B โดยใช้ Interferograms ชุดที่ 1.....	109
ภาพที่ 4. 55 ผลการประมวล Interferograms ชุดที่ 2 ที่ได้จาก Microscope Slide B.....	109
ภาพที่ 4. 56 ผลการประเมินความเรียบพื้นผิวของ Microscope Slide B โดยใช้ Interferograms ชุดที่ 2.....	110
ภาพที่ 4. 57 ผลการประมวล Interferograms ชุดที่ 3 ที่ได้จาก Microscope Slide B.....	110
ภาพที่ 4. 58 ผลการประเมินความเรียบพื้นผิวของ Microscope Slide B โดยใช้ Interferograms ชุดที่ 3.....	111
ภาพที่ 4. 59 ผลการจำลองโครงสร้างสามมิติของพื้นผิว Optical flat $\lambda/4$	112
ภาพที่ 4. 60 ผลการจำลองโครงสร้างสามมิติของพื้นผิว Optical flat $\lambda/10$	112
ภาพที่ 4. 61 ผลการจำลองโครงสร้างสามมิติของพื้นผิว Microscope Slide A.....	112
ภาพที่ 4. 62 ผลการจำลองโครงสร้างสามมิติของพื้นผิว Microscope Slide B.....	113

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 6.1 ภาพถ่ายของระบบ Michelson Interferometer ที่ใช้กับงานวิจัยนี้.....	117
ภาพที่ 6.2 โครงร่างสามมิติของพื้นผิว Optical flat $\lambda/4$	117
ภาพที่ 6.3 โครงร่างสามมิติของพื้นผิว Optical flat $\lambda/10$	118
ภาพที่ 6.4 โครงร่างสามมิติของพื้นผิว Microscope Slide A.....	118
ภาพที่ 6.5 โครงร่างสามมิติของพื้นผิว Microscope Slide B.....	118



สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2. 1	ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กับอินเตอร์เฟอริเตอร์แบบเลื่อนเฟส	48
ตารางที่ 2. 2	การคำนวณเฟสมอดูโล 2π (Phase modulo 2π)	50
ตารางที่ 3. 1	สภาวะของระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสเป็คเตอริง สำหรับเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม	67
ตารางที่ 4. 1	ผลของจำนวนช่วงพิกเซลที่ใช้สุ่มข้อมูลความเข้มแสง ในขั้นตอนการลดขนาดภาพ	85
ตารางที่ 4. 2	ผลของขนาดวงกลม ที่ใช้ตัดขอบวงกลมภาพถ่ายรีจิสเทรชันของแสง	86
ตารางที่ 4. 3	ระดับค่าขีดเริ่ม (background threshold) ในการปรับสีพื้นหลังให้เป็นสีดำ	87
ตารางที่ 4. 4	ค่าการใช้งานกล้อง Canon EOS 450D สำหรับบันทึกอินเตอร์เฟอริแกรม	91
ตารางที่ 4. 5	ผลวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดในการเลื่อนเฟสของ Optical flat $\lambda/4$	93
ตารางที่ 4. 6	ค่าทางสถิติของพื้นผิว Optical flat $\lambda/4$ จากเส้นสัมผัส	96
ตารางที่ 4. 7	ค่าทางสถิติของพื้นผิว Optical flat $\lambda/4$ ทั้งภาพ	96
ตารางที่ 4. 8	ความผิดพลาดในการเลื่อนเฟสจากอินเตอร์เฟอริแกรม ของ Optical flat $\lambda/10$	98
ตารางที่ 4. 9	ค่าทางสถิติของพื้นผิว Optical flat $\lambda/10$ จากเส้นสัมผัส	101
ตารางที่ 4. 10	ค่าทางสถิติของพื้นผิว Optical flat $\lambda/10$ ทั้งภาพ	101
ตารางที่ 4. 11	ผลวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดในการเลื่อนเฟสของ Microscope Slide A	103
ตารางที่ 4. 12	ค่าทางสถิติของพื้นผิว Microscope Slide A จากเส้นสัมผัส	106
ตารางที่ 4. 13	ค่าทางสถิติของพื้นผิว Microscope Slide A ทั้งภาพ	106
ตารางที่ 4. 14	ผลวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดในการเลื่อนเฟสจากอินเตอร์เฟอริแกรม ของ Microscope Slide B	108
ตารางที่ 4. 15	ค่าทางสถิติของพื้นผิว Microscope Slide B จากเส้นสัมผัส	111
ตารางที่ 4. 16	ค่าทางสถิติของพื้นผิว Microscope Slide B ทั้งภาพ	111

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ลักษณะสภาพโครงสร้างพื้นผิววัสดุเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมีบนพื้นผิววัสดุ รวมทั้งอุปกรณ์หรือชิ้นงานต่าง ๆ ที่เป็นผลผลิตของการใช้พื้นผิววัสดุ เช่น สมบัติทางด้านไฟฟ้า ทางแสง ทางความร้อน ทางโทรโพลยี (Tribology) การยึดเกาะ การเคลือบผิว เป็นต้น เนื่องจากพื้นผิววัสดุเป็นส่วนที่มีการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมตลอดเวลา ลักษณะพื้นผิววัสดุจึงมีผลต่อประสิทธิภาพและสมบัติของพื้นผิวและผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ทำจากวัสดุ จึงมีความสำคัญต่อทั้งในวงการอุตสาหกรรมและวงการพัฒนานาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เทคโนโลยีนาโน (Nanotechnology)

เทคโนโลยีนาโนถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีที่เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนานาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีต่าง ๆ รวมทั้งเข้ามามีบทบาทและเกี่ยวข้องกับดำรงอยู่ของชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น เทคโนโลยีนาโน คือ เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดการ การสร้าง และ การวิเคราะห์ วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักรหรือผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร (1-100 นาโนเมตร) รวมถึงการออกแบบหรือการประดิษฐ์เครื่องมือเพื่อใช้สร้างหรือวิเคราะห์วัสดุในระดับที่เล็กมาก ๆ เช่น การจัดอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุหรืออุปกรณ์มีคุณสมบัติพิเศษขึ้นไม่ว่าทางด้านกายภาพ เคมี หรือ ชีวภาพ นาโนศาสตร์ (Nanoscience) จึงเป็นวิทยาศาสตร์แขนงหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวัสดุที่มีโครงสร้างสามมิติ ความยาว ความกว้าง และ ความสูง มีค่าอยู่ระหว่าง 1-100 นาโนเมตร โดยวัสดุนาโนที่อยู่ในรูปของฟิล์มบาง เช่น ฟิล์มบางตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ฟิล์มบางเพียโซอิเล็กทริก หรือแม้กระทั่ง ฟิล์มบางเทอร์โมอิเล็กทริก กำลังเป็นที่ได้รับความสนใจจากกลุ่มนักวิจัยหลายกลุ่มอย่างแพร่หลาย ที่จะนำมาพัฒนาต่อยอด เป็นอุปกรณ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป โดยมีนักวิจัย หลายกลุ่ม [1-4] พบว่าความหยาบของพื้นผิว (Surface roughness) ไม่ว่าจะอยู่บนพื้นผิวของฟิล์มบาง หรือ ของฐานรองรับที่ทำการเคลือบฟิล์มบางนั้นลงไป มีผลโดยตรงต่อสมบัติทั้งทางโครงสร้างเชิงเคมีและเชิงกายภาพของฟิล์มบาง ดังนั้น การทราบค่าความเรียบ ลักษณะพื้นผิว และ โครงสร้างสามมิติของพื้นผิวที่แน่นอน จึงมีความจำเป็นต่อการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบาง เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีสมบัติตามต้องการ

ปัจจุบันการตรวจสอบพื้นผิวโดยใช้หลักการการแทรกสอดทางแสง (Interferometric optical testing) กำลังเป็นที่ได้รับความสนใจ ทั้งในงานวิจัยทางด้านการพัฒนาเทคโนโลยีวิทยาศาสตร์ รวมทั้งอุตสาหกรรมผลิตอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ สารกึ่งตัวนำ กระจก และเลนส์ [5-8] ระบบการวัดหรือเครื่องมือวัดลักษณะของพื้นผิววัสดุจึงมีความจำเป็น ซึ่งอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Interferometer) จัดได้ว่าเป็นเครื่องมือที่ความเหมาะสมต่อกลุ่มงานเหล่านี้ นอกจากนี้แล้ว การพัฒนาระบบการตรวจสอบทางแสงดังกล่าวยังเอื้ออำนวยต่อการตรวจสอบความเป็นเพียโซของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ทางห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์พื้นผิวและเลเซอร์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ได้ทำการสังเคราะห์ขึ้นอีกด้วย

อินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ เป็นเครื่องมือวัดที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับชิ้นงานมีความถูกต้องแม่นยำสูงระดับน้อยกว่า $\lambda/100$ [5, 9] โดยผลการวัดความเรียบของพื้นผิวด้วยอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์จะอยู่ในรูปแบบของลวดลายริ้วการแทรกสอด (Interference fringes pattern) เรียกกันว่าอินเทอร์เฟอแกรม (Interferogram) การวัดความต่างเฟสจากลวดลายริ้วการแทรกสอดของอินเทอร์เฟอแกรมแต่ภาพ มีความสัมพันธ์กับความสูงต่ำและเค้าโครงร่างของพื้นผิวที่นำมา ทดสอบ โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ไมเคิลสันอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ร่วมกับเทคนิคการเลื่อนเฟส เรียกว่าอินเทอร์เฟอเมตรี แบบเลื่อนเฟส (Phase Shifting Interferometry, PSI) การเลื่อนไปของเฟส ทำ โดยการขับเคลื่อนตำแหน่งของพื้นผิวอ้างอิงด้วยชุดขับเคลื่อนที่ถูกควบคุมด้วยชุดอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric device) การประเมินภาพอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์จึงเป็นหัวใจหลักสำคัญในงานวิจัยนี้

ความท้าทายของการทำวิทยานิพนธ์นี้ คือ ขั้นตอนการประเมินภาพในระหว่างสถานะที่ไม่มี ความเสถียรซึ่งเกิดขึ้นจากการเลื่อนไปของเฟสที่เกิดขึ้นจากความไม่เป็นเชิงเส้นของชุดอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริก การสั่นสะเทือนของระบบ ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งจากระบบการวัดและสภาพแวดล้อม (Systematic and random sources of errors) อินเทอร์เฟอแกรมที่ได้จึงมีความผิดเพี้ยนไป แต่อย่างไรก็ตามความผิดเพี้ยนไปของภาพที่เกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุดังกล่าวสามารถแก้ไขได้ หรือลดลงได้โดยการเลือกวิธีการวิเคราะห์ภาพร่วมกับระเบียบวิธีการ (Algorithm) ทางคณิตศาสตร์ที่อยู่บนพื้นฐานของ Hariharan algorithm ซึ่งระเบียบวิธีการนี้ไม่มีความไวต่อความผิดพลาดในการเลื่อนไปของเฟส ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำโดยการวิเคราะห์ภาพทั้งหมด 5 ภาพ โดยภาพแต่ละภาพจะสอดคล้องกับการเลื่อนไปของเฟสด้วยค่าต่าง ๆ ดังนี้ $-2\alpha, -\alpha, 0, 2\alpha, \alpha$ เมื่อ α คือ ค่าของเฟสในการเลื่อนเฟส (Phase step) แต่ละครั้ง ภาพแต่ละภาพจะถูกประเมินของโปรแกรมที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น ตามหลักการของ Hariharan algorithm

1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อทำการจัดเตรียมไมเคิลสันอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์พร้อมด้วยชุดขับเคลื่อนกระจกที่มีความละเอียดระดับพิโคเมตร
- 1.2.2 เพื่อทำการพัฒนาโปรแกรมการประเมินเค้าโครงร่างของพื้นผิวจากอินเทอร์เฟอแกรม (Interferogram) ที่มีการแสดงผลความเรียบและพารามิเตอร์ความหยาบผิวของพื้นผิวในรูปแบบทั้ง 2 และ 3 มิติ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 จัดเตรียมไมเคิลสันอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ที่มีชุดขับเคลื่อนกระจกด้วยชุดขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริก
- 1.3.2 พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินเค้าโครงร่างของพื้นผิวจากลวดลายริ้วการแทรกสอด
- 1.3.2 ทดสอบการใช้งานและประเมินความถูกต้องของระบบที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ในการพัฒนาระบบการวัดความเรียบของพื้นผิวด้วยอินเทอร์เฟอเมทรีแบบไม่เคลสสันแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

- การจัดเตรียมระบบอินเทอร์เฟอเมเตอร์ไม่เคลสสันพร้อมด้วยชุดขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริก
 - การพัฒนาโปรแกรมประเมินค่าโครงสร้างของพื้นผิวจากผลวัดลายร้าวการแทรกสอด
 - การทดสอบความถูกต้องและปรับปรุงการทำงานของโปรแกรมประเมินภาพ
- 1) ขั้นตอนการจัดเตรียมระบบอินเทอร์เฟอเมเตอร์แบบไม่เคลสสันนั้น เป็นการจัดหาอุปกรณ์ทางแสง ซึ่งได้แก่ ตัวแยกลำแสง เลนส์ กระจกสะท้อนแสง รูมันแสง และ ชุดขยายลำแสงให้เป็นลำแสงขนาน (Beam Expander) พร้อมด้วยชุดขับเคลื่อนกระจกเพียโซอิเล็กทริกที่มีระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control system) หลังจากนั้นเป็นการนำอุปกรณ์ทางแสงเหล่านี้มาประกอบเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้ระบบอินเทอร์เฟอเมเตอร์พร้อมใช้งาน
 - 2) ขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรมประเมินค่าโครงสร้างของพื้นผิวจากผลวัดลายร้าวการแทรกสอด นั้นเป็นการศึกษาวิธีการประเมินค่าโครงสร้างด้วยระเบียบวิธีการทางคณิตศาสตร์ (Algorithm) ในแบบต่าง ๆ แล้ว ทำการเลือกระเบียบวิธีการที่มีความเหมาะสมต่ออินเทอร์เฟอเมเตอร์และวิธีการจัดเก็บภาพ พร้อมกับพัฒนาโปรแกรมประเมินค่าโครงสร้างขึ้นใช้งาน
 - 3) ขั้นตอนการทดสอบความถูกต้องและปรับปรุงการทำงานของโปรแกรมประเมินภาพนั้น เป็นส่วนของการทดสอบประสิทธิภาพในการทำงานของทั้งระบบอินเทอร์เฟอเมเตอร์และการทำงานของตัวโปรแกรม เช่น ความถูกต้องในการประเมินค่าโครงสร้างจากผลวัดลายร้าวการแทรกสอด การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมนั้นทำได้โดยการนำพื้นผิวที่ทราบค่าความหยาบผิวและค่าโครงสร้างของพื้นผิวมาทำการวัดด้วยระบบและวิเคราะห์ค่าโครงสร้างของพื้นผิวด้วยโปรแกรมที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น

1.5 แผนดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงาน	ระยะเวลา											หมายเหตุ	
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.		ก.ย.
1. ขั้นตอนการจัดเตรียมระบบอินเทอร์เฟอเมเตอร์	←————→												
2. ขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรม			←————→										
3. ขั้นตอนการทดสอบและปรับปรุงโปรแกรม							←————→						
4. สรุปผลและเขียนรายงาน												←———→	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ในเชิงพาณิชย์นั้นมีการนำไปประยุกต์ใช้โดยภาคธุรกิจหรือบุคคลทั่วไป ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นพื้นฐานที่จะนำไปสู่การพัฒนากระบวนการวัดความเร็วของพื้นผิวที่มีความเรียบสูงด้วยวิธีการทางแสงซึ่งเป็นวิธีการตรวจวัดแบบไม่ทำลายชิ้นงาน วิธีตรวจสอบในลักษณะนี้มีใช้กันมากในอุตสาหกรรมผลิตรายการผลิตอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ สารกึ่งตัวนำ กระจก และ เลนส์
- 1.6.2 ในเชิงสาธารณะนั้นสามารถนำไปประโยชน์/แก้ปัญหา ให้กับ สังคม ชุมชน ท้องถิ่น โดยผลงานวิจัยที่จะได้จากการดำเนินการวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งที่จะนำไปสู่การพัฒนาวัสดุนาโนที่อยู่ในรูปของฟิล์มบางที่ถูกเคลือบอยู่บนฐานรองรับ ซึ่งความเร็วของพื้นผิวของฐานรองรับมีผลต่อสมบัติของฟิล์มบางโดยตรง โดยวัสดุนาโนที่อยู่ในรูปของฟิล์มบางกำลังเป็นที่ได้รับความสนใจจากกลุ่มนักวิจัยหลายกลุ่มอย่างแพร่หลาย ที่จะนำมาพัฒนาต่อยอดเป็นอุปกรณ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป
- 1.6.3 นอกจากนื่องานวิจัยนี้ยังเป็นการส่งเสริมกระบวนการเรียนรู้และแก้ไขปัญหา อีกทั้งยังเป็นการพัฒนาศักยภาพของผู้ทำวิจัย



บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ความสำคัญของความเรียบบนพื้นผิวและวิธีการวัด

มาตรวิทยาสำหรับการวัดพื้นผิว (Surface Metrology) ถือได้ว่าเป็นศาสตร์ที่มีความสำคัญต่อวงการวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและอุตสาหกรรม การระบุหรือบ่งบอกโครงสร้างของพื้นผิววัสดุด้วยเทคนิคที่มีความถูกต้องและแม่นยำสูงในระดับนาโนเมตร จึงจำเป็นต่อการพัฒนาเทคโนโลยีนาโนในด้านต่าง ๆ [10] เนื่องจากสภาพโครงสร้างบนพื้นผิววัสดุเป็นปัจจัยสำคัญหนึ่งที่มีผลต่อสมบัติพฤติกรรม และ ประสิทธิภาพของวัสดุที่ถูกนำไปใช้ [10- 12] นับตั้งแต่ระดับความขรุขระของพื้นผิวถนน ระดับความขรุขระของชิ้นส่วนงานของเครื่องจักรกล จนกระทั่งระดับความขรุขระของชิ้นส่วนงานที่ใช้กับอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนทางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และชิ้นส่วนของอุปกรณ์ทางแสง ซึ่งจะมีระดับความขรุขระในระดับนาโนเมตร การศึกษาและวัดความขรุขระหรือความเรียบพื้นผิวของวัสดุในระดับนี้จึงกลายเป็นส่วนสำคัญและจำเป็นทั้งในทางอุตสาหกรรมและการศึกษาค้นคว้าทางวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีและอุปกรณ์ให้มีขนาดเล็กลงในระดับนาโนเมตรเป็นอย่างมาก การประเมินค่าโครงสร้างพื้นผิวทำให้สามารถประเมินสมบัติและประสิทธิภาพของอุปกรณ์หรือชิ้นงานที่สร้างจากพื้นผิวนั้น ๆ ได้ในเบื้องต้น

การวัดค่าโครงสร้างของพื้นผิวทำให้ทราบถึงสภาพของพื้นผิวว่ามีลักษณะของ ร่อง หลุม รอยนูน หรือ เป็นคลื่น ปรากฏอยู่บนพื้นผิวอย่างไร หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง เป็นการบ่งบอกความขรุขระหรือ ความหยาบผิว นั่นเอง ทั้ง ความขรุขระของพื้นผิว หรือ ความหยาบผิว แปลมาจากคำภาษาอังกฤษ “Surface Roughness” หมายถึงขนาดความขรุขระของผิว หากมีความขรุขระมาก แสดงว่ามีความหยาบมาก หากมีความขรุขระน้อยก็แสดงว่ามีความหยาบน้อย แต่ในบางครั้งพื้นผิวที่มีความหยาบน้อยอาจใช้คำว่าความเรียบ (Flatness) วิธีการวัดความหยาบผิว มีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ การวัดความหยาบผิวเชิงเส้น (Linear roughness measurement) ความขรุขระถูกวัดออกมาเพียงแนวเดียว และ การวัดความหยาบผิวเชิงพื้นที่ (Areal roughness measurement) ความขรุขระของพื้นผิวจะถูกวัดเป็นบริเวณของพื้นที่หนึ่งบนพื้นผิวนั้น

เครื่องมือที่ใช้กับการวัดความหยาบผิวมีอยู่ด้วยกันหลากหลายวิธี แต่สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ หลักๆ ด้วยกัน [11-14] คือ แบบสัมผัส (Contact Method) และ แบบไม่สัมผัส (Non-contact Method) ชิ้นงาน ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับลักษณะและสมบัติของชิ้นงานที่ถูกวัด การวัดแบบสัมผัสโดยส่วนมากเป็นการวัดค่าโครงสร้างของพื้นผิวโดยใช้เข็มลาก แล้ววัดแรงทางกล หรือ การวัดอันตรกิริยาระหว่างอะตอมของพื้นผิวกับปลายเข็ม ซึ่งมีความสัมพันธ์กับระดับความสูงต่ำของพื้นผิว เช่น เครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิวโดยใช้เข็มลาก (Mechanical Stylus Profiler) และ กล้องจุลทรรศน์แบบสแกนโพรบ (Scanning Probe Microscope, SPM) ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM) และ STM (Scanning Tunneling Microscope, STM) โดยทั่วไปการวัดแบบไม่สัมผัส แสงถูกนำมาใช้เป็นโพรบในการตรวจวัดสภาพโครงสร้างของพื้นผิว ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วใช้หลักการการแทรกสอดทางแสง พบได้ใน อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบเลื่อนเฟส (Phase-shifting Interferometer, PSI) อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์การแทรกสอดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

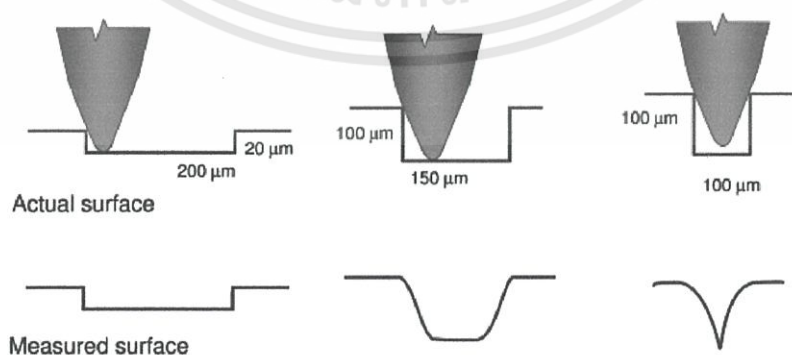
ขาว (White-light Interferometer, WLI) และ กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล (Confocal Microscope) เป็นต้น

2.1.1 การวัดความหยาบผิวด้วยวิธีการแบบสัมผัส

การวัดความหยาบผิวด้วยการใช้เข็มลากผ่านไปบนพื้นผิวของวัสดุ ทำโดยการป้อนแรงให้กับปลายเข็มเพื่อออกแรงกระทำต่อพื้นผิว โดยแรงดังกล่าวมีค่าเพียงเล็กน้อย การวัดโครงสร้างของพื้นผิวด้วยวิธีการนี้จะใช้เวลาค่อนข้างมาก เนื่องจากต้องทำการลากเข็มด้วยความเร็วที่ต่ำ การลากเข็มด้วยความเร็วต่ำทำให้ได้ความละเอียดในแนวด้านข้าง (Lateral Resolution) สูงกว่าการลากเข็มด้วยความเร็วสูง อย่างไรก็ตาม ความละเอียดของเครื่องมือวัดนี้ยังคงมีค่าน้อยกว่าของกล้องจุลทรรศน์เชิงแสง (Optical Microscope) สำหรับงานทางด้าน การวัดความหยาบผิว เครื่องวัดโครงสร้างพื้นผิวโดยใช้เข็มลากนี้เป็นหนึ่งในเครื่องมือที่ได้รับการพัฒนาและสร้างขึ้นในระยะแรก ๆ ด้วยต้นทุนการสร้างที่ถูกและง่ายต่อการใช้งาน ในเวลาต่อมาจึงได้มีการสร้างและพัฒนา กล้องจุลทรรศน์แบบสแกนโพรบซึ่งมีความละเอียดในระดับน้อยกว่านาโนเมตร การพัฒนานี้เกิดขึ้นจากความต้องการใช้งานทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากสารกึ่งตัวนำ และ Micro-electromechanical Systems (MEMS)

2.1.1.1) วิธีการวัดความหยาบผิวโดยใช้เข็มลาก (Mechanical stylus method)

เครื่องมือที่ใช้หลักการในวัดสภาพพื้นผิวของวัสดุ ด้วยเทคนิคการใช้เข็มลากนั้น เรียกว่า เครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิวโดยใช้เข็มลาก [14] เข็มจะถูกลากไปบนพื้นผิวนั้นและออกแรงกระทำทางกลต่อพื้นผิวที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 – 50 mg แรงกระทำในระดับนี้ถือว่าน้อยมากจนไม่สามารถสร้างความเสียหายให้กับพื้นผิวได้ แรงกระทำนี้ส่งผลให้หัวเข็มเกิดการกระดกขึ้นลงในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว ระยะขจัดการกระดกขึ้นลงของหัวเข็มจะถูกแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าด้วย Linear Variable Differential Transformer สัญญาณทางไฟฟ้านี้มีค่าแปรผันตรงกับระดับความสูงต่ำของพื้นผิว เข็มทำมาจากเพชรมีปลายเข็มที่มีรัศมี 0.05-50 μm ทั้งรูปร่างและขนาดรัศมีของปลายเข็มเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อระยะความลึกของปลายเข็มที่สามารถแทงลึกลงไปบนเนื้อวัสดุในขณะสแกนไปบนพื้นผิววัสดุได้ ขนาดและรูปร่างของปลายเข็มกับสัดส่วนของความกว้างกับความลึก (Aspect Ratio) ของพื้นผิวที่ค่าต่าง ๆ ที่มีผลต่อผลการวัดพื้นผิวเป็นดังภาพที่ 2.1



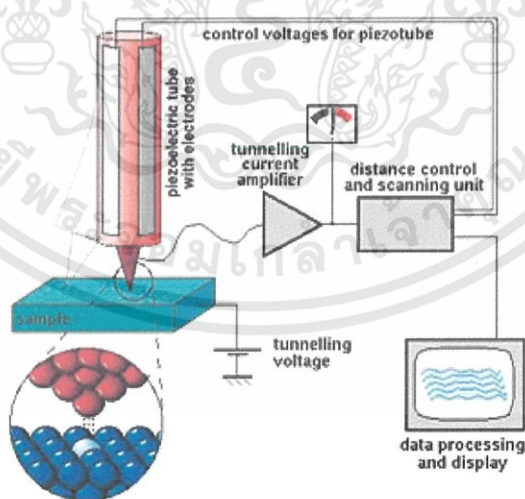
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของพื้นผิวที่มีสัดส่วนความลึกกับความกว้าง ค่าต่าง ๆ ที่ถูกประเมินจากการใช้เข็มที่ปลายเข็มมีรัศมีขนาด 25 mm [14]

ถึงแม้ว่าวิธีการวัดด้วยการลากหัวเข็มนี้จะมีผลละเอียดในแนวตั้ง (Vertical Resolution) ของระยะการกระดกของหัวเข็มมีค่าได้น้อยถึง 0.05 nm แต่เนื่องจากขนาดและรูปร่างของปลายเข็มที่มีต่อผลการวัดจึงทำให้ความละเอียดในแนวด้านข้างของระยะการลากของหัวเข็มมีค่าได้น้อยที่สุดเพียง 100 nm เท่านั้น [15] ซึ่งความละเอียดในแนวด้านข้างนอกจากจะมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดรัศมีของหัวเข็มที่ใช้เป็นโพรบแล้วยังมีค่าขึ้นอยู่กับรูปร่างของพื้นผิวด้วย ตัวอย่างเช่น เข็มที่มีรัศมีปลายเข็ม r วัดพื้นผิวที่มีลักษณะดังภาพที่ 2.1 โดยมีความสูงของพื้นผิวเป็น a ระยะที่เครื่องวัดสามารถวัดได้มีค่าเป็น $d=2\pi\sqrt{ar}$ ดังนั้น ถ้าปลายเข็มมีรัศมีขนาด $10\ \mu\text{m}$ พื้นผิวที่วัดมีความสูง $1\ \text{nm}$ ความละเอียดของเครื่องวัดมีค่าเพียง $0.6\ \mu\text{m}$

เนื่องจากโครงสร้างของพื้นผิววัสดุที่ได้การวัดด้วยวิธีการลากเข็มเกิดจากการประเมนหรือตีความจากขนาดและรูปร่างของปลายเข็มที่สัมพันธ์กับโครงสร้างของพื้นผิว การเลือกขนาดและรูปร่างของปลายเข็มจึงมีความสำคัญต่อความถูกต้องในผลการวัด ขนาดและรูปร่างของปลายเข็มที่เลือกใช้งานนั้นจะต้องสามารถยื่นลงไปในเรื่องหรือช่องของพื้นผิวที่มีความลึกได้โดยไม่เกิดการชนกับขอบหรือรอยหยักของพื้นผิวได้ จึงเป็นข้อเสียของวิธีการวัดนี้

2.1.1.2) วิธีการวัดความหยาบผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ STM

กล้องจุลทรรศน์แบบ STM [10, 16-17] เป็นเครื่องมือที่มีโพรบเป็นเข็มปลายแหลมขนาดประมาณหนึ่งอะตอมเท่านั้นที่ทำหน้าที่ในการตรวจวัดพื้นผิว ปลายแหลมของเข็มที่ลากผ่านพื้นผิวจะเป็นตัวนำไฟฟ้าที่มีประจุเพียงเล็กน้อย ทำงานได้โดยการบ่อนความต่างศักย์ระหว่างปลายเข็มและพื้นผิววัสดุ ปลายเข็มที่แหลมในระดับนาโนนี้เคลื่อนที่ด้วยการควบคุมของเพียโซทรานสดิวเซอร์ เครื่องมือนี้มีพื้นฐานการตรวจวัดพื้นผิวมาจากกระบวนการของการลอดผ่านได้ (Tunneling) ของอิเล็กตรอนระหว่างพื้นผิวและปลายแหลมของเข็ม หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบ STM เป็นดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบ STM [18]

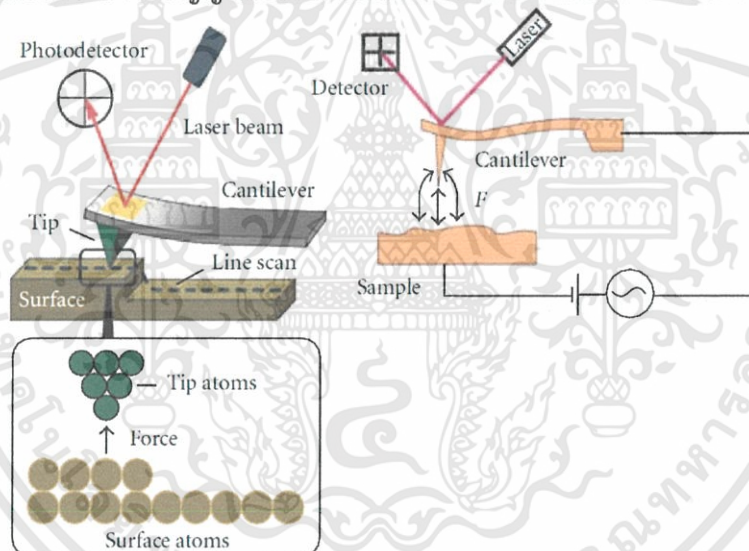
เมื่อเข็มถูกลากผ่านพื้นผิวของโครงสร้าง (ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ไปได้ 3 ทิศทางตามแนวแกน) กล้องจุลทรรศน์แบบ STM จะทำหน้าที่ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านระหว่างปลายแหลมของเข็มกับพื้นผิวระดับนาโน (อันเกิดจากการที่อิเล็กตรอนลอดผ่านได้ระหว่างปลายแหลมกับพื้นผิววัสดุนั่นเอง) แล้วส่งสัญญาณไฟฟ้ากลับไปเพื่อประมวลผลผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์ แล้วสร้างเป็นภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างระดับนาโนของพื้นผิวนั้นออกมาได้ (ซึ่งก็เป็นวิธีการที่คล้ายกับการทำงานของเครื่องเล่นวีซีดีที่แปลงข้อมูลที่ฝังอยู่บนแผ่นมาเป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วนำมาแสดงเป็นภาพ)

2.1.1.3) วิธีการวัดความหยาบผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ AFM

กล้องจุลทรรศน์แบบ AFM [10, 15-16] ถูกพัฒนาขึ้นมาหลังจากกล้องจุลทรรศน์แบบ STM และสร้างขึ้นมาด้วยหลักการพื้นฐานเดียวกัน ข้อดีของกล้องจุลทรรศน์แบบ AFM ที่มีมากกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบ STM ก็คือ สามารถตรวจวัดพื้นผิวที่เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ เช่น พื้นผิวโพลีเมอร์ เซรามิก คอมโพสิต กระจกหรือแก้ว หรือแม้แต่โมเลกุลทางชีวภาพต่าง ๆ ก็สามารถที่จะวัดได้ หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบ AFM เป็นดังภาพที่ 2.3 ลำแสงเลเซอร์จะถูกยิงลงไปให้กับส่วนปลายแหลม (Tip) ของคานยื่น (Cantilever) ที่มีขนาดระดับอะตอมในระยะใกล้ ซึ่งส่วนปลายแหลมของคานนั้นจะไปสัมผัสแบบกระตักในทิศทางขึ้นลงตั้งฉากกับพื้นผิวของวัสดุ และเมื่อปลายแหลมของคานลากผ่านพื้นผิวของวัสดุที่มีความสูงต่ำ จะทำให้เกิดแรงผลักและแรงดึงดูดที่กระทำกันในแนวตั้งฉากที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของพื้นผิวกับปลายแหลมของคานตามสภาพความสูงต่ำของพื้นผิวซึ่งจะสามารถตรวจวัดได้จากมุมสะท้อนของลำแสงเลเซอร์ที่ยิงลงไปให้กับส่วนปลายของคาน จากนั้นคอมพิวเตอร์ก็จะแปลงสัญญาณออกมาเป็นภาพของพื้นผิวที่ต้องการตรวจสอบได้



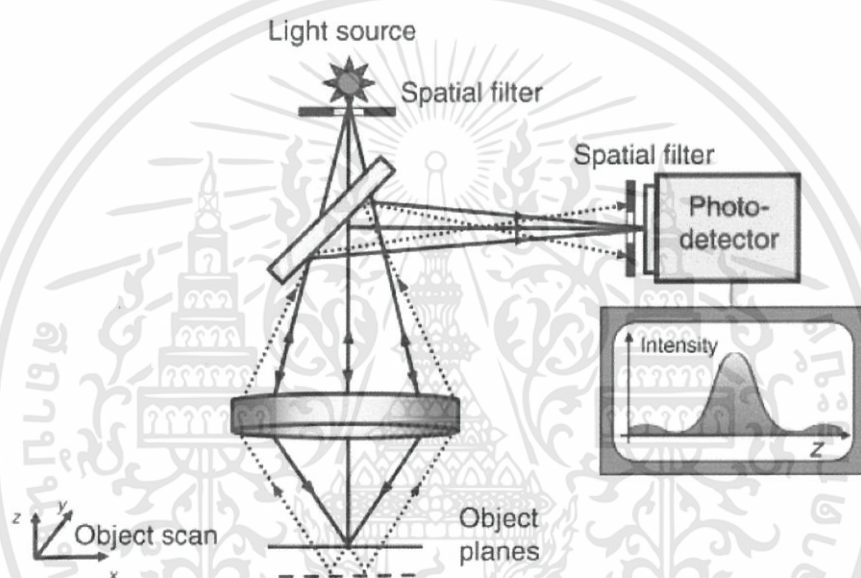
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างและหลักการกล้องจุลทรรศน์แบบ AFM [10]

ถึงแม้ว่า กล้องจุลทรรศน์ทั้งแบบ STM และ AFM เป็นเครื่องมือวัดที่ความละเอียดสูงมากถึงระดับสเกลนาโนและอะตอม ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์ความเรียบและโครงสร้างของพื้นผิวได้ความละเอียดถึงระดับโมเลกุล และมีพื้นที่ในการสแกนไม่เกิน $150 \times 150 \mu\text{m}^2$ แต่ในกระบวนการสร้างและผลิตพื้นผิววัสดุที่มีความเรียบสูง วิธีการตรวจวัดความเรียบของพื้นผิวที่มีความละเอียดในระดับสเกลไมครอนก็เพียงพอแล้ว อีกทั้งพื้นที่ของพื้นผิวที่ต้องการวัดยังมีขนาดมากกว่า $10 \times 10 \text{mm}^2$ ซึ่งโดยทั่วไปในทางอุตสาหกรรมใช้วิธีการลากปลายเข็ม แต่โอกาสที่พื้นผิวจะได้รับความเสียหายเนื่องจากการวัดด้วยวิธีการนี้มีค่อนข้างสูงรวมทั้งระยะเวลาที่ใช้การวัด มาตรฐานวิทยาของการวัดความเรียบพื้นผิวด้วยแสงจึงเป็นวิธีการที่ได้รับความสนใจ การวัดความเรียบพื้นผิวโดยใช้ลำแสงเป็นโพรบในการตรวจวัดสภาพโครงสร้างของพื้นผิวเป็นวิธีการหนึ่งที่ไม่สร้างความเสียหายหรือทำลายพื้นผิว แสง

ที่ใช้เป็นโพรบนี้อาจจะมีแหล่งกำเนิดมาจาก LED หรือ เลเซอร์ ก็ได้ แสงจึงกลายเป็นเครื่องมือที่จำเป็นในการวัดสภาพพื้นผิวในระดับนาโนเมตร [10]

2.1.2 วิธีการวัดความหยาบผิวแบบไม่สัมผัสด้วยการโฟกัสของลำแสง

วิธีการวัดความเรียบพื้นผิวด้วยการโฟกัสลำแสง ที่เรียกกันว่า ไมโครสโคปีแบบคอนโฟคอล (Confocal Microscopy) [14] เป็นวิธีการสร้างภาพที่ทำให้มีกำลังในการแยกแยะความละเอียดและความคมชัดของภาพสูงกว่าไมโครสโคปีแบบธรรมดา โดยการจำกัดลำแสงที่ไม่ถูกรวมหรือโฟกัสโดยเลนส์ และ แสงรบกวนจากภายนอกออกไปด้วยการวางรูรับแสง (Spatial Pinhole) ไว้ด้านหน้าของตัวตรวจวัดแสง ลำแสงที่เข้าสู่ตัวตรวจวัดได้นั้นจะเป็นลำแสงที่เคลื่อนที่ตามระนาบโฟกัสของเลนส์ที่วางไว้ด้านหน้าของพื้นผิวทดสอบ โดอะแกรมของไมโครสโคปีแบบคอนโฟคอลแสดงดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ไมโครสโคปีแบบคอนโฟคอลจำกัดแสงที่ไม่ถูกโฟกัสด้วยช่องรับแสงที่มีรูขนาดเล็ก [14]

ภาพโครงสร้างของพื้นผิวที่ได้จากไมโครสโคปีแบบคอนโฟคอลเกิดจากการสแกนรูรับแสงของแหล่งกำเนิดและตัวตรวจวัดแสง (Photo-detector) ที่แต่ละพิกเซลบนระนาบ x-y (Raster Scan) ภาพที่ได้จะเป็นภาพ 2 มิติ (x-y Raster Image) และ เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของระนาบโฟกัส (Focus Plane) ด้วยการเลื่อนตำแหน่งของพื้นผิวหรือเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ในแนวแกน z พร้อมทั้งทำการสแกนแบบแรสเตอร์ที่แต่ละตำแหน่งของระนาบโฟกัส จะทำให้ได้ภาพโครงสร้างของพื้นผิวเป็น 3 มิติ สัญญาณของความเข้มแสงทั้งหมดที่มาจากจุดแต่ละจุดบนพื้นผิวทดสอบที่เข้าสู่ตัววัดแสง หรือก็คือ Axial Point Spread Function (PSF) จะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างระนาบโฟกัสกับตัวตรวจวัดแสง ถ้าเลนส์ใกล้วัตถุมีค่า Numerical Aperture (NA) < 0.5 แลบกว้างของ Axial PSF (Width of Axial PSF) ของความเข้มแสงที่แต่ละจุดบนวัตถุ หาได้จาก $FWHM = (0.9\lambda/NA^2)$ การสแกนในแนวแกน z จะทำให้ได้ค่าความเข้มแสงสูงสุดที่แต่ละจุดบนพื้นผิวทดสอบ ค่าความเข้มแสงสูงสุดจะสอดคล้องกับตำแหน่งของภาพที่ถูกโฟกัส จะเห็นได้ว่า ความละเอียดในแนวแกน z มีค่าขึ้นอยู่กับ NA นั่นก็คือ กำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุ ความละเอียดในแนวแกน z จะมียุคมากขึ้นเมื่อ สัญญาณ Axial PSF ของความเข้มแสงมีแถบความกว้างของสัญญาณที่แคบ ความละเอียดในแนวแกน z จะเป็นตัวกำหนดระดับความสูงต่ำสุดของพื้นผิวทดสอบที่จะสามารถวัดได้

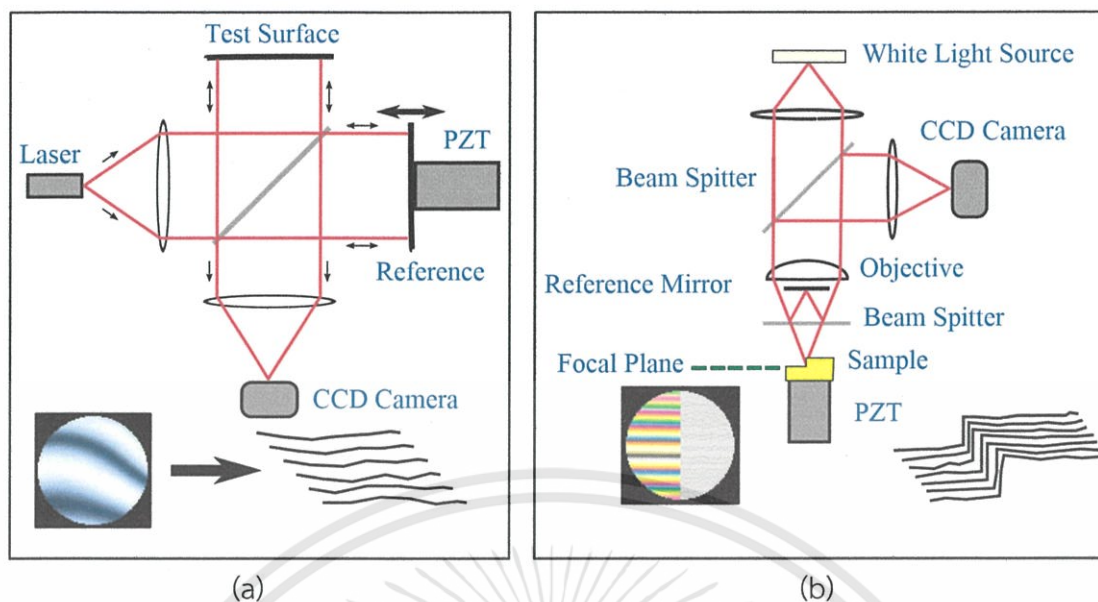
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ไมโครสโคปีแบบคอนโฟคอลตรวจวัดพื้นผิวทดสอบที่มีความเรียบมากในระดับ 2-3 nm จึงจำเป็นต้องใช้เลนส์ใกล้วัตถุที่มีกำลังขยายสูงมาก ในขณะที่เลนส์ใกล้วัตถุที่มีกำลังขยายต่ำจะทำให้ระบบไมโครสโคปีแบบคอนโฟคอลมีความละเอียดในแนวแกนตั้งเหลือเพียง 10-12 μm [14]

2.1.3 วิธีการวัดความเรียบพื้นผิวแบบไม่สัมผัสด้วยการแทรกสอดของลำแสง

การวัดความหยาบผิวด้วยหลักการการแทรกสอดของแสงนั้น ส่วนมากใช้กับพื้นผิวที่มีความขรุขระน้อย พื้นการแทรกสอดวิธีการวัดความหยาบผิวโดยใช้หลักการแทรกสอดของลำแสง เรียกว่า อินเตอร์เฟอโรเมทรี (Interferometry) [28] อินเตอร์เฟอโรเมทรีไม่ได้เป็นวิธีหรือเทคนิคที่ใหม่แต่อย่างใด แต่เมื่อรวมอินเตอร์เฟอโรเมทรีเข้ากับชุดอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ และ โปรแกรม จึงทำให้อินเตอร์เฟอโรเมเตอร์กลายเป็นเครื่องมือวัดที่ทันสมัยใหม่และมีประสิทธิภาพสูง มีความถูกต้องและรวดเร็วในวิเคราะห์ผลการวัดมากขึ้น อินเตอร์เฟอโรเมเตอร์ อาศัยหลักการวิเคราะห์ความต่างเฟสหรือผลต่างทางเดินแสงจากผลต่างรูปร่างการแทรกสอดของลำแสง 2 ลำ ลำหนึ่งเกิดจากการสะท้อนจากพื้นผิวอ้างอิง และ อีกลำหนึ่งเกิดจากการสะท้อนจากพื้นผิวทดสอบ ลักษณะผลต่างรูปร่างการแทรกสอดที่เกิดขึ้นจะนำไปคำนวณหาค่าความสูงต่ำหรือความเรียบของพื้นผิว ความถูกต้องในการคำนวณขึ้นอยู่กับความต่างของระดับสี (Contrast) ว่ามีค่ามากหรือน้อย ถ้าความเข้มแสงที่สะท้อนจากพื้นผิวอ้างอิงและทดสอบมีค่าเท่ากัน จะทำให้ได้ความต่างของระดับสีสูงสุด การวิเคราะห์โครงร่างพื้นผิวจากอินเตอร์เฟอโรเมเตอร์ทำโดยการบันทึกภาพอินเตอร์เฟอโรแกรม (Interferogram) ซึ่งอาจเป็นภาพเดียวหรือมากกว่า 1 ภาพ ขึ้นอยู่กับวิธีและขั้นตอนการวิเคราะห์ภาพอินเตอร์เฟอโรแกรม ดังนั้นการวัดความเรียบด้วยอินเตอร์เฟอโรเมเตอร์ ขั้นตอนการวิเคราะห์ภาพจึงถือได้ว่าเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญ

ในกระบวนการวิเคราะห์ภาพที่ต้องมีอินเตอร์เฟอโรแกรมมากกว่าหนึ่งเฟรมนั้น ภาพแต่ละเฟรมเป็นผลต่างรูปร่างการแทรกสอดที่เกิดจากผลต่างของทางเดินแสงระหว่างเส้นทางเดินแสงของลำแสงอ้างอิงกับลำแสงวัตถุมีค่าต่างกัน ความแตกต่างของผลต่างทางเดินแสงอาจเกิดจากการเลื่อนตำแหน่งไปของพื้นผิวอ้างอิงหรือพื้นผิวทดสอบเข้าออก การเลื่อนไปของพื้นผิวสามารถควบคุมด้วยทรานสดิวเซอร์เพียโซอิเล็กทริกหรือการสแกนของมอเตอร์ โดยเทคนิคที่นิยมนำมาใช้กับอินเตอร์เฟอโรเมทรีนี้มีอยู่ด้วยกัน 3 เทคนิค คือ อินเตอร์เฟอโรเมทรีแบบเลื่อนเฟส (Phase Shifting Interferometry, PSI) [19] อินเตอร์เฟอโรเมทรีแบบสแกนในแนวแกนตั้ง (Vertical Scanning Interferometry, VSI) [20] และ อินเตอร์เฟอโรเมทรีแบบเพิ่มประสิทธิภาพของสแกนในแนวแกนตั้ง (Enhanced VSI) [21] ไต่อะแกรมการจัดวางอุปกรณ์เชิงของอินเตอร์เฟอโรเมเตอร์ที่ใช้ร่วมกับเทคนิค PSI และ VSI แสดงดังภาพที่ 2.5 โดยมีทรานสดิวเซอร์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Transducer, PZT) เป็นอุปกรณ์ควบคุมระยะการเลื่อนไปของพื้นผิวที่ลำแสงตกกระทบ อินเตอร์เฟอโรเมทรีเหล่านี้ถูกนำมาใช้กันมากในกระบวนการผลิตอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์และทางแสงขนาดเล็ก (Micro-electronic and Micro-optic Fabrication) PSI เป็นเทคนิคที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงชนิดอาพันธ์ (Coherent Light Source) เหมาะสมกับการวิเคราะห์พื้นผิวที่มีความเรียบสูงมาก

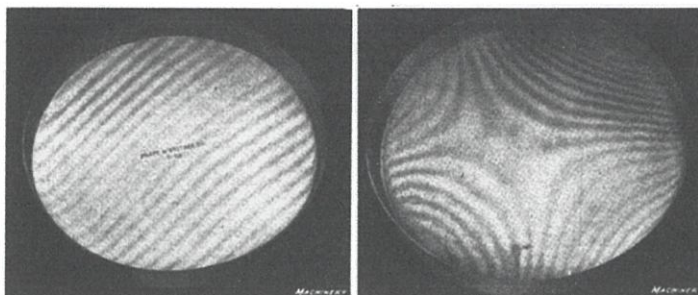


ภาพที่ 2.5 เทคนิค PSI ที่ใช้งานร่วมกับไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ [22]

แต่อย่างไรก็ตามเทคนิค PSI มีขีดความสามารถในการวัดระดับความสูงค่อนข้างมากโดยความแตกต่างของระดับสูงของพื้นผิวอ้างอิงเทียบกับพื้นผิวทดสอบที่แต่ละพิกเซลที่อยู่ติดกันต้องมีค่าน้อยกว่า $\lambda/4$ เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง ถ้ามีค่ามากกว่า $\lambda/4$ จะทำให้เกิดความกำกวมในการประเมินความสูงจากความเข้มแสงที่มีค่าผลต่างทางเดินแสงมากกว่าจำนวนหนึ่งเท่าของ $\lambda/2$ นั่นคือ PSI ไม่เหมาะที่จะมาใช้วัดพื้นผิวที่มีความเรียบหรือความขรุขระแบบไม่ต่อเนื่อง ในขณะที่เทคนิค VSI ซึ่งใช้แหล่งกำเนิดแสงไม่อาพันธ์นั้นสามารถวัดพื้นผิวที่มีระดับความเรียบน้อยมาก หรือพื้นผิวที่มีระดับความสูงจากพื้นผิวอ้างอิงได้ตั้งแต่ช่วงระดับเซนติเมตรจนถึงไมโครเมตร ในขณะที่ EVSI เป็นเทคนิคที่รวมทั้ง PSI และ VSI เข้าไว้ด้วยกัน ทำให้เป็นเทคนิคที่มีความละเอียดสูงและมีช่วงหรือระยะในการวัดที่กว้าง

2.1.3.1) อินเทอร์เฟอริมิเตอร์แบบเลื่อนเฟส

การวิเคราะห์ภาพอินเทอร์เฟอแกรมเพื่อสร้างเค้าโครงร่างของพื้นผิวแบบดั้งเดิมนั้น จะใช้อินเทอร์เฟอแกรมเพียงภาพเดียวเท่านั้น โดยจำเป็นต้องระบุตำแหน่งจุดศูนย์กลางของภาพ จากภาพที่ 2.6 แสดงลวดลายริ้วการแทรกสอดจากแผ่นเรียบเชิงแสง (Optical Flat) 2 ชั้นลวดลายที่มีริ้วการแทรกสอดไม่เป็นเส้นตรงแต่มีระยะห่างของริ้วเท่า ๆ กันและค่อนข้างชิดกัน จะมีผลทำให้เกิดความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งได้ง่าย ความผิดพลาดที่เกิดจากการระบุตำแหน่งศูนย์กลางภาพเป็นขีดจำกัดทำให้ความแม่นยำของระบบลดลง นอกจากนี้การวิเคราะห์ภาพเพียงภาพเดียวยังไม่สามารถระบุได้ว่าพื้นผิวนั้นเป็นพื้นผิวที่นูนหรือเว้าลงไปเมื่อเทียบกับพื้นผิวอ้างอิง ทั้งนี้เนื่องจากไม่สามารถระบุหรือบ่งบอกเครื่องหมายของหน้าคลื่นที่สะท้อนออกมาจากพื้นผิวทดสอบได้ [28]



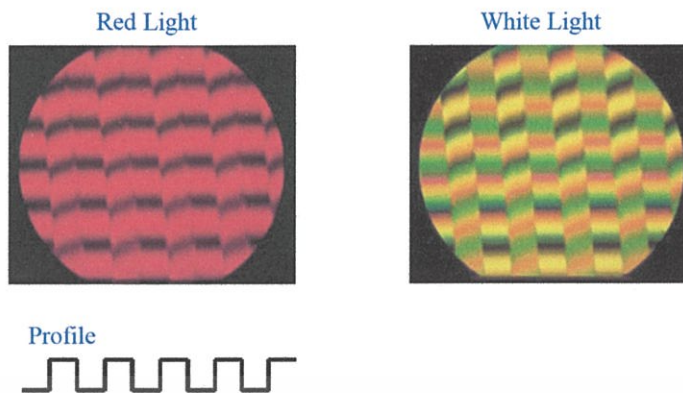
ภาพที่ 2.6 ลวดลายริ้วการแทรกสอดของแผ่นเรียบเชิงแสง [23]

PSI เป็นเทคนิคที่ไม่ต้องระบุศูนย์กลางของภาพ ทุกพิกเซลบนลวดลายริ้วการแทรกสอดจะถูกบันทึกความเข้มแสงไว้ด้วยกล้อง CCD PSI เป็นเทคนิคที่ต้องทำการบันทึกอินเทอร์เฟอแกรมไว้อย่างน้อย 3 เฟรม แต่ละเฟรมนั้นเกิดจากการขยับหรือเลื่อนพื้นผิวอ้างอิงหรือทดสอบ เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงผลต่างทางเดินแสง ระยะที่เลื่อนพื้นผิวนั้นจะต้องเป็นระยะที่ทราบค่าแน่นอน ซึ่งถูกควบคุมด้วย PZT ตัวอย่างของการจัดวางอุปกรณ์ทางแสงด้วยไมโครสโคปอินเทอร์เฟอเมตริกพร้อมกับเทคนิค PSI แสดงดังภาพที่ 2.5 (a) ภาพที่ถูกบันทึกไว้จะถูกประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณหาความคลาดของหน้าคลื่น (Wavefront Error) ที่เคลื่อนที่ออกมาจากพื้นผิววัสดุ (ความคลาดของหน้าคลื่น เกิดจากหน้าคลื่นที่สะท้อนออกมาจากพื้นผิวทดสอบผิดเพี้ยนไปจากเดิม เกิดเนื่องจากความไม่เรียบของพื้นผิวทดสอบเมื่อเทียบกับพื้นผิวอ้างอิง) ระบบทางแสงของอินเทอร์เฟอเมตริกที่นิยมใช้กับ PSI ได้แก่ Twyman-Green, Mach-Zehnder และ Laser Fizeau Interferometer เป็นต้น PSI เป็นเทคนิคที่ถูกเลือกใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้รายละเอียดของ PSI รวมทั้งการจัดวางอุปกรณ์ทางแสง และ กระบวนการวิเคราะห์ภาพ จะได้กล่าวถึงต่อไป

2.1.3.2) อินเทอร์เฟอเมตริกแบบสแกนในแนวตั้ง

เทคนิค VSI เป็นเทคนิคหนึ่งในการวัดโครงสร้างของพื้นผิวโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 2 ค่า หรือ แหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวโคฮีเรนซ์สั้นมาก อินเทอร์เฟอเมตริกที่ใช้ VSI จึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Coherence Probe Interferometry [24] โดยทั่วไปนิยมใช้แหล่งกำเนิดแสงขาว รูปแบบหนึ่งของการจัดวางอุปกรณ์เชิงแสงที่ใช้ร่วมกับเทคนิค VSI แสดงดังภาพที่ 2.5 (b) VSI เป็นเทคนิคที่ใช้การเลื่อนพื้นผิวทดสอบเพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงผลต่างทางเดินแสงจนทำให้เกิดลวดลายริ้วการแทรกสอดของลำแสงที่มีความคมชัดสูงสุด

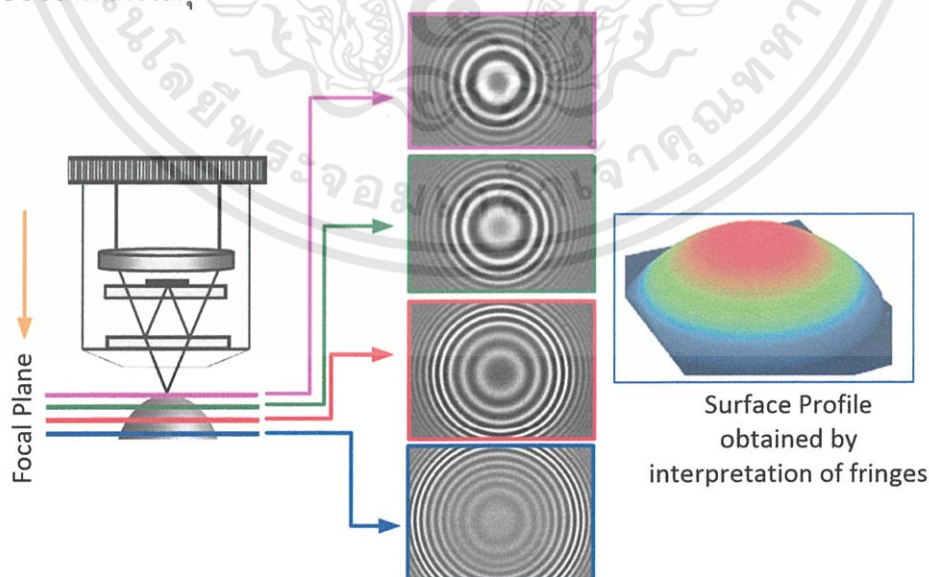
การใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวโคฮีเรนซ์สั้นมาก ทำให้สามารถกำจัดข้อเสียของเทคนิค PSI ได้ ถ้าแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้มีความยาวคลื่น 2 ค่า เป็น λ_1 และ λ_2 ค่าความสูงของระดับพื้นผิวสูงสุดที่ระบบสามารถวัดได้มีค่าเป็น $\lambda_{eq}/4$ โดยที่ $\lambda_{eq} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$ เห็นได้ว่า การเลือกใช้ความยาวคลื่น 2 ค่า จะมีผลทำให้สามารถวัดความสูงของระดับพื้นผิวสูงสุดได้สูงขึ้น ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ความคมชัดของริ้วการแทรกสอดที่เกิดจากพื้นผิวที่มีความขรุขระเป็นขั้นแต่ละขั้นห่างกันมากกว่า $\lambda/4$ เมื่อใช้แสงสีแดงและแสงสีขาว [24]

เทคนิค VSI จึงเป็นเทคนิคต้องใช้แหล่งกำเนิดที่มีความกว้างของสเปกตรัมมาก เนื่องจากแสงที่มีสเปกตรัมกว้างจะมีความยาวโคฮีเรนที่สั้นมาก ทำให้ภาพที่ได้มีความคมชัดมาก การหาความสูงของพื้นผิวทำให้ได้การปรับเลือนผิวทดสอบไปที่ละขั้น เมื่อพิกเซลใดบนพื้นผิวมีความสูงที่อยู่บนระนาบโฟกัส ที่พิกเซลนั้นจะมีความคมชัดของริ้วการแทรกสอดสูงสุด ดังตัวอย่างในภาพที่ 2.8

ในปัจจุบันอินเตอร์เฟอเมทรี (Interferometry) ถือได้ว่าเป็นวิธีการตรวจสอบทางแสง (Optical testing) ที่มีความแม่นยำสูง [25] จึงได้รับความนิยมทั้งในงานทางด้านอุตสาหกรรมและกลุ่มงานวิจัยหลายด้านด้วยกัน [5-9] เช่น การนำประยุกต์ในทางด้านการวัดระยะทางการสั่น การวัดการไหลของแก๊สและพลาสมา การวัดสภาพพื้นผิวของวัสดุและอุปกรณ์ทางแสงและการวัดอุณหภูมิ หรือการขยายตัวของวัสดุเนื่องจากความร้อน เป็นต้น อินเตอร์เฟอเมทรีเป็นวิธีการตรวจสอบชิ้นงานหรือสถานะของระบบโดยใช้หลักการแทรกสอดของแสง (Interferometric Optical Testing) ระบบการวัดหรือเครื่องมือวัดที่ใช้หลักการนี้เรียกว่า อินเตอร์เฟอมิเตอร์ (Interferometer) โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการนำอินเตอร์เฟอมิเตอร์มาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านการวัดโครงสร้างสามมิติและวัดความเรียบของพื้นผิววัสดุ



ภาพที่ 2.8 ความคมชัดของตำแหน่งริ้วการแทรกสอดขึ้นอยู่กับ การเลื่อนตำแหน่งของพื้นผิว เมื่อระดับความสูงอยู่ในระนาบโฟกัส ริ้วการแทรกสอดจะมีความคมชัดสูงสุด (ดัดแปลงมาจาก [26])

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความท้าทายของปัญหาในการประเมินโครงสร้างสามมิติด้วยอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์คือการประเมินภาพอินเทอร์เฟอโรแกรมที่ได้จากการบันทึกภาพพลวัตอย่างรวดเร็วการแทรกสอด การประเมินภาพอินเทอร์เฟอโรแกรมจะทำให้ได้มาซึ่งข้อมูลของหน้าคลื่น (Wavefront) ซึ่งมีความเชื่อมโยงอยู่กับข้อมูลของลักษณะโครงสร้างของพื้นผิว ดังนั้นในการทำวิทยานิพนธ์ภายใต้หัวข้อนี้จึงมีส่วนสำคัญหลัก ๆ ที่ต้องให้ความสนใจอยู่ 3 ส่วนด้วยกันคือ หลักการการแทรกสอดของแสงวิธีการตรวจสอบทางแสงและระเบียบวิธีการประเมิน และวิเคราะห์ภาพอินเทอร์เฟอโรแกรมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นหัวใจหลักของวิทยานิพนธ์นี้

2.2 การแทรกสอดของแสง [8-9, 27-28]

การรวมกันของคลื่นที่ตำแหน่งใด ๆ ในตัวกลางเรียกว่า การแทรกสอด (interference) และเรียกเครื่องมือวัดที่อาศัยหลักการแทรกสอดของคลื่นว่า อินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ (Interferometer) พิจารณาคลื่นรูปไซน์สองคลื่น เคลื่อนที่ในทิศเดียวกันแทนด้วย y_1 และ y_2 คลื่นทั้งสอง มีความถี่เท่ากันแต่มีเฟสต่างกันโดย

$$y_1 = A_1 \sin(kx - \omega t + \phi_1) \quad (2.1)$$

$$y_2 = A_2 \sin(kx - \omega t + \phi_2) \quad (2.2)$$

เมื่อ

A คือ แอมพลิจูดของคลื่น

$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ คือ ความต่างเฟสระหว่างคลื่นทั้งสอง

ถ้าคลื่นทั้งสองมีแอมพลิจูดเท่ากับ A และ พบกันจนเกิดการแทรกสอด จะได้ว่า

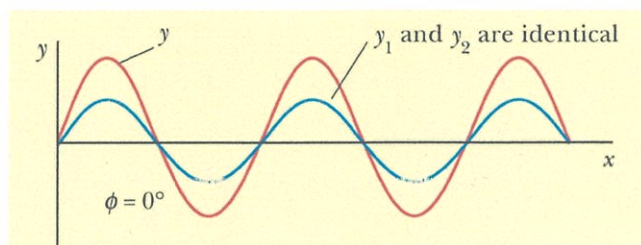
$$y = y_1 + y_2 = A[\sin(kx - \omega t - \phi_1) + \sin(kx - \omega t + \phi_2)] \quad (2.3)$$

โดยความสัมพันธ์ $\sin a + \sin b = 2 \cos\left(\frac{a-b}{2}\right) \sin\left(\frac{a+b}{2}\right)$

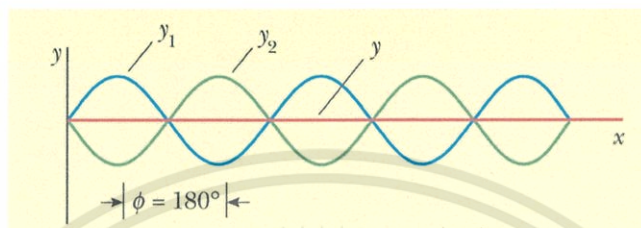
ให้ $a = kx - \omega t + \phi_1$ และ $b = kx - \omega t + \phi_2$ จะได้ฟังก์ชันคลื่นรวม

$$y = \left(2A \cos\frac{\Delta\phi}{2}\right) \sin\left(kx - \omega t + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (2.4)$$

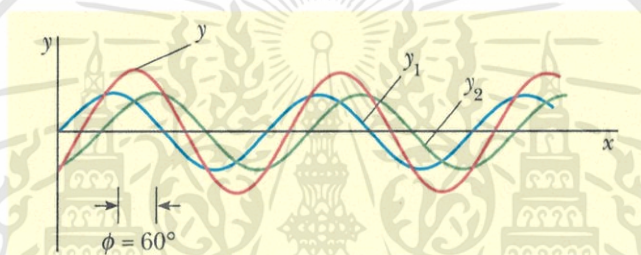
สมการของคลื่นรวมนี้มีความสำคัญหลายประการ กล่าวคือสมการแสดงให้เห็นว่าคลื่นรวมยังคงเป็นคลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่และความยาวคลื่นเท่าเดิม แอมพลิจูดของคลื่นรวมคือ $2A \cos(\Delta\phi/2)$ และมีความต่างเฟสคือ $\frac{\Delta\phi}{2}$ ถ้าคลื่น y_1 และ y_2 มีเฟสตรงกันนั่นคือ $\Delta\phi = 0$ จะได้ว่าคลื่นรวมมีแอมพลิจูดเท่ากับ $2A$ หรือมีแอมพลิจูดเป็นสองเท่าของแอมพลิจูดของแต่ละคลื่น กรณีนี้เรียกว่า การแทรกสอดแบบเสริม (constructive interference) เกิดเนื่องจากยอดคลื่นของแต่ละคลื่นอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.9 (a) โดยทั่วไปการแทรกสอดแบบเสริมกันนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ $\cos(\Delta\phi/2) = \pm 1$ หรือเมื่อ $\phi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$



(a)



(b)



(c)

ภาพที่ 2.9 การซ้อนทับของคลื่น y_1 และ y_2 [29]

- คลื่นทั้งสองมีเฟสตรงกัน เกิดการแทรกสอดแบบเสริม
- คลื่นทั้งสองมีเฟสต่างกัน π rad เกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง
- คลื่นทั้งสองมีเฟสต่างกันในช่วง 0 ถึง π rad คลื่นรวมจะมีแอมพลิจูดน้อยกว่า (a) แต่มากกว่า (b)

ในทางตรงข้าม ถ้ามุม $\phi = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$ จะทำให้ $\cos(\pi/2) = \cos(\pi) = \cos(3\pi/2) = \cos(5\pi/2) = 0$ เป็นผลให้แอมพลิจูดของคลื่นรวมเป็นศูนย์ในกรณีนี้เรียกว่า การแทรกสอดแบบหักล้าง (destructive interference) เกิดขึ้นเมื่อยอดคลื่นของคลื่นหนึ่งตรงกับท้องคลื่นของอีกคลื่นหนึ่งดังภาพที่ 2.9 (b) การกระจัดของคลื่นจะหักล้างกันหมด สุดท้ายถ้าค่าของเฟสมีค่าอยู่ระหว่าง 0 กับ π ดังแสดงในภาพที่ 2.9 (c) คลื่นรวมจะมีแอมพลิจูดอยู่ระหว่าง 0 ถึง $2A$ ความเข้มแสงที่เกิดจากการแทรกสอดกันของคลื่น 2 ลำ มีค่าเป็นไปดังนี้

$$\begin{aligned}
 I &= |y|^2 = |y_1 + y_2|^2 \\
 &= A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \\
 &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cos \Delta\phi
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

โดยความเข้มแสงเฉลี่ยมีค่าเป็น $\bar{I} = I_1 + I_2$ และเรียกเทอม $2\sqrt{I_1I_2} \cos \Delta\phi$ ว่าเทอมแทรกสอด (interference term) โดยความสว่างของคลื่นรวมจะขึ้นกับเทอมแทรกสอดนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

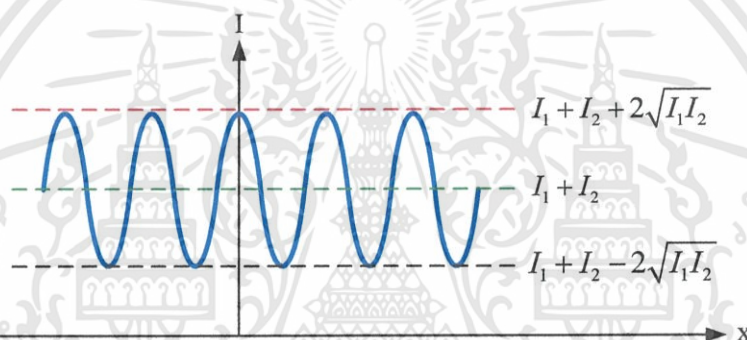
พิจารณาผลต่างเฟสของคลื่นทั้งสอง ถ้า $(\phi_1 - \phi_2) = (2n+1)\pi$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) ดังนั้น $\cos(\phi_1 - \phi_2) = -1$ จะได้ว่า

$$I = I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (2.6)$$

ความเข้มแสงนี้เป็นความสว่างต่ำสุด เกิดเมื่อคลื่นทั้งสองมีเฟสต่างกัน 180° เรียกว่า anti phase และเรียกว่าเกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง (Destructive interference) แต่ถ้า $(\phi_1 - \phi_2) = 2n\pi$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) ดังนั้น $\cos(\phi_1 - \phi_2) = 1$ จะได้ว่า

$$I = I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (2.7)$$

ซึ่งเป็นความสว่างสูงสุด เกิดเมื่อคลื่นทั้งสองมีเฟสตรงกัน เรียกว่า inphase กัน และเรียกว่าเกิดการแทรกสอดแบบเสริมสร้าง (constructive interference) โดยความสัมพันธ์ระหว่าง I_1 และ I_2 แสดงดังภาพที่ 2. 10



ภาพที่ 2. 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงสูงสุด เฉลี่ย และ ต่ำที่สุด [30]

ในกรณีที่คลื่นทั้งสองมีความเข้มเท่ากัน : $I_1 = I_2 = I_0$

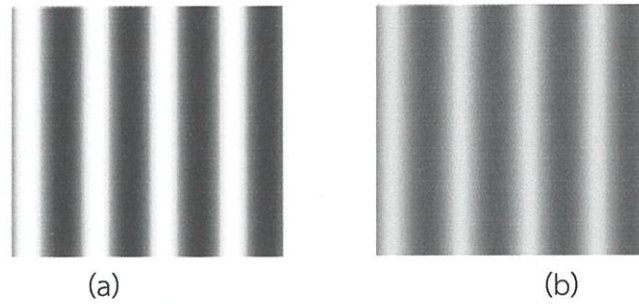
$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi) \\ &= 2I_0 [1 + \cos(\Delta\phi)] \\ &= 4I_0 \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \end{aligned} \quad (2.8)$$

เมื่อ $\cos^2(\phi_1 - \phi_2)$ มีค่าระหว่าง 0 - 1 และการแทรกสอดจะทำให้แสงมีความเข้มเป็น 0 ที่จุดมืด (แทรกสอดแบบหักล้าง) และมีความเข้มเป็น $4I_0$ ที่จุดสว่าง (แทรกสอดแบบเสริมสร้าง) ความเข้มแสงจึงมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 0 ถึง $4I_0$ ความแตกต่างระหว่างความเข้มแสงสูงสุดและต่ำสุด หรือความแตกต่างระหว่างแถบสว่างกับแถบมืด ซึ่งก็คือ ความคมชัด (Contrast, C) มีนิยามว่า

$$C_I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2.9)$$

ริ้วการแทรกสอดที่หน้าคลื่น 2 ลำ ที่มีความแตกต่างระหว่างความเข้มแสงของแถบสว่างกับแถบมืดต่างกันแสดงดังภาพที่ 2. 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

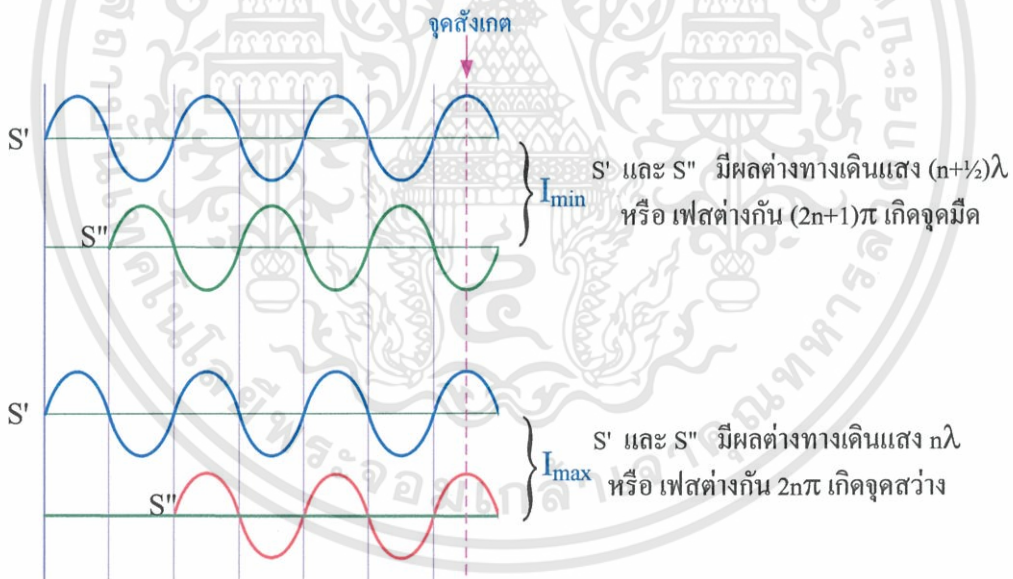


ภาพที่ 2. 11 ลวดลายร้วการแทรกสอดที่มีความคมชัดความแตกต่างกัน [30]

- (a) ความคมชัดของร้วการแทรกสอดสูง (High contrast)
- (b) ความคมชัดของร้วการแทรกสอดต่ำ (Low contrast)

ในกรณีที่แสงสองลำมีเฟสตรงกัน ($\Delta\phi = 0$) เนื่องจากมาจากแหล่งกำเนิดเดียวกัน (เช่นกรณีของไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์) เฟสของแสงจะต่างกันได้ถ้าแสงสองลำนั้นเดินทางถึงจุดสังเกตด้วยระยะทางที่ต่างกัน (โดยการปรับระยะห่างระหว่างกระจก) เช่นแสงจาก S' เดินทางถึงจุดสังเกตมีระยะทางมากกว่าจาก S'' เท่ากับ $(S' - S'')$ ดังภาพที่ 2. 12 ระยะทางนี้เรียกว่า ผลต่างทางเดินแสง (path difference) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความต่างเฟส (phase difference), $\Delta\phi$ ดังนี้

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x \Rightarrow \phi_1 - \phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} (S' - S'') \tag{2.10}$$



ภาพที่ 2. 12 การแทรกสอดแบบหักล้างและแบบเสริมสร้างเนื่องจากผลต่างทางเดินแสง [31]

2.3 การตรวจสอบทางแสงและอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ (Optical Testing and Interferometer)

สำหรับคำนิยามของคำว่า การตรวจสอบทางแสง มีอยู่ด้วยกันมากมาย [27] แต่สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้การตรวจสอบทางแสงถูกให้นิยามว่าเป็นการตรวจสอบคุณภาพเชิงแสงของระบบหรือชิ้นงานด้วยเทคนิคทางแสง ซึ่งชิ้นงานในที่นี้หมายรวมถึงชิ้นงานหรืออุปกรณ์ที่ใช้กับงานทางด้านแสง รวมทั้งชิ้นงานต่าง ๆ ที่มีความเรียบสูง เช่น แผ่นซิลิกอนที่ได้รับการขัดมัน (Polished silicon wafer) แผ่นแก้วที่ใช้เป็นฐานรองรับสำหรับเคลือบฟิล์มบาง เป็นต้น เนื่องจากชิ้นงานดังกล่าวเหล่านี้พื้นผิวค่อนข้างมีความเรียบสูง [7] การตรวจสอบพื้นผิวความเรียบจึงมีความจำเป็น ซึ่งการตรวจสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

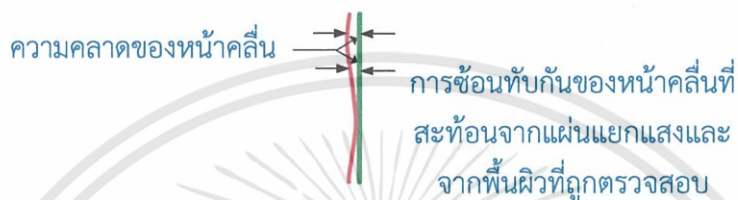
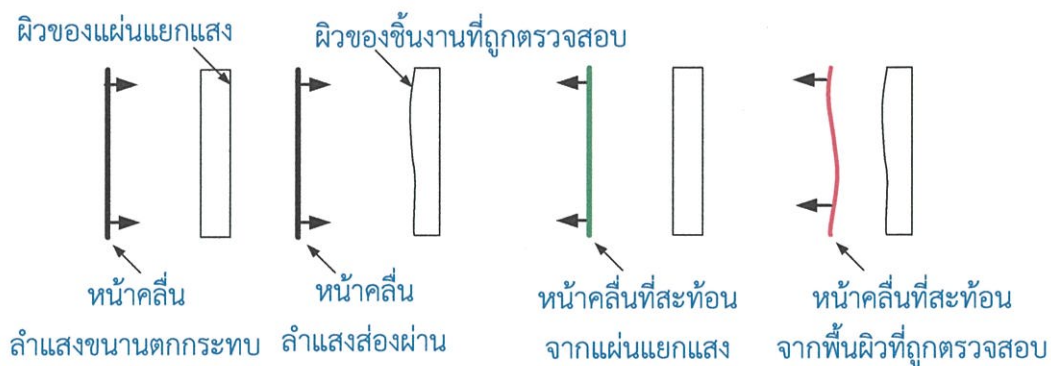
ทางแสงแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ไม่ได้ใช้หลักการแทรกสอดทางแสงและแบบที่ใช้หลักการแทรกสอดทางแสง เครื่องมือหรือระบบที่ใช้หลักการการแทรกสอดทางแสงเรียกว่า อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ ซึ่งก็คือชุดอุปกรณ์เชิงแสงที่ทำการแยกลำแสงจากแหล่งกำเนิดแหล่งหนึ่งออกเป็น 2 ลำ โดยแสงลำหนึ่งจะตกกระทบบนพื้นผิวของแผ่นเรียบเชิงแสง (Optical flat) หน้าคลื่นที่สะท้อนออกจากแผ่นเรียบเชิงแสงและลำแสงอีกลำหนึ่งจะตกกระทบบนพื้นผิวของแผ่นทดสอบ (Surface Under Test) ซึ่งหน้าคลื่นของลำแสงลำนี้จะผิดเพี้ยนไปตามลักษณะโครงสร้างของพื้นผิวหลังจากนั้นลำแสงทั้ง 2 ลำจะเกิดการแทรกสอดกันจนเกิดเป็นลวดลายริ้วการแทรกสอด การวิเคราะห์ลวดลายริ้วการแทรกสอดทำให้สามารถบ่งบอกความแตกต่างของเส้นทางเดินเชิงแสงของลำแสงทั้งสองที่แต่ละตำแหน่งของริ้วการแทรกสอดได้ ลักษณะของพื้นผิววัสดุที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อลวดลายริ้วการแทรกสอด จึงทำให้สามารถบ่งชี้ถึงลักษณะของพื้นผิวได้จากลวดลายที่เกิดขึ้น

อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ยังสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายแบบ ขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดวางเรียงชุดอุปกรณ์เชิงแสงเพื่อให้เกิดการแทรกสอด เช่น พิโซอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ (Fizeau Interferometer) เชียร์ริงอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ (Shearing Interferometer) และไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ (Michelson Interferometer) หรือที่รู้จักกันดีในชื่อของ ทไวแมน-กรีนอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ (Twyman-Green interferometer) [28, 32] เป็นต้น เทคนิคอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ที่ใช้ในการวัดความเรียบของพื้นผิว มักจะเป็นจะเป็นพิโซอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์และไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์แต่ละแบบมีความเหมาะสมในการวัดความเรียบของพื้นผิวที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น พิโซอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์เหมาะสำหรับตัวอย่างที่มีการสะท้อนแสงที่ผิวต่ำเนื่องจากต้องใช้วัสดุอ้างอิงเป็นแบบโปร่งแสงหรือมีการสะท้อนแสงได้น้อย ในขณะที่ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์จะใช้ในการวัดความเรียบได้ดีกับพื้นผิวที่มีการสะท้อนแสงได้มากในขณะเดียวกันก็ต้องใช้วัสดุอ้างอิงที่มีการสะท้อนแสงได้มากเช่นกัน

โดยในที่นี้จะขอกล่าวถึง รายละเอียดของเชียร์ริงอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์และไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ ซึ่งเป็นอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ที่ได้นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งโดยพื้นฐานแล้ว อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ทั้งหลายนั้นมีหลักการทำงานเช่นเดียว กับอินเตอร์ฟีรอมิอย่างง่าย (Simple Interferometer)

2.3.1 อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์อย่างง่าย [8, 34]

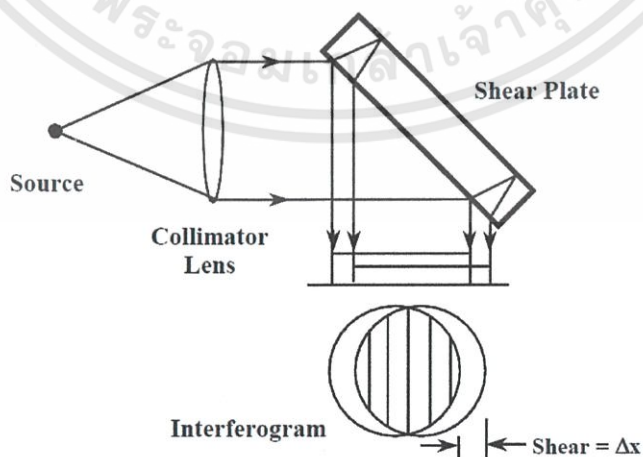
รูปแบบและหลักการของอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์อย่างง่ายแสดงดังภาพที่ 2. 13 ลำแสงความยาวคลื่นเดียวตกกระทบบนตัวแยกแสง (Beam splitter) ลำแสงจะถูกแยกออกเป็น 2 ลำ ลำหนึ่งสะท้อนกลับ ส่วนอีกลำหนึ่งทะลุผ่านไปยังพื้นผิวทดสอบ (Surface under test) และสะท้อนกลับออกไปจากพื้นผิว หน้าคลื่นที่สะท้อนออกมาจากพื้นผิวทดสอบจะมีลักษณะที่แตกต่างออกไปขึ้นอยู่กับสภาพของพื้นผิว หน้าคลื่นที่สะท้อนออกจากตัวแยกแสงกับพื้นผิวทดสอบจะเกิดการแทรกสอด



ภาพที่ 2.13 อินเตอร์เฟอริมิเตอร์อย่างง่าย [33]

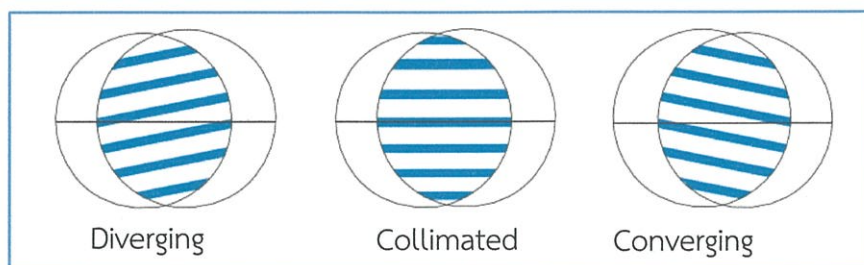
2.3.2 เชียร์ริงอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ [8, 34, 35]

ลวดลายรบกวนการแทรกสอดของเชียร์ริงอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ เกิดเมื่อคลื่นระนาบ (Plane wave) ตกกระทบทำมุม 45 องศา กับแผ่นแก้วหนาที่ผิวด้านหน้าและด้านหลังมีความขนานกัน และมีความเรียบของผิวสูง (high-quality optical flat) เรียกกันว่า เชียร์เพลต (Shear plate) ลำแสงเกิดการแยกออกเป็น 2 ลำ ได้โดยแสงลำแรก จะเกิดจากการสะท้อนที่ผิวด้านหน้าของเชียร์เพลต อีกลำจะเกิดจากการสะท้อนที่ผิวหลังของเชียร์เพลต แสงทั้งสองลำเกือบจะมีความเข้มเท่ากัน เส้นทางเดินทางแสงแสดงดังภาพที่ 2.14 แสงทั้งสองลำจะเกิดการแทรกสอดเมื่อหน้าคลื่นเกิดการซ้อนทับกัน การแยกลำแสงให้ออกเป็น 2 ลำ ในลักษณะอย่างนี้จึงเป็นที่มา ของคำว่า shear เชียร์ริงอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์ใช้สำหรับการตรวจสอบความขนานของลำแสง เนื่องจากเชียร์เพลตมีลักษณะเป็นแผ่นแก้วที่มีความหนา มีความเรียบของพื้นผิวสูงมากผิวด้านหน้าและด้านหลังมีความขนานกันมาก จึงทำให้ลำแสงทั้งสองที่เกิดการแทรกสอดกันไม่เกิดเป็นลวดลายรบกวนการแทรกสอด เกิดเพียงแถบสว่างหรือมืดเท่านั้น



ภาพที่ 2.14 เส้นทางเดินทางของแสง 2 ลำ ในเชียร์เพลต [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.15 ลวดลายรบกวนการแทรกสอดของลักษณะลำแสงขนานและไม่ขนานที่เกิดจากซีพเพลตอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ [36]

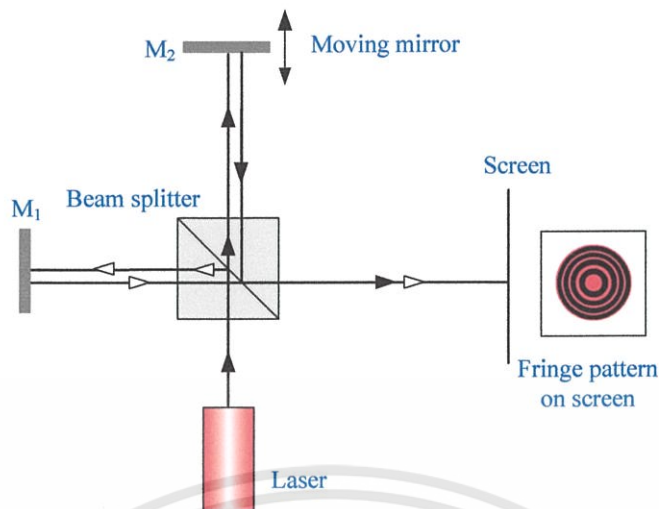
ในความเป็นจริงแล้ว ซีพเพลตที่ใช้กับซีพริงอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ ยังคงมีลักษณะเป็นแผ่นแก้วที่มีความหนาที่มีความเรียบของพื้นผิวสูงมาก แต่ผิวด้านหน้าและหลังจะทำมุมกันเล็กน้อย เนื่องจากลำแสงที่มีความขนานจะทำให้ไม่เกิดรบกวนการแทรกสอด จึงเป็นที่มาของชื่อ Wedge Shear Plate ลวดลายรบกวนการแทรกสอดที่เกิดจากซีพริงอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์จากลำแสงทั้งสองในลักษณะต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 2.15 ระยะห่างระหว่างริ้วมีค่าเป็นตามไปสมการที่ (2.11)

$$d_f = \frac{\lambda}{2n\theta} \quad (2.11)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของลำแสง
 n คือ ดัชนีหักเหเชิงแสง
 θ คือ มุมเอียงระหว่างผิวด้านหน้าและหลังของซีพเพลต (wedge angle)

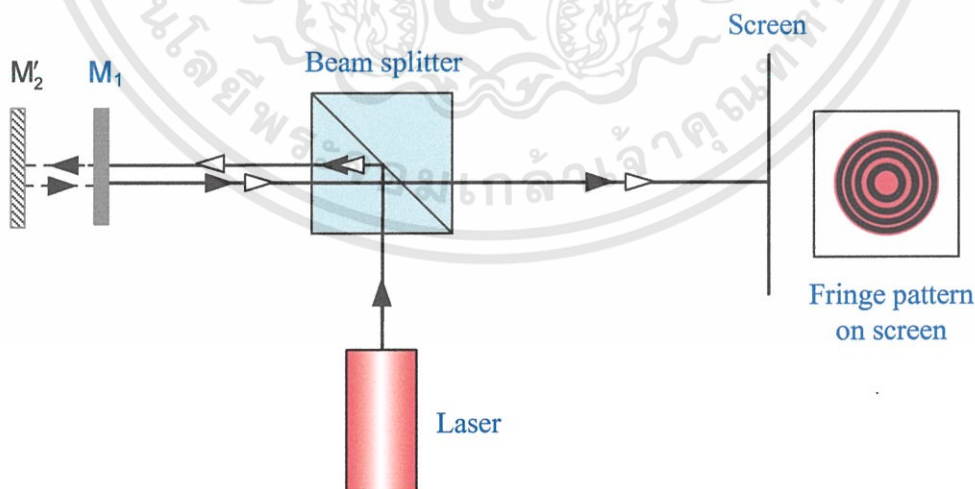
2.3.3 ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ [9, 30, 37]

ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ หรือที่นิยมเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ทไวแมน-กรีนอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Twyman Green Interferometer) [8] คิดค้นโดย อัลเบิร์ต อับราฮัม ไมเคลสัน ในปี ค.ศ. 1887 รูปแบบการแทรกสอดเกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดแสงโคฮีเรนต์เดียวกัน ถูกแยกออกเป็นแสงสองขบวนโดยตัวแยกลำแสง ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์มีการจัดอุปกรณ์ดังภาพที่ 2.16 (โดยก่อนที่แสงจะตกกระทบตัวแยกลำแสง แสงจะถูกขยาย ให้บานออกด้วยเลนส์ ซึ่งไม่แสดงไว้ในแผนภาพ) แสงจากแหล่งกำเนิดผ่านไปยัง ตัวแยกลำแสง ชนิด 50 : 50 ลำแสงจะแยกออกเป็นสองส่วนที่ตั้งฉากกัน และมีความเข้มแสงเท่ากัน โดยลำแสงที่ 1 (ลูกศรสีขาว) จะสะท้อนไปยังกระจก M_1 และสะท้อนกลับมายังตัวแยกลำแสง จากนั้นจะทะลุไปยังฉากรับแสง ส่วนลำแสงที่ 2 (ลูกศรสีดำ) จะทะลุ ผ่านไปยังกระจก M_2 และสะท้อนกลับมายังตัวแยกลำแสง จากนั้นจะสะท้อนไปยังฉากรับแสงเช่นกัน แต่เนื่องจากลำแสงทั้งสองเดินทางเป็นระยะทางไม่เท่ากัน (เนื่องจากกระจกทั้งสอง อยู่ห่างจากตัวแยกลำแสง ไม่เท่ากัน) ลำแสงทั้งสองจึงแทรกสอดกันโดยมีเฟสต่างกัน ทำให้เห็นแถบมืดและแถบสว่างเกิดเป็นวงบนฉากตามเงื่อนไขการเกิดแทรกสอดแบบหักล้างและเสริมสร้างตามลำดับ

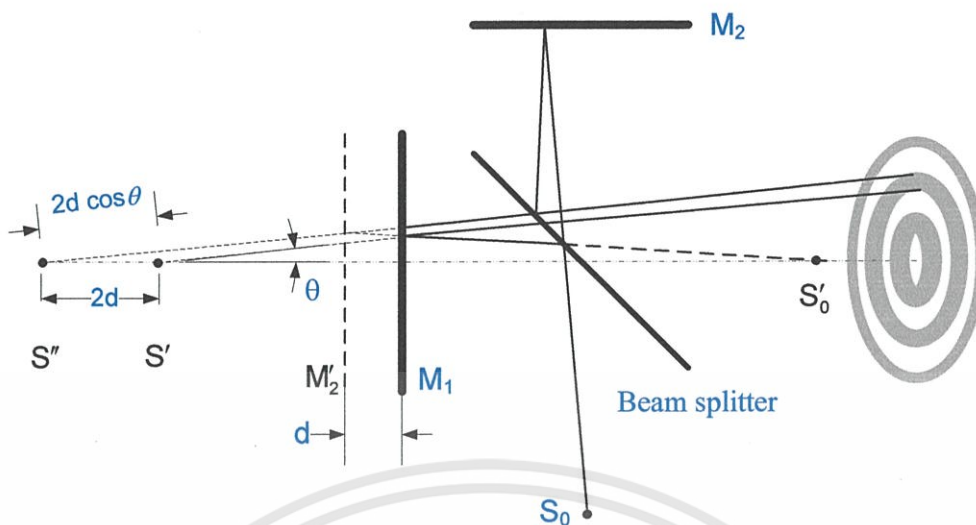


ภาพที่ 2. 16 ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ [31]

ในกรณีของไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ ความต่างเฟสของแสงที่แทรกสอดกันถูกกำหนดโดยผลต่างทางเดินแสง ซึ่งควบคุมโดยการเลื่อนระยะของกระจก M_2 ในมุมมองของผู้สังเกต จากทางด้านฉากรับแสงจะเห็นภาพของกระจก M_2 อยู่ที่ตำแหน่ง M'_2 ดังภาพที่ 2.17 แสงจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์บานออกเล็กน้อย (โดยเลนส์ เช่น เลนส์วัตถุของกล้องจุลทรรศน์) แสงจะตกกระทบบัวแยกแสงและกระจกเป็นรูปกรวย เพื่อให้เห็นภาพการเกิดริ้วแทรกสอดชัดเจนขึ้น จะพิจารณาแนวแสงที่ตกกระทบบัวแยกแสงและกระจกเป็นมุมเอียงเล็กน้อย ดังภาพที่ 2.18 แสงที่สะท้อนจากกระจกจะพิจารณาได้เสมือนกับว่ามีแหล่งกำเนิดแสงอยู่หลังกระจกเป็นระยะเท่ากับระยะจากแหล่งกำเนิดแสงจริงถึงกระจก ดังนั้นแสงจากแหล่งกำเนิดจริงที่ตำแหน่ง S_0 ที่สะท้อนจากกระจก M_1 จึงเสมือนกับมาจากแหล่งกำเนิดแสง S' และแสงที่สะท้อนจากกระจก M_2 จะเสมือนสะท้อนมาจากกระจก M'_2 ซึ่งเสมือนกับมาจากแหล่งกำเนิดแสง S'' โดยที่ M'_2 อยู่ห่างจากกระจก M_1 เป็นระยะทาง d ดังนั้นระยะห่างระหว่างแสงกำเนิดแสงเสมือน S' และ S'' มีค่าเป็น $2d$



ภาพที่ 2. 17 ตำแหน่งภาพของกระจก M_2 แสดงให้เห็นระยะห่างระหว่างกระจก [31]



ภาพที่ 2.18 การเกิดริ้วแทรกสอดจากแหล่งกำเนิดแสงเสมือน [31]

จากภาพที่ 2.18 พิจารณาตำแหน่งที่เกิดริ้วแทรกสอดบนฉากมาจากลำแสงที่ทำมุม θ กับแนวระดับ (optical axis) ดังนั้นผลต่างทางเดินแสง (optical path difference) ของลำแสงทั้งสอง คือ $\Delta x = 2d \cos \theta$ แสงที่แยกโดยตัวแยกแสงมีความเข้มเท่ากัน I_0 จากสมการที่ (2.8) เมื่อแสงแทรกสอดกันจะมีความเข้มและผลต่างเฟส δ ดังนี้

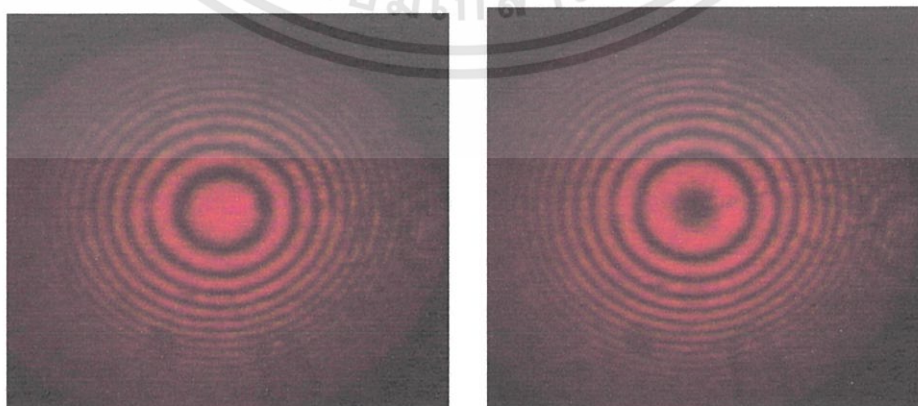
$$I = 2I_0(1 + \cos \delta) \quad (2.12)$$

และ

$$\delta = \frac{2\pi\Delta x}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} 2d \cos \theta \quad (2.13)$$

การแทรกสอดแบบเสริม (แถบสว่าง) จะเกิดเมื่อ $\delta = 2n\pi$ หรือ $2d \cos \theta = n\lambda$ และจะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง (แถบมืด) เมื่อ $\delta = (n + 1/2)\pi$ หรือเกิดแถบมืดเมื่อ $2d \cos \theta = (n + 1/2)\lambda$ เมื่อ n คือ $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

สำหรับริ้วแทรกสอดที่จุดกึ่งกลางคือจุดที่ $\theta = 0$ จะเป็นแถบสว่างเมื่อ $2d = n\lambda$ หรือ $d = n\lambda/2$ และจะเป็นแถบมืดเมื่อ $2d = (n+1/2)\lambda$ หรือ $d = (n+1/2)\lambda/2$ ดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 ริ้วแทรกสอดที่จุดกึ่งกลางแบบเสริม (ซ้าย) และแบบหักล้าง (ขวา) แสงเดินทางถึงฉากด้วยระยะทางต่างกัน $\lambda/2$ (กระจากเลื่อนไปเป็นระยะ $\lambda/4$) [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่กล่าวมาข้างต้น ลำแสงจะถูกทำให้บานออกด้วยเลนส์ ลวดลายรีวการแทรกสอดจึงเป็นภาพที่ 2.19 อย่างไรก็ตามการนำไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์มาประยุกต์ใช้กับการวัดความเรียบของพื้นผิวนั้น ลำแสงจะถูกขยายให้เป็นลำแสงขนาน ผลต่างทางเดินแสงอาจจะถูกทำให้เกิดการเปลี่ยนไปตามเวลาด้วยการเลื่อนแผ่นเรียบเชิงแสงหรือพื้นผิวทดสอบ ซึ่งโดยส่วนมากจะถูกควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยชุดอุปกรณ์ขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric actuator) รีวการแทรกสอดจะถูกบันทึกภาพด้วยกล้องดิจิทัลและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

2.4 แหล่งกำเนิดแสง [37-39]

แหล่งกำเนิดแสงสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสงประเภทไม่โคฮีเรนต์ (Incoherent Light Sources) และแหล่งกำเนิดแสงประเภทโคฮีเรนต์ (Coherent Light Sources)

2.4.1 แหล่งกำเนิดแสงประเภทไม่โคฮีเรนต์

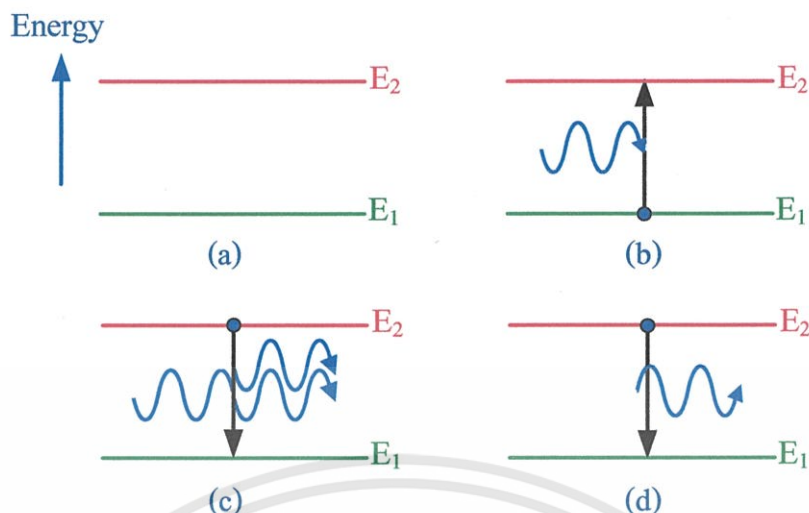
แหล่งกำเนิดแสงในแสงธรรมชาติทั้งหมดเป็นแหล่งกำเนิดแสงประเภทไม่โคฮีเรนต์ ตั้งแต่แสงเทียนจนถึงแสงอาทิตย์ แหล่งกำเนิดแสงเหล่านี้ให้แสงมาจากกระบวนการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (spontaneous emission) แหล่งกำเนิดแสงประเภทนี้ ได้แก่ แสงอาทิตย์ แสงจากท้องฟ้า แหล่งกำเนิดแสงที่เปล่งจากหลอดสุญญากาศ หลอดปล่อยประจุ (discharge lamps) เป็นต้น ซึ่งจะไม่ขอกกล่าวถึงรายละเอียดในที่นี้

2.4.2 แหล่งกำเนิดแสงประเภทโคฮีเรนต์ (Coherent light Sources)

เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงประเภทโคฮีเรนต์ จึงถูกเลือกนำมาใช้กับงานวิจัยนี้ โดย LASER เป็นคำย่อของคำว่า Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation กำเนิดแสงโดยกระบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น (stimulated emission) ซึ่งต่างจากแหล่งกำเนิดแสงประเภทอินโคฮีเรนต์ที่กล่าวข้างต้นซึ่งกำเนิดแสงโดยกระบวนการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (spontaneous emission) เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มนุษย์สร้างขึ้น แสงที่มีสมบัติเช่นเดียวกับแสงเลเซอร์ไม่มีในธรรมชาติ

หลักการพื้นฐานและโครงสร้างของเลเซอร์เป็นสิ่งที่เข้าใจง่ายแต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อวิเคราะห์ถึงหลักการทางฟิสิกส์ของเลเซอร์อย่างลึกซึ้งแล้วพบว่าซับซ้อนมาก การอธิบายถึงหลักการของเลเซอร์ในที่นี้ เป็นเพียงการอธิบายหลักการอย่างง่ายเท่านั้น พิจารณาการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนระหว่างระดับพลังงาน E_1 และ E_2 ในอะตอมดังภาพที่ 2.20 ถ้าอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า E_1 ได้รับพลังงานเท่ากับ $(E_2 - E_1)$ จากโฟตอน อิเล็กตรอนนี้อาจถูกกระตุ้นให้เปลี่ยนระดับพลังงานไปยังระดับที่สูงกว่า E_2 ดังภาพที่ 2.20 (b) เรียกว่าการดูดกลืนแสง (absorption หรือ stimulated absorption) ในทางกลับกันถ้าอิเล็กตรอนอยู่ที่ระดับพลังงาน E_2 กลับสู่ระดับพลังงาน E_1 จะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน เรียกว่าการเปล่งแสง (emission) กระบวนการเปล่งแสงนี้อาจเกิดได้โดย 2 วิธี ที่แตกต่างกันได้แก่ การเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (spontaneous emission) ซึ่งอิเล็กตรอนจะกลับสู่สถานะ E_1 เอง เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง ดังภาพที่ 2.20 (d) แต่ถ้าก่อนที่จะเกิดการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองนี้ อิเล็กตรอนอาจถูกกระตุ้นให้กลับสู่สถานะพื้น E_1 ทันทีด้วยโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับ $(E_2 - E_1)$ และเกิดการเปล่งแสงออกมา ดังภาพที่ 2.20 (c) เรียกกระบวนการเปล่งแสงกรณีนี้ว่าการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น (stimulated emission)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.20 การเปล่งแสงและการดูดกลืนแสงของอะตอม [33]

ภายใต้สภาวะการปกติ จะไม่พบปรากฏการณ์การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นเนื่องจากความน่าจะเป็นในการเกิดการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองจะสูงกว่ามาก ระยะเวลาเฉลี่ยที่อิเล็กตรอนจะอยู่ที่สถานะถูกกระตุ้น E_2 ก่อนที่จะเกิดการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองเรียกว่าช่วงชีวิตของสถานะถูกกระตุ้น (lifetime) τ_{21} เลข 21 หมายถึงอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนสถานะจาก E_2 ไป E_1 ความน่าจะเป็นที่อะตอมจะเกิดการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองในช่วงเวลา dt คือ $A_{21}dt = dt/\tau_{21}$ เมื่อ A_{21} คืออัตราการเปลี่ยนสถานะแบบเกิดขึ้นเอง (spontaneous transition rate) เนื่องจากการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองของอะตอมเป็นแบบสุ่ม กล่าวคืออะตอมแต่ละตัวจะเปล่งแสงไม่พร้อมกันและเกิดในทิศทางที่ต่างกัน ดังนั้นจึงเป็นแสงไม่โคฮีเรนต์ในทางตรงกันข้ามแสงที่เกิดจากกระบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นจะเป็นแสงโคฮีเรนต์ เนื่องจากโฟตอนที่กระตุ้นและโฟตอนที่เกิดจากการถูกกระตุ้นจะมีความถี่เฟส สถานะโพลาไรซ์ และ ทิศทาง เดียวกัน หมายความว่า ด้วยกระบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นจำนวนโฟตอนที่เดินทางผ่านกลุ่มของอะตอมที่อยู่สถานะถูกกระตุ้น (excited atoms) ออกมาจะเพิ่มขึ้นหรือแสงมีความเข้มมากขึ้นนั่นเอง จึงกล่าวว่าเป็นกระบวนการขยายแสง (light amplification) คือทำให้แสงมีความเข้มมากขึ้น กระบวนการนี้เป็นเงื่อนไขสำคัญของการเกิดเลเซอร์ ในทางตรงกันข้ามถ้าโฟตอนเดินทางผ่านกลุ่มของอะตอมที่อยู่สถานะพื้นจะเกิดกระบวนการดูดกลืนแสง แทนที่การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นซึ่งจะทำให้จำนวนโฟตอนที่ผ่านกลุ่มอะตอมนี้ออกมามีจำนวนลดลง ในกระบวนการกำเนิดแสงเลเซอร์จำเป็นต้องลดปรากฏการณ์ดูดกลืนแสงนี้ให้ต่ำลง ซึ่งทำได้โดยทำให้กลุ่มของอะตอมนี้มีจำนวนอะตอมที่สถานะถูกกระตุ้นมากกว่าจำนวนอะตอมที่อยู่สถานะพื้น จึงจะทำให้เกิดกระบวนการขยายแสงได้ (การขยายแสงเกิดจากการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น) การขยายแสงจะเกิดขึ้นได้เมื่อเกิดสภาวะประชากรผกผัน (Population Inversion) ประชากรผกผันเป็นสภาวะที่เกิดความไม่สมดุลในการแจกแจงระดับพลังงานของอะตอมในระบบการสร้างสภาวะประชากรผกผันสามารถทำได้โดยการปั๊ม ซึ่งก็คือ การกระตุ้นให้เกิดการดูดกลืนแสงซึ่งเป็นการปั๊มด้วยแสงความเข้มสูงที่มีพลังงานเหมาะสมกับระดับพลังงานของอะตอม

เลเซอร์เป็นตัวขยายแสงเนื่องจากทำงานโดยหลักการขยายแสง (light amplification) เปรียบได้กับตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่าวงจขยาย (amplifier) แต่ถ้าพิจารณาให้ดีแล้วพบว่าการทำงานของเลเซอร์คล้ายวงจรออสซิลเลเตอร์ (oscillator circuit) มากกว่า ซึ่ง

ออสซิลเลเตอร์ก็คือวงจรขยายที่ถูกปรับให้มีการป้อนกลับแบบบวก (positive feedback) การทำงานเริ่มต้นเมื่ออินพุตมีสัญญาณรบกวน (electrical noise signal) ที่มีความถี่เหมาะสม ถูกขยายโดยวงจร สัญญาณรบกวนที่ถูกขยายจะถูกป้อนกลับจากเอาต์พุตไปที่อินพุตและถูกขยายอีกครั้งเช่นนี้เรื่อยไป สัญญาณที่เอาต์พุตจะมีขนาดใหญ่ขึ้นจนเข้าสู่สภาวะคงตัว เอาต์พุตจะมีขนาดคงที่ค่าหนึ่งขึ้นกับโวลเตจของแหล่งจ่ายไฟของวงจร

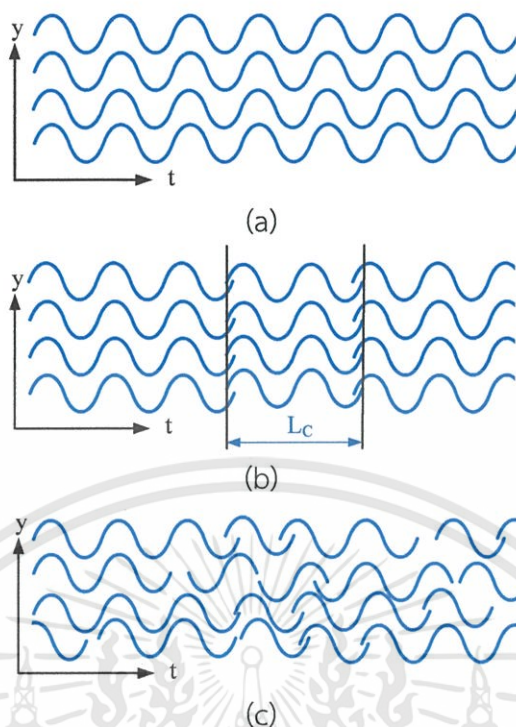
ในเลเซอร์การป้อนกลับแบบบวกเกิดจากการวางตัวกลางเลเซอร์ไว้ระหว่างกระจกคู่หนึ่ง เรียกกระจกคู่นี้ว่า โพรงกำทอนแสง (optical resonant cavity) ทำหน้าที่เป็นตัวกำทอนแบบฟาเบร-เพโร (Fabry-Perot resonator) ดังภาพที่ 2.21 เริ่มต้นที่เมื่อตัวกลางเลเซอร์อยู่ในสภาวะประชากรผกผัน และมีโฟตอนที่เกิดจากการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองระหว่างชั้นพลังงานที่เหมาะสม (เปรียบเทียบกับสัญญาณรบกวนในวงจรออสซิลเลเตอร์) ซึ่งมีบางส่วนเดินทางตามแนวแกนของระบบโพรงกำทอนแสง โฟตอนเหล่านี้เมื่อเดินทางผ่านตัวกลางจะถูกขยายหรือเพิ่มจำนวนขึ้นโดยกระบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น เมื่อเดินทางถึงกระจกด้านหนึ่งจะสะท้อนกลับ (เกิดการป้อนกลับแบบบวก) เข้าสู่ตัวกลางเลเซอร์อีกครั้งหนึ่ง จำนวนโฟตอนจะเพิ่มจำนวนขึ้นอีกเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางจนกระทั่งไปถึงกระจกอีกด้านหนึ่งและสะท้อนกลับ เข้าสู่ตัวกลางเลเซอร์ ถ้าสัมประสิทธิ์การขยาย (gain coefficient) ของตัวกลางมีค่าเหมาะสม จำนวนโฟตอนจะเพิ่มขึ้นจนถึงสภาวะคงตัวเมื่ออัตราการเพิ่มเท่ากับอัตราการสูญเสียโฟตอนจากระบบเมื่อโฟตอนเดินทางผ่านตัวกลางไป-กลับครบหนึ่งรอบ (round trip) โดยส่วนใหญ่ตัวกลางเลเซอร์มีอัตราการขยายแสงต่อหนึ่งหน่วยความยาวของตัวกลาง (gain per unit length) ต่ำมาก เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางหนึ่งรอบจึงมีการเพิ่มของโฟตอนเพียงเล็กน้อยเพื่อให้จำนวนโฟตอนเพิ่มขึ้นจนถึงสภาวะคงตัว แสงจะต้องเดินทางผ่านโพรงกำทอนแสงหลายรอบ โดยทั่วไปโครงสร้างของเลเซอร์ประกอบด้วยองค์ประกอบ 3 ส่วน ได้แก่ตัวกลางเลเซอร์ (laser medium) ระบบการปั๊มพลังงาน (energy pumping) และโพรงกำทอนแสง (optical cavity หรือ optical resonator) ซึ่งไม่ขอกล่าวถึงรายละเอียดในที่นี้



ภาพที่ 2. 21 โพรงกำทอนแสงของเลเซอร์กระจกสองบาน [33]

2.4.3 ความเป็นโคฮีเรนซ์

โคฮีเรนซ์ เป็น คุณสมบัติของคลื่น 2 คลื่นที่มีเฟสต่างกันคงที่ เช่น แสงเลเซอร์ เนื่องจากอะตอมของตัวกลางเลเซอร์ถูกกระตุ้นให้เปล่งแสงออกมาพร้อมกันในทิศทางเดียวกัน ส่วนแสงที่เกิดจากแสงอื่น ๆ เช่น หลอดไฟฟ้า อะตอมจะเปล่งแสงไม่พร้อมกัน และทิศทางที่ต่างกันอย่างสุ่ม (random) จึงไม่มีสมบัติโคฮีเรนซ์เรียกว่า อินโคฮีเรนซ์ (incoherence) ดังภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 ความเป็นโคฮีเรนซ์ของลำแสง [33]

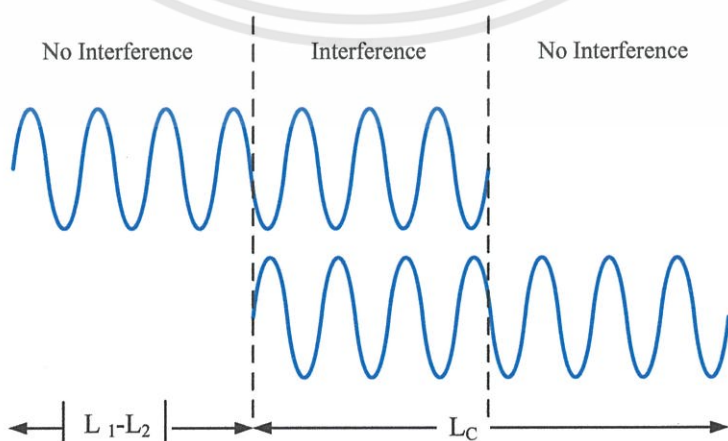
(a) แสงที่มีความเป็นโคฮีเรนซ์อย่างสมบูรณ์

(b) แสงที่มีความเป็นโคฮีเรนซ์บางส่วน (Partial Coherence)

(c) แสงที่ไม่มีความเป็นโคฮีเรนซ์ (Incoherence) และอินโคฮีเรนซ์

ในกรณีที่ $(\phi_1 - \phi_2)$ มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา หมายถึงคลื่นทั้งสองต้องมีความถี่เดียวและเท่ากัน แหล่งกำเนิดแสงความถี่เดียวต้องมีขนาดเป็นอนันต์ นั่นคือแหล่งกำเนิดคลื่นที่มีเฟสต่างกันอย่างที่ตลอดเวลา (complete coherence) ไม่มีจริงในธรรมชาติ มีแต่แหล่งกำเนิดแสงที่มีเฟสต่างกันอย่างที่ในช่วงเวลาหนึ่ง (partial coherence) เรียกว่า coherence time ซึ่งปกติมีค่าประมาณ 10^{-9} - 10^{-10} วินาที และระยะทางที่แสงเดินทางได้ในช่วงเวลานี้ว่า ระยะโคฮีเรนซ์ coherence length (L_c)

ในกรณีของการแทรกสอด ถ้าผลต่างทางเดินแสงมีค่ามากกว่าระยะ L_c ริวแทรกสอดที่จุดสังเกตใด ๆ จะมีการเปลี่ยนจากจุดมืดเป็นจุดสว่างทุก ๆ 10^{-9} วินาที (เนื่องจากการเปลี่ยน เฟสของแสง) นั่นคือไม่สามารถสังเกตริวแทรกสอดได้ (ไม่เกิดการแทรกสอด) ดังภาพที่ 2.23



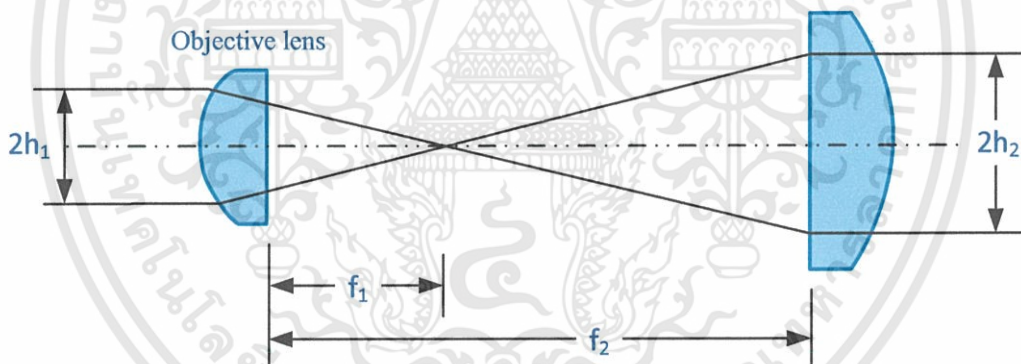
ภาพที่ 2.23 $(L_1 - L_2)$ ต้องน้อยกว่า L_c จึงจะเกิดการแทรกสอด [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

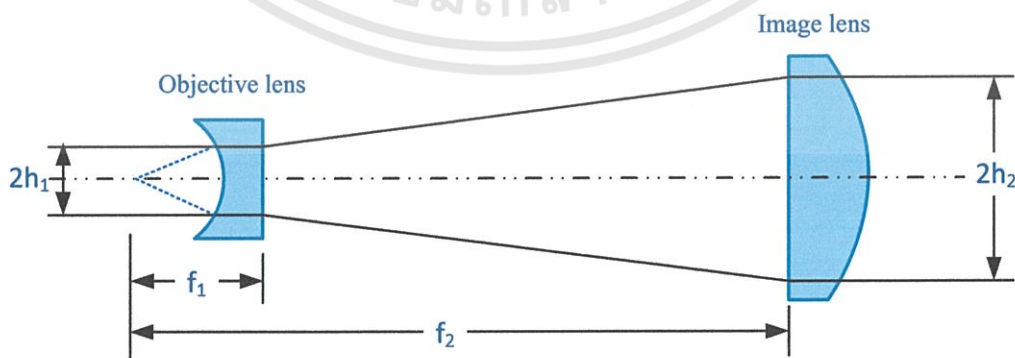
2.5 ตัวขยายลำแสง (Beam Expander) [40, 41]

ตัวขยายลำแสงคืออุปกรณ์ทางแสงที่ทำหน้าที่ขยายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงขนาน และลำแสงที่ออกจากตัวขยายนี้ยังคงเป็นลำแสงขนาน ซึ่งตรงข้ามกับการทำงานของชุดเลนส์ที่อยู่ภายในกล้องส่องทางไกล (Optical Telescope) แต่มีหลักการที่เหมือนกัน โดยทั่วไปตัวขยายลำแสงประกอบด้วย เลนส์ 2 ชิ้นวางเรียงกัน คือ เลนส์วัตถุ (Objective lens) และเลนส์ภาพ (Image lens) โดยเลนส์ตัวแรกต้องมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง (\varnothing) ใหญ่กว่าขนาด \varnothing ของลำแสงจากแหล่งกำเนิด เช่น ถ้าลำแสงมีขนาด \varnothing 10 มิลลิเมตร เลนส์ตัวแรกควรจะมีขนาด \varnothing ไม่น้อยกว่า 12 มิลลิเมตร ในขณะที่ขนาด \varnothing ของเลนส์ภาพ จะต้องมีความใหญ่กว่าขนาด \varnothing ของลำแสงขาออกด้วยเช่นกัน

ตัวขยายลำแสงมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบคือ Keplerian Beam Expander กับ Galilean Beam Expander แสดงดังภาพที่ 2.24 และ ภาพที่ 2.25 โดยระยะห่างระหว่างเลนส์ทั้งสองมีค่าเท่ากับผลรวมของระยะโฟกัสของเลนส์ทั้งสอง ลำแสงขนานขาเข้าของ Keplerian Beam Expander จะถูกโฟกัสให้มีขนาดเล็กเป็นจุดอยู่ระหว่างเลนส์วัตถุกับเลนส์ภาพ ตัวขยายลำแสงแบบนี้ไม่ค่อยนำใช้เป็นตัวขยายลำแสงเลเซอร์ด้วยเหตุที่ว่า เมื่อทำการบีบลำแสงเลเซอร์ให้มีขนาดเล็กลง จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในระบบของตัวขยายลำแสง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้หน้าคลื่นเกิดความผิดเพี้ยนไปจากเดิม ตัวขยายลำแสงที่นิยมใช้กับเลเซอร์จึงเป็นแบบ Galilean Beam Expander ซึ่งเลนส์วัตถุของ Galilean Beam Expander เป็นเลนส์เว้า



ภาพที่ 2. 24 Keplerian Beam Expander (ดัดแปลงมาจาก [42])



ภาพที่ 2. 25 Galilean Beam Expander (ดัดแปลงมาจาก [42])

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการใช้งานตัวขยายลำแสง คือการลู่ออกของลำแสงขาออก (Beam divergence) ที่ออกจากตัวขยายลำแสงจะต้องสามารถทำให้ลำแสงขาออกเป็นลำขนานโดยกำลังขยายตัวขยายลำแสงเท่ากับอัตราส่วนของความยาวโฟกัสของเลนส์ ซึ่งยังเท่ากับอัตราส่วนของรัศมีความโค้งของเลนส์ตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$M = \frac{f_2}{f_1} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{h_2}{h_1} \quad (2.14)$$

เมื่อ

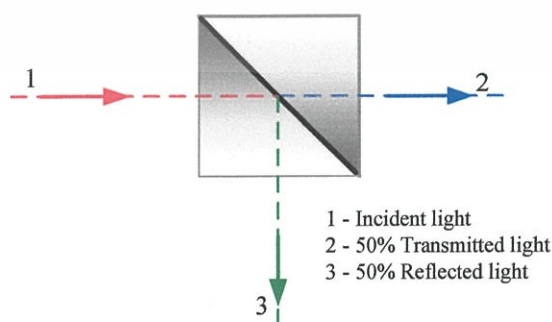
M	คือ	กำลังขยายของตัวขยายลำแสง
f_2	คือ	ความยาวโฟกัสยังผล (effective focal length) ของเลนส์ขาออก
f_1	คือ	ความยาวโฟกัสยังผลของเลนส์ขาเข้า
R_2	คือ	รัศมีความโค้งของเลนส์ภาพ
R_1	คือ	รัศมีความโค้งของเลนส์วัตถุ
h_2	คือ	รัศมีของลำแสงขาออก (ความสูงของภาพ)
h_1	คือ	รัศมีของลำแสงขาเข้า (ความสูงของวัตถุ)

2.6 ตัวแยกลำแสง (Beam Splitter) [43]

ตัวแยกลำแสงเป็นอุปกรณ์ทางแสงที่ทำหน้าที่ในการแยกลำแสงที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงหนึ่งให้ ออกเป็นลำแสงสองลำหรือมากกว่า สำหรับตัวแยกลำแสงแบบ 2 ลำนั้น แสงทั้งสองลำ ที่ถูกแยกออก จะมีความเข้มเท่ากัน (50:50) เป็นอุปกรณ์ชิ้นสำคัญสำหรับระบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์โดยทั่วไป อุปกรณ์แยกลำแสงทำมาจากปริซึมทรงสามเหลี่ยม 2 ชั้นประกบติดกันด้วยกาว หรือตัวประสาน จำพวกสารโพลีเอสเตอร์ (Polyester) หรือเรซิน (Resin) จึงนิยมเรียกว่า Beam Splitter Cube แสดงดัง ภาพที่ 2.26 (a) ชั้นความหนาของกาวจะมีค่าเหมาะสมกับความยาวคลื่นค่าหนึ่งที่ทำให้แสงตก กระบะครึ่งหนึ่งเกิดการสะท้อนที่ผิวหน้าระหว่างรอยต่อ และแสงอีกครึ่งหนึ่ง เกิดการทะลุผ่านออกไป ดังไดอะแกรมแสดงการทำงานดังภาพที่ 2.26 (b) หลักการทำงานของตัวแยกลำแสงดังกล่าว เกิด เนื่องจากกระบวนการที่เรียกว่า Frustrated Total Internal Reflection กระบวนการนี้จะเกิดขึ้น เมื่อตัวกลางที่สามมีค่าดัชนีหักเหเชิงแสงมากกว่าตัวกลางที่สอง และตัวกลางที่สองที่อยู่ระหว่าง ตัวกลางที่แรกและตัวกลางที่สาม มีความหนาหรือมีระยะทางน้อยกว่าความยาวคลื่นมาก ปรากฏการณ์นี้เหมือนกับปรากฏการณ์การทะลุผ่านกำแพงศักย์ของอนุภาคทางควอนตัม (Quantum Tunneling)



(a)



(b)

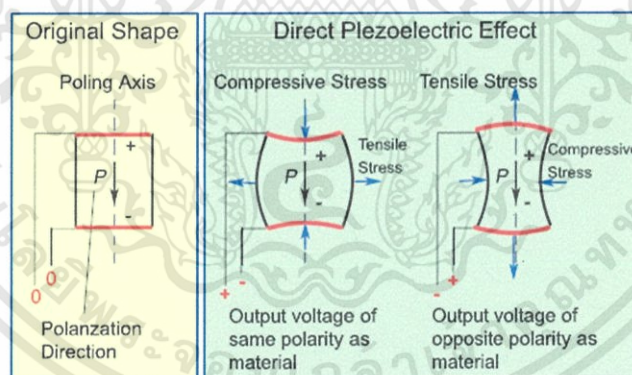
ภาพที่ 2.26 (a) ตัวแยกลำแสง [43] และ (b) การแยกลำแสงของตัวแยกลำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัจจุบันได้มีการใช้ฟิล์มบางอลูมิเนียมแทนตัวประสานที่ทำมาจากสารจำพวกโพลีเมอร์หรือเรซิน เพื่อลดอัตราการดูดกลืนคลื่นแสงภายในตัวประสานดังกล่าว นอกจากนี้ยังมีตัวแยกลำแสงในลักษณะอื่น ๆ ที่ทำหน้าที่ต่างกันออกไป เช่น ทำการแยกแสงที่มีความยาวคลื่นเฉพาะค่า เลื่อนเฟสของลำแสง หรือแยกแนวโพลาไรซ์ของลำแสง เป็นต้น ตัวแยกลำแสงที่มีหน้าที่แยกลำแสงให้มีแนวโพลาไรซ์ที่ต่างกัน เรียกว่า ตัวแยกลำแสงแบบโพลาไรซ์ (Polarizing Beam Splitter) ตัวแยกลำแสงชนิดนี้ทำจากปริซึมวอลลาสตัน (Wollaston) เป็นวัสดุที่มีสมบัติ Birefringence ซึ่งเป็นวัสดุ ที่มีค่าดัชนีหักเหสองค่าโดยค่าดัชนีหักเหแต่ละค่าจะตอบสนองต่อทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน

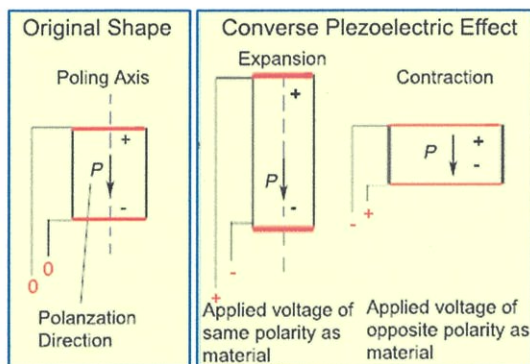
2.7 เพียโซอิเล็กทริกซิตี (Piezoelectricity) [44-46]

ในปีคริสต์ศักราช 1880 Jacques and Pierre Curie นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส [47] ได้ค้นพบปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกในผลึกบางจำพวกเช่นโทมาลีน (tourmaline) ควอตซ์ (quartz) ผลึกน้ำตาลทราย (cane sugar) และเกลือโรเชลล์ (rochelle salts) โดยเมื่อออกแรงทางกลกระทำต่อผลึกดังกล่าวจะผลส่งให้ไดโพลในผลึกเกิดการเรียงไปในทิศเดียวกันเป็นบริเวณกว้าง เกิดโพลาไรเซชันสุทธิ ทำให้เกิดแรงดันทางไฟฟ้าขึ้นภายในตัวผลึกซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่าแปรผันตรงกับขนาดของแรงกระทำ การออกแรงกระทำในรูปแบบของแรงดึงยืดออก และ แรงกดจะส่งผลให้เกิดแนวของการโพลาไรซ์ตรงข้ามกัน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric effect) แสดงดังภาพที่ 2.27 ส่วนกลไกที่เกิดในโครงผลึกแสดงดังภาพที่ 2.28 ซึ่งเป็นตัวอย่างกลไกการเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกในผลึกควอตซ์ในทางกลับกัน



ภาพที่ 2.27 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก [48]

ภาพที่ 2.28 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นในผลึกควอตซ์เมื่อมีแรงภายนอกกระทำ [49]
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.29 ปฏิกิริยาการแปลงเพียโซอิเล็กทริกแบบย้อนกลับ [48]

ถ้าทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับผลึก ผลึกจะยืดหรือหดตัวขึ้นอยู่กับทิศทางของแรงดันไฟฟ้า เรียกกันว่าปรากฏการณ์ย้อนของเพียโซอิเล็กทริก (converse piezoelectric effect) ดังภาพที่ 2.29 Piezoelectricity จึงเป็นประจุไฟฟ้าที่ถูกสะสมหรือเก็บประจุไว้ภายในเมื่อถูกแรงทางกลกระทำ หรืออีกความหมายหนึ่งคือไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากความดัน

ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดทางไฟฟ้ากับแรงทางกล เป็นไปตามสมการที่ (2.15)

$$D = dT \quad (2.15)$$

เมื่อ d คือ สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Coefficient)
 D คือ การกระจัดเชิงไฟฟ้า (Electric displacement)
 T คือ แรงเชิงกล

จากหลักของเทอร์โมไดนามิกส์ค่าสัมประสิทธิ์ของปรากฏการณ์แบบย้อนกลับ (converse effect) จะมีค่าเท่ากับสัมประสิทธิ์ของปรากฏการณ์แบบตรง (direct effect) ดังนั้นในกรณีของความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับสนามไฟฟ้า E สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.16)

$$S = dE \quad (2.16)$$

ค่าของเพียโซอิเล็กทริกจะเกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงเค้น อาจเขียนในรูปของแรงดันหรือค่า g มีหน่วยเป็นโวลต์ต่อนิวตันต่อตารางเมตร ดังสมการ

$$g = \frac{\text{Open Circuit Electric Field}}{\text{Applied Mechanical Stress}} \quad (2.17)$$

ซึ่งค่า g เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับ d ดังนี้

$$g = \frac{d}{\epsilon} = \frac{d}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (2.18)$$

เมื่อ ϵ คือ ค่าความซึมซับทางไฟฟ้า (Permittivity)
 ϵ_r คือ ค่าความซึมซับทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative Permittivity)
 ϵ_0 คือ ค่าความซึมซับทางไฟฟ้าของสุญญากาศ ($\approx 8.854 \times 10^{-12}$ F/m)

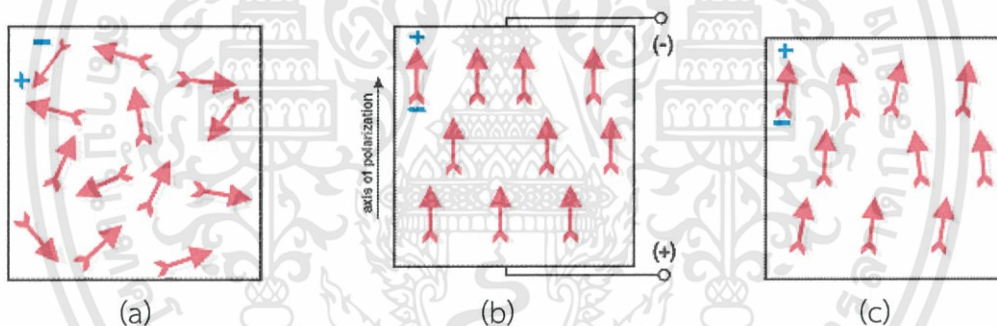
ส่วนค่าความสามารถในการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล หรือในทางกลับกัน ของเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Coupling Factor) สามารถหาได้จาก

$$K = \sqrt{\frac{\text{Energy Output}}{\text{Total Mechanical Energy Input}}} \quad (2.19)$$

ค่า k นั้นจะเป็นผลปรากฏการณ์ของเพียโซอิเล็กทริกทั้งผลทางตรง (Direct Effect) และผลทางย้อนกลับ (Converse Effect) ทั้งสองกรณี ค่าของ k นั้นจะต้องมีค่าน้อยกว่าหนึ่งเสมอ

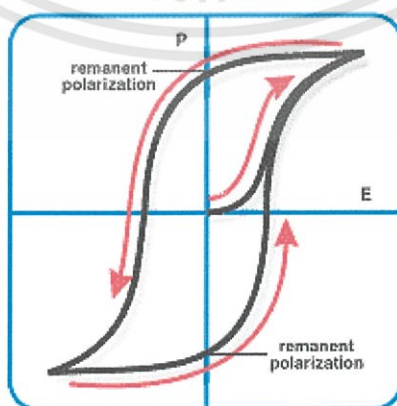
2.7.1 โดเมนและฮิสเทอรีซิสลูป (Domain and hysteresis loop)

วัสดุเพียโซอิเล็กทริก มีพฤติกรรมเหมือนกับวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic materials) คือจะเกิดปรากฏการณ์ฮิสเทอรีซิสลูป โดยก่อนที่จะได้รับแรงดันไฟฟ้าไดโพลโมเมนต์ของอะตอมของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะจัดเรียงตัวด้วยทิศทางไม่เหมือนกัน แต่เมื่อป้อนแรงดันหรือแรงกระทำโดเมนของไดโพลโมเมนต์ที่จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันจะมีขนาดขยายใหญ่ขึ้นจนเกิดโพลาริเซชัน (Polarization) คงที่ จากนั้นเมื่อลดค่าแรงดันไฟฟ้าลงโพลาริเซชันค่อย ๆ ลดลง แต่เมื่อลดค่าแรงดันไฟฟ้าจนเป็นศูนย์ก็ยังคงมีค่าโพลาริเซชันหลงเหลืออยู่ดังภาพที่ 2.30 ผลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อโพลาริเซชันของวัสดุเพียโซแสดงดังภาพที่ 2.31



ภาพที่ 2.30 การจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์ [49]

- เมื่อไม่ได้ทำการป้อนสนามไฟฟ้า
- เมื่อป้อนสนามไฟฟ้า
- หลังจากป้อนสนามไฟฟ้าแล้วลดค่าสนามไฟฟ้าจนเป็นศูนย์



ภาพที่ 2.31 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวัสดุเพียโซกับโพลาริเซชันหลังจากเพิ่มและลดสนามไฟฟ้า (hysteresis) [49]

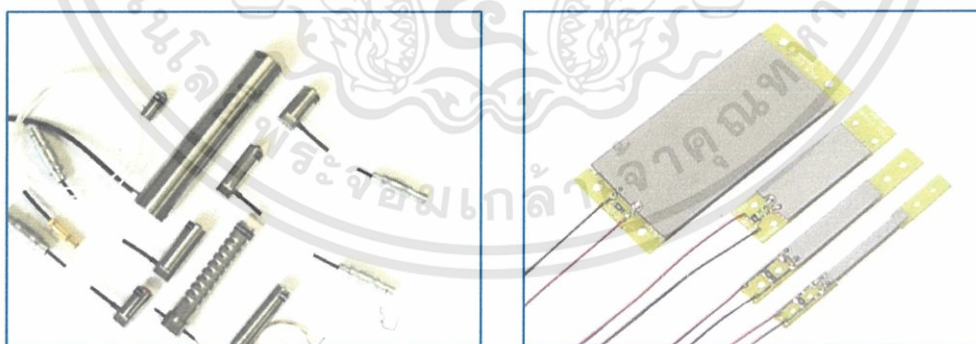
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ประโยชน์จากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีหลายอย่างด้วยกัน ขึ้นกับปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลง ในกรณีที่มีการบ่อนแรงดันให้วัสดุทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเกิดแรงกล สามารถนำมาใช้เป็นทรานสดิวเซอร์ในอุปกรณ์อัลตราโซนิก (Ultrasonic) ทางกายภาพ ลำโพง และนำมาใช้เป็นชุดอุปกรณ์ขับเคลื่อน (Actuator) ในเครื่องพิมพ์ ชัตเตอร์ ในกล้องถ่ายรูป วาล์วไฮดรอลิก (hydraulic valve) เป็นต้น และในกรณีให้แรงแกว่งตัวทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า สามารถใช้เป็นอุปกรณ์จุดแก๊ส (gas ignitor) ในเตาเครื่องทำความร้อน ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ใช้เป็นตัวตรวจจับความดัน เป็นต้น

2.7.2 ชุดอุปกรณ์ขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Actuator)

ชุดอุปกรณ์ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริก มีหน้าที่ในการเปลี่ยนสัญญาณทางไฟฟ้าที่บ่อนให้กับผลึกเพียโซเป็นระยะกระจัดที่ตัวผลึกยืดหรือหด ส่วนมากจะนำไปใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุในกรณีที่ต้องการความละเอียดและแม่นยำของระยะทาง เช่น การขับเคลื่อนกระจกในระบบการวัดทางแสง ชุดอุปกรณ์ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริกมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด Stack Actuator กับ Stripe Actuator รูปร่างลักษณะของชุดอุปกรณ์ที่มีขายกันตามท้องตลาดทั่วไปเป็นดังภาพที่ 2.32

Stack Actuator เป็นชุดขับเคลื่อนที่สร้างจากการนำเอาแผ่นของวัสดุเซรามิกเพียโซมาเรียงต่อกันเป็นชั้นและยึดติดกันไว้ด้วยแผ่นอลูมิเนียมฟอยด์ เรียกอีกอย่างว่า Discrete Stack Actuator การใช้งานทำได้โดยการบ่อนแรงดันไฟฟ้าโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 500 – 1000 V แต่ถ้าเป็น Co-Fired Multilayer Stack Actuator ซึ่งชั้นแต่ละชั้นของวัสดุไม่ได้ถูกยึดติดกันไว้ด้วยแผ่นอลูมิเนียมฟอยด์ ระดับแรงดันที่บ่อนให้จะมีค่าไม่เกิน 200 V ชุดขับเคลื่อนแบบ Stack Actuator มีระยะทางการเคลื่อนเพียงช่วงสั้นๆ ในระดับไมครอนเท่านั้น สำหรับ Stripe Actuator เป็นชุดขับเคลื่อนที่สร้างจากการนำเอาแผ่นของวัสดุเซรามิกเพียโซ 2 แผ่นมาประกบเข้าด้วยกัน และออกแบบให้เกิดการโค้งงอมากเมื่อบ่อนแรงดันไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย จึงเรียกอีกชื่อว่า Bending Actuator และมีช่วงระยะกระจัดมากกว่า Stack Actuator



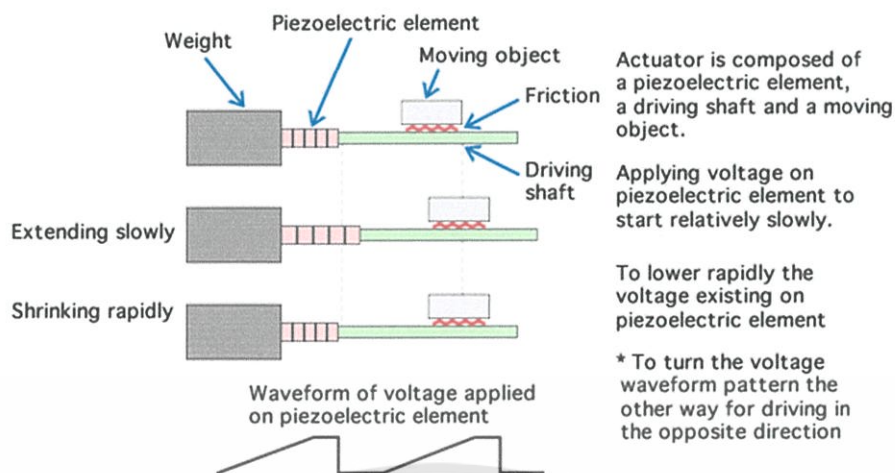
(a)

(b)

ภาพที่ 2.32 ชุดอุปกรณ์ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริก

(a) Stack actuator [50]

(b) Stripe Actuator [51]



ภาพที่ 2.33 องค์ประกอบของชุดอุปกรณ์ขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกและลักษณะการยืดและหดตัวในขณะที่เพิ่มแรงดันไฟฟ้าและหลังจากลดแรงดันไฟฟ้า [52]

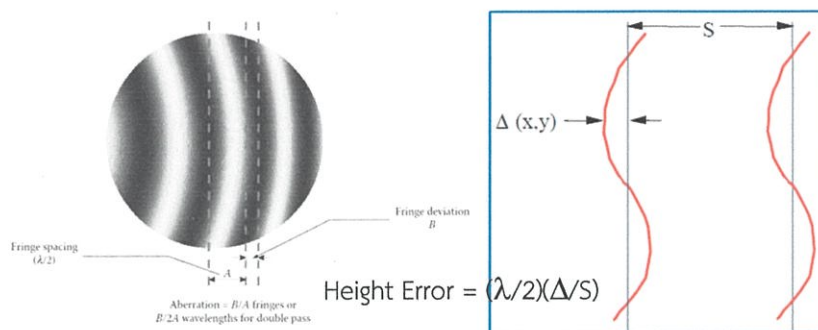
ชุดขับเคลื่อนเพียโซประกอบด้วย ชิ้นส่วนผลึกเพียโซ เฟลาขับ (driving shaft) และ ตัวขับเคลื่อน ดังภาพที่ 2.33 แต่เนื่องจากวัสดุเพียโซเป็นวัสดุจำพวกเฟอร์โรอิเล็กทริกจึงเกิดลูปฮิสเทอรีซิสการลดค่าแรงดันไฟฟ้าอย่างรวดเร็วทำให้เกิดผลึกเพียโซไม่หดกลับมาตามค่าแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงในการใช้งานจึงจำเป็นต้องมีระบบคุม หรือการป้อนแบบย้อนกลับเพื่อทำให้เกิดความเป็นเชิงเส้นระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้ากับระยะกระจัดของเพียโซ

2.8 การวิเคราะห์ลวดลายริ้วการแทรกสอด (Fringe Analysis)

การวิเคราะห์ลวดลายริ้วการแทรกสอดถือได้ว่าเป็นหัวใจสำคัญในการวัดสภาพโครงสร้างของพื้นผิวด้วยการตรวจสอบทางแสง ซึ่งการวัดหรือบันทึกลวดลายริ้วการแทรกสอดสามารถทำได้หลายวิธี เช่น วัดและบันทึกริ้วการแทรกสอดจากโฮโลแกรม (Holographic Interferometry) [53] จากเทคนิคการแทรกสอดแบบ ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) [54] และ การวิเคราะห์จากภาพถ่ายของลวดลายริ้วการแทรกสอด (Fringe Projection) [55] การวิเคราะห์ริ้วการแทรกสอดทำให้สามารถประเมินค่าสมบัติทางกายภาพของวัสดุได้ เช่น สภาพโครงสร้างของพื้นผิว ระยะกระจัด ความเครียด (strain) ดัชนีหักเหเชิงแสง เป็นต้น ข้อมูลของสมบัติทางกายภาพเหล่านี้จะถูกเก็บไว้ในรูปของเฟส สมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันจะส่งผลทำให้ลวดลายริ้วการแทรกสอดเกิดความแตกต่างกันไป การวิเคราะห์ลวดลายริ้วการแทรกสอดจึงเป็นการดึงข้อมูลเฟสออกมาจากริ้วการแทรกสอดเพื่อทำการประเมินค่าของเฟสที่สัมพันธ์กับสมบัติทางกายภาพ

จุดประสงค์สำคัญในการวิเคราะห์ลวดลายริ้วการแทรกสอด คือ การเปลี่ยนความแตกต่างของระดับสีบนลวดลายริ้วการแทรกสอดให้กลายเป็นพื้นที่ของเฟส (Phase Map) เฟสนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพารามิเตอร์ทางกายภาพของพื้นผิว การวิเคราะห์ดังกล่าวนี้เรียกว่า การวิเคราะห์เฟส (Phase analysis) ของริ้วการแทรกสอด เทคนิคการประเมินค่าเฟสจากริ้วการแทรกสอดแบ่งออกได้เป็น 2 เทคนิค ด้วยกัน คือ

- เทคนิคการวิเคราะห์ริ้วเชิงตำแหน่ง (Spatial Fringe Analysis technique)
- เทคนิคการวิเคราะห์ริ้วเชิงเวลา (Temporal Fringe Analysis technique)

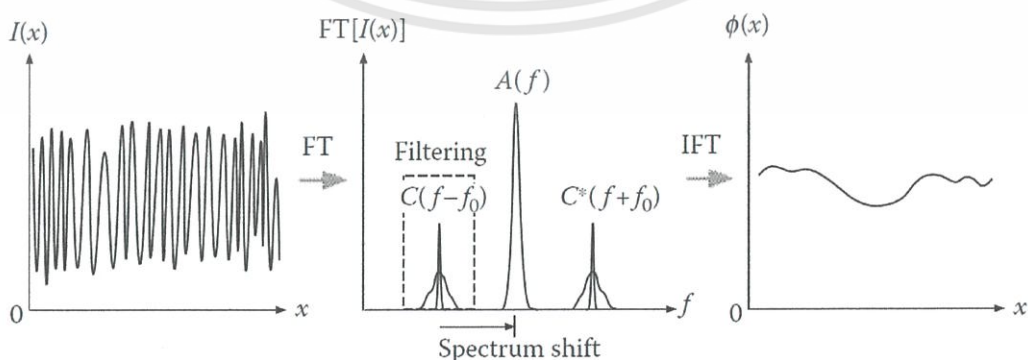


ภาพที่ 2.34 วิธีการประเมินภาพอินเทอร์เฟอแกรมด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบดั้งเดิม [8]

การวิเคราะห์เชิงเฟสเชิงตำแหน่ง เป็นวิธีการที่ใช้ภาพอินเทอร์เฟอแกรมเพียงภาพเดียวในการดึงเฟสออกมาจากภาพ เช่น เช่น การวิเคราะห์เฟสด้วยวิธีดั้งเดิม การแปลงฟูเรียร์ เป็นต้น การวิเคราะห์เฟสด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ซึ่งจะใช้อินเทอร์เฟอแกรมเพียงภาพเดียว ทำโดยการหาค่าความผิดพลาดของหน้าคลื่น (wavefront error) ดังภาพที่ 2.34 ก็คือ ระยะที่หน้าคลื่นมีความผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งหน้าคลื่นปกติ การวิเคราะห์นี้เป็นวิธีแบบดั้งเดิม ค่าที่ได้ออกมาจะอยู่ในรูปของ Peak-to-Valley (PV) วิธีการนี้ให้ความสะดวกและรวดเร็ว แต่เนื่องจากค่า PV ไม่สามารถบ่งบอกลักษณะที่แท้จริงของพื้นผิวได้เนื่องจากไม่สามารถระบุได้ว่าทิศทางการเคลื่อนที่ของหน้าคลื่นได้ ในขณะที่ระบบถูกรบกวนจึงเป็นข้อด้อยของการประเมินภาพด้วยวิธีการนี้ ค่าที่บ่งบอกลักษณะของพื้นผิวที่มีความสำคัญมากกว่า PV คือค่า Root Mean Squares (RMS) ไม่ได้ถูกนำมาใช้ประกอบกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้

สำหรับการวิเคราะห์เฟสด้วยการแปลงฟูเรียร์ เป็นวิธีการหนึ่งที่ยิมนำมาใช้กับเทคนิคการวิเคราะห์เฟสเชิงตำแหน่ง วิธีการนี้จะทำการแปลงความเข้มแสงของริ้วให้กลายเป็นเฟสด้วย Fourier Fringe Analysis (FFA) ทำให้เกิดการกรองหรือกำจัดความถี่ที่เป็นของสัญญาณรบกวนดังตัวอย่างภาพที่ 2.34 ข้อมูลที่ได้จะถูกแปลงโดยใช้การย้อนกลับของ FFTs (Inverse FFTs) เพื่อหาค่าเฟสต่อไป ตัวอย่างผลจากการประมาณค่าเฟสจากรี้วการแทรกสอดด้วยวิธีฟูเรียร์ แสดงดังภาพที่ 2.35

วิธีการวิเคราะห์เชิงเวลา (Temporal Phase Measurement) หรือ วิธีการวิเคราะห์เฟสด้วยการเลื่อนเฟส (Phase Shifting Method) ไปพร้อมกับการบันทึกอินเทอร์เฟอแกรม ซึ่งจะต้องใช้ภาพอินเทอร์เฟอแกรมหลายเฟรมในการดึงข้อมูลของเฟสออกมาจากภาพ ซึ่งวิธีการนี้ได้ถูกนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ จึงขอกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

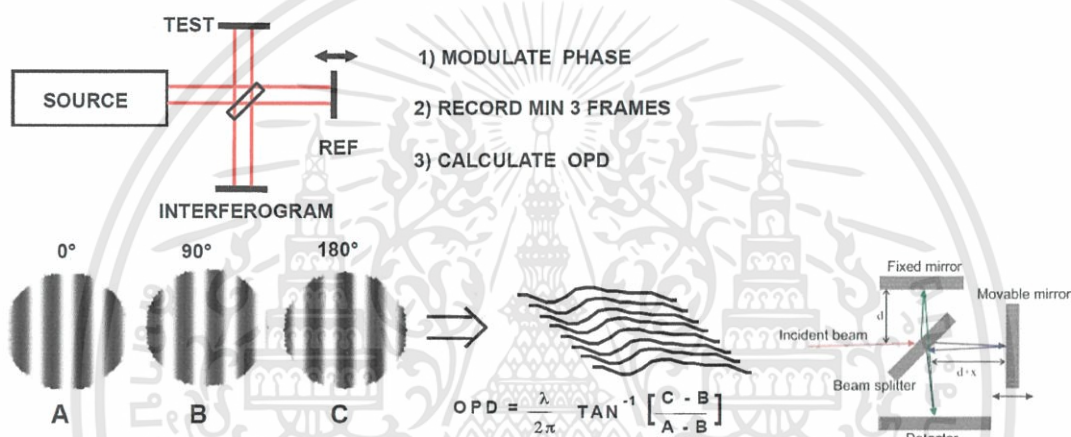


ภาพที่ 2.35 การวิเคราะห์ด้วยฟูเรียร์ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 การวิเคราะห์เฟสด้วยเทคนิคการเลื่อนเฟส [32, 56, 57]

ในการประเมินหรือวัดความต่างเฟสของลำแสง การเลื่อนเฟส (Phase-shifting) เป็นเทคนิคหนึ่ง ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เมื่อนำเทคนิคนี้เข้ามาใช้ร่วมกับอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ ส่งผลให้ระบบมีความเที่ยงตรงในการวัดสูงมากกว่า $1/1000$ fringe ความคมชัดของรีจการแทรกสอดและความเข้มแสงไม่มีผลต่อความถูกต้องในการประเมินค่าเฟส โดยเฟสจะถูกประเมินจากพิกเซลเดียวกันของทุก ๆ เฟรมของอินเตอร์เฟอโรแกรม หลักการเบื้องต้นของวิธีการวิเคราะห์นี้ คือ เฟสจะเลื่อนไปตามการเปลี่ยนแปลงของหน้าคลื่นอ้างอิงหรือหน้าคลื่นทดสอบที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาดังภาพที่ 2.36 สัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะถูกสร้างที่แต่ละจุดวัดในอินเตอร์เฟอโรแกรมและความสัมพันธ์ของเฟสระหว่างหน้าคลื่นสองคลื่นที่ตำแหน่งนั้นจะอยู่ในสัญญาณเหล่านี้ อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้เทคนิคนี้ ในการวิเคราะห์ภาพอินเตอร์เฟอโรแกรมเรียกว่า อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบเลื่อนเฟส



ภาพที่ 2. 36 อินเตอร์เฟอโรมิทรี่แบบเลื่อนเฟส (Phase Shifting Interferometry) [34]

2.9.1 แนวความคิดพื้นฐาน [6, 9, 57]

อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบเลื่อนเฟสเป็นเทคนิคการวัดโครงสร้างพื้นผิว โดยการวัดความต่างเฟสระหว่างเฟสหน้าคลื่นอ้างอิงกับหน้าคลื่นทดสอบที่เปลี่ยนไปตามเวลา เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา สมมุติว่า เฟสของหน้าคลื่นที่เปลี่ยนไปไม่ได้เกิดจากชุดอุปกรณ์ทางแสงหรือการจัดแนวลำแสงในระบบการวัด ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างเฟสกับความสูงต่ำของพื้นผิวทดสอบเทียบจากพื้นผิวอ้างอิง (high error) เขียนได้ว่า

$$\phi(x, y) = 4\pi h(x, y) / \lambda \quad (2.20)$$

เมื่อ	$\phi(x, y)$	คือ	ความต่างเฟสของหน้าคลื่นทดสอบกับเฟสของหน้าคลื่นอ้างอิง
	$h(x, y)$	คือ	ความสูงต่ำของพื้นผิวทดสอบเทียบจากพื้นผิวอ้างอิง
	(x, y)	คือ	ตำแหน่งพิกัด

ความสัมพันธ์นี้ใช้กับแสงที่ตกกระทบบตั้งฉากกับพื้นผิวเท่านั้น ส่วนกรณีอื่นๆจำเป็นต้องเพิ่ม obliquity factor (ฟังก์ชันที่แปรผันตรงกับแอมพลิจูดของหน้าคลื่นที่เคลื่อนที่มีทิศทางเคลื่อนที่ ในทิศต่างๆ) เข้าไปในสมการนี้ด้วย สมการความสัมพันธ์ของหน้าคลื่นและหน้าคลื่นทดสอบที่อยู่ในรูปของเฟเซอร์ เขียนได้ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$w_r(x, y, t) = a_r(x, y) e^{i[\phi_r(x, y) - \delta(t)]} \quad (2.21)$$

$$w_t(x, y) = a_t(x, y) e^{i\phi_t(x, y)} \quad (2.22)$$

เมื่อ	$a_r(x, y)$	คือ	แอมพลิจูดของหน้าคลื่นจากผิวหน้าอ้างอิง
	$a_t(x, y)$	คือ	แอมพลิจูดของหน้าคลื่นจากผิวหน้าทดสอบ
	$\phi_r(x, y)$	คือ	เฟสของหน้าคลื่นจากผิวหน้าอ้างอิง
	$\phi_t(x, y)$	คือ	เฟสของหน้าคลื่นจากผิวหน้าทดสอบ
	$\delta(t)$	คือ	เฟสของลำแสงอ้างอิงที่ถูกเลื่อนไปที่เวลาใด ๆ

ในความเป็นจริงแล้ว $\delta(t)$ คือ ค่าเฟสสัมพัทธ์ระหว่างลำแสงอ้างอิงกับลำแสงทดสอบ หรือค่าความต่างเฟสระหว่างหน้าคลื่นของลำแสงทั้งสองซึ่งอาจเกิดเนื่องจากเฟสของลำแสงอ้างอิง หรือเฟสของลำแสงทดสอบที่เปลี่ยนไปได้โดยในขณะที่เลื่อนเฟสของลำแสงที่เวลาใดๆ เมื่อลำแสงทั้งสองเกิดการซ้อนทับจนเกิดลวดลายริ้วการแทรกสอด ความเข้มแสงที่แต่ละพิกเซล ที่เวลาใด ๆ ของริ้วการแทรกสอดเป็นไปตามสมการดังนี้

$$I(x, y, t) = |w_r(x, y, t) + w_t(x, y)|^2 \quad (2.23)$$

หรือ

$$I(x, y, t) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi_t(x, y) - \phi_r(x, y) + \delta(t)] \quad (2.24)$$

เมื่อ

$$I'(x, y) = a_r^2(x, y) + a_t^2(x, y) \quad \text{คือ ความเข้มแสงเฉลี่ย}$$

และ

$$I''(x, y) = 2a_r(x, y)a_t(x, y) \quad \text{คือ ความเข้มแสงที่ถูกมอดดูเลต}$$

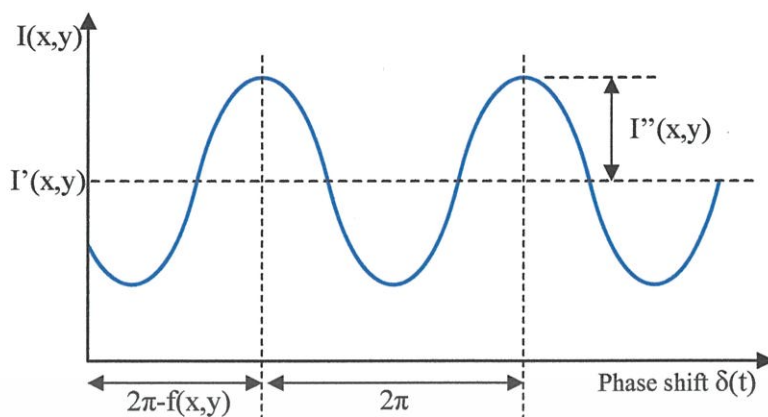
กำหนดให้ $\phi(x, y) = \phi_t(x, y) - \phi_r(x, y)$ สมการที่ (2.24) ใหม่เขียนได้ว่า

$$I(x, y, t) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + \delta(t)] \quad (2.25)$$

สมการนี้เป็นสมการพื้นฐานของอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์แบบเลื่อนเฟส ความเข้มแสงที่แต่ละพิกเซลเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเลื่อนเฟส $\delta(t)$ ผลของการเลื่อนเฟสของเฟสอย่างเป็นเชิงเส้นกับเวลาที่มีต่อความเข้มของริ้วการแทรกสอดที่แต่ละพิกเซลเปลี่ยนแปลงไปอย่างเป็นฟังก์ชันรูปไซน์กับเวลาดังภาพที่ 2.29

ถึงแม้การเลื่อนเฟสของเฟสอย่างเป็นเชิงเส้นกับเวลามีผลทำให้ความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงไปอย่างเป็นรูปไซน์กับเวลา แต่อย่างไรก็ตาม เทอมที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ได้แก่ ค่าความเข้มแสงไบอัส $I'(x, y)$ ความเข้มแสงที่ถูกมอดดูเลต $I''(x, y)$ ซึ่งมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุดกับต่ำสุด และ ความต่างเฟสที่ไม่ทราบ $\phi(x, y)$ ซึ่งค่าทั้ง 3 นี้มีความสัมพันธ์กับการเลื่อนเฟสที่เป็นเชิงเส้นกับเวลา (temporal phase shift) อย่างเป็นทางการรูปไซน์ดังภาพที่ 2.37 สุดท้ายแล้วเฟสของหน้าคลื่นบนทุก ๆ พิกเซลของภาพอินเตอร์ฟีรแกรมจึงสามารถถูกวัดได้ด้วยการตรวจจับและเปรียบเทียบค่าที่เปลี่ยนไปตามเวลา โดยที่เทอมของ $I'(x, y)$ และ $I''(x, y)$ จะถูกจำกัดออกไปจากขั้นตอนการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

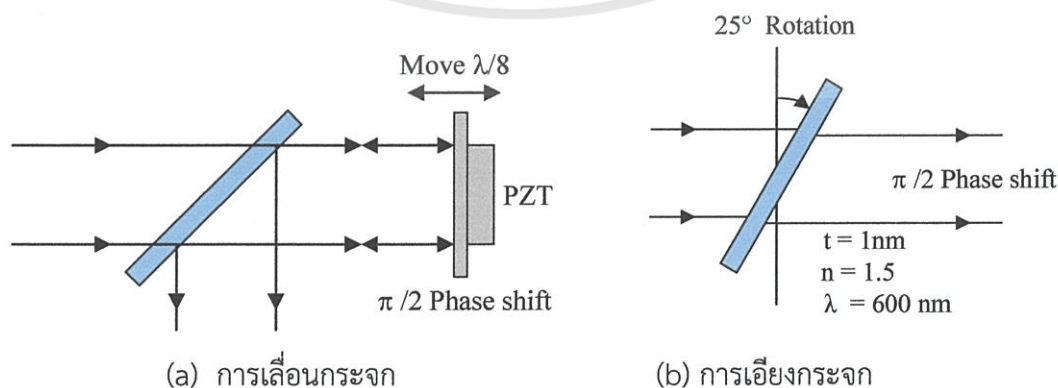


ภาพที่ 2.37 การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงของฟลักเซลหนึ่งบนอินเตอร์เฟอโรแกรมด้วยการเลื่อนเฟสอ้างอิง [57]

ถ้าสังเกตอินเตอร์เฟอโรแกรมในระหว่างที่เลื่อนเฟส จะพบว่า ริ้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้นจะค่อยๆ เคลื่อนผ่านเฟรมหรือขอบเขตของภาพไป ซึ่งการเคลื่อนที่ไปของริ้วการแทรกสอดนี้เกิดขึ้นคล้ายกับการเคลื่อนที่ไปของริ้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้นเมื่อมีการขยับตำแหน่งของแผ่นทดสอบในปรากฏการณ์วงแหวนของนิวตัน (Newton's rings) การเคลื่อนที่ของริ้วการแทรกสอดนี้เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่เป็นฟังก์ชันรูปร่างกับเวลาโดยที่แต่ละฟลักเซลของอินเตอร์เฟอโรแกรมนั้นมีความต่างเฟสที่แตกต่างกัน PSI ไม่ได้ทำการวิเคราะห์หน้าคลื่นจากการตรวจจับการเลื่อนไปของริ้วการแทรกสอดและเป็นวิธีการที่ไม่จำเป็นต้องหาและระบุจุดศูนย์กลางของริ้วการแทรกสอด แต่ PSI เป็นวิธีการคำนวณหาค่าเฟสที่แต่ละฟลักเซลด้วยการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่แต่ละจุด

2.9.2 วิธีการปรับเลื่อนเฟส (Phase Shifting Methods)

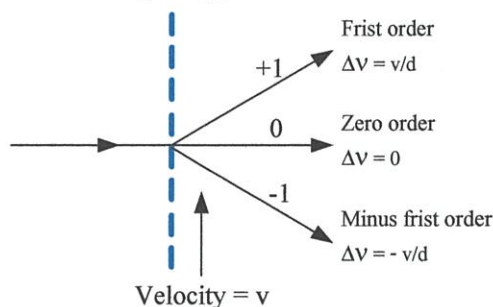
ในระบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์การเลื่อนเฟสหรือการมอดดูเลตเฟส (Phase Modulation) สามารถทำได้โดยการปรับเลื่อนกระจก การเอียงแผ่นแก้ว การปรับเลื่อนเกรตติง การหมุน half wave plate หรือแม้กระทั่งการใช้มอดดูเลตเตอร์ประเภทอะคูสโตออปติก หรือ อิเล็กโทรออปติก (acousto-optic or electro-optic modulators) การปรับเลื่อนเฟสระหว่างลำแสงอ้างอิงกับลำแสงวัตถุอย่างต่อเนืองหรือเป็นค่า ๆ ด้วยการเลื่อนกระจกหรือเกรตติง การเอียงแผ่นแก้ว หรือ การบิดแนวโพลาริซ นั้น ถือได้ว่าเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีการอื่น ๆ โดย phase-shifter หรือ ชิ้นงานที่ทำให้เกิดการเลื่อนไปของเฟสจะถูกวางไว้ที่แขนใดแขนหนึ่งของอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ ดังภาพที่ 2.38



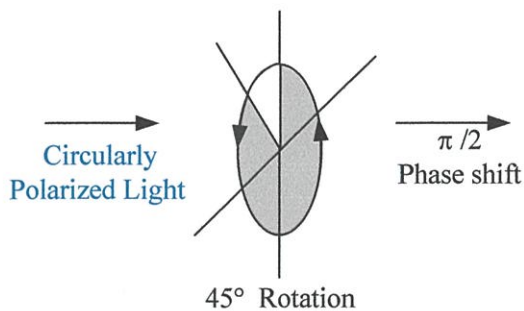
ภาพที่ 2.38 วิธีการปรับเลื่อนเฟส [56, 57]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Diffraction grating period = d



(c) การเลื่อนเกรตติงเลี้ยวเบน



(d) การหมุนแผ่นแก้วครึ่งคลื่น

ภาพที่ 2. 39 (ต่อ) วิธีการปรับเลื่อนเฟส [56, 57]

การปรับเลื่อนเฟสด้วยการขับเคลื่อนกระจกอ้างอิงด้วยชุดขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกเป็นวิธีการหนึ่งที่ย่างและนิยมใช้กับเทคนิคการเลื่อนเฟส ดังภาพที่ 2.38 (a) ซึ่งสามารถควบคุมระยะทางการเลื่อนของกระจกได้ในระดับนาโนเมตรด้วยการป้อนแรงดันให้ผลึกเพียโซ สำหรับการเลื่อนเฟสด้วยการปรับเอียงกระจก ดังภาพที่ 2.38 (b) ข้อควรระวังในการปรับเลื่อนเฟสด้วยวิธีนี้คือเส้นทางเดินแสงของลำแสงที่เคลื่อนที่ผ่านแผ่นแก้วจะต้องมีค่าเท่ากันตลอดพื้นที่หน้าตัดของลำแสงและจำเป็นต้องเลือกใช้แผ่นแก้วที่มีความเรียบพื้นผิวค่อนข้างสูง

สำหรับการเลื่อนเกรตติงเลี้ยวเบน ดังภาพที่ 2.38 (c) จะทำให้เกิดเลื่อนไปของเฟสอย่างต่อเนื่อง เกรตติงจะถูกเลื่อนไปในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของลำแสงที่แขนข้างหนึ่งของอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์มิเตอร์ ส่งผลให้คลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านเกรตติงเกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ในขณะที่ความยาวคลื่นมีค่าเท่าเดิม การเลื่อนไปของความถี่นี้เกิดขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler Effect) เรียกว่าการเกิดการเลื่อนความถี่แบบดอปเปลอร์ (Doppler Shift) การเลื่อนไปของความถี่ (Δv) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับลำดับของการเลี้ยวเบน (diffraction order) และ ความเร็ว (v) ในการเลื่อนเกรตติง แต่เป็นสัดส่วนผกผันกับระยะร่องของเกรตติง (d) นั่นคือ $\Delta v = mv/d$ ลำแสงที่ถูกหักเหไปในทิศทางเดียวกับทิศการเคลื่อนที่ของเกรตติง ความถี่ที่ถูกเลื่อนไปจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม ลำแสงที่ถูกหักเหไปในทิศทางตรงข้ามกับทิศการเคลื่อนที่ของเกรตติงความถี่ของลำแสงจะมีค่าลดลง ลำดับการเลี้ยวเบนของลำแสงเพียงลำดับเดียวเท่านั้นที่จะถูกเลือกขึ้นมาเพื่อให้เกิดการแทรกสอดกับลำแสงอีกลำหนึ่งที่ยังคงมีความถี่เท่ากับค่าของแหล่งกำเนิดแสง การเลื่อนไปของความถี่ หรือ Doppler shift เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ การเลื่อนไปของเฟส ตามความสัมพันธ์ $\delta(t) = 2\pi\Delta vt$

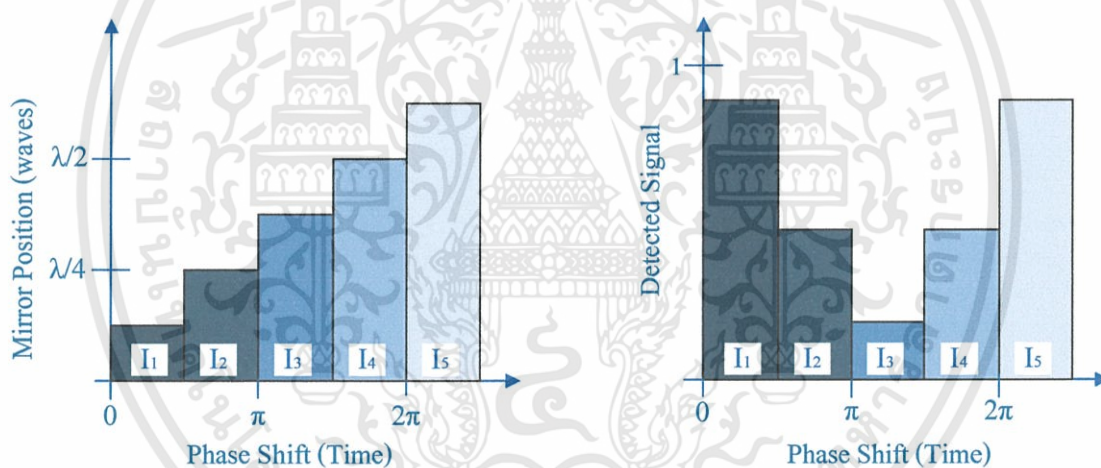
ในส่วนของการปรับเลื่อนเฟสด้วยการหมุนแผ่นแก้วครึ่งคลื่น ดังภาพที่ 2.38 (d) ทำโดยการวางแผ่นแก้วครึ่งคลื่นไว้ที่เอ้าท์พุทของอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ การเลื่อนไปของเฟสเกิดขึ้นเนื่องจากความจริงที่ว่าแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นนั้นสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นโพลาไรซ์วงกลม เมื่อแสงที่เป็นโพลาไรซ์วงกลมหมุนขวาเคลื่อนที่ผ่านแผ่นแก้วครึ่งคลื่นจะได้แสงกลายเป็นโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้าย และเมื่อทำการหมุนแผ่นแก้วครึ่งคลื่นอย่างต่อเนื่อง ความถี่ของลำแสงจะมีค่าเปลี่ยนไป (Δv) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของความถี่ในการหมุนแผ่นแก้ว ถ้าหมุนแผ่นแก้วด้วยมุมขนาดเล็ก ๆ ($\Delta\theta$) จะได้ว่า เฟสที่เลื่อนไป α มีค่าเป็น $\alpha = 2\Delta\theta$

2.9.3 การเก็บข้อมูล (Data Collection)

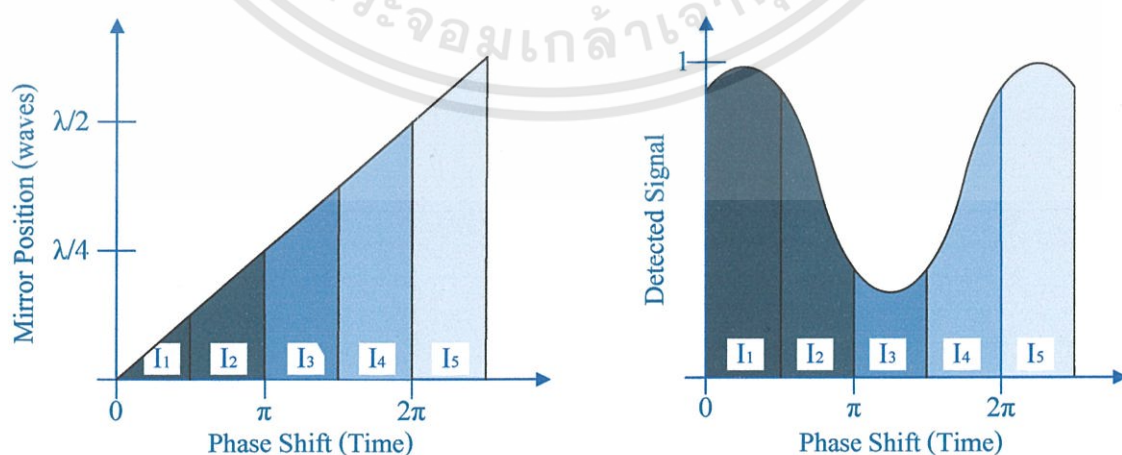
วิธีการเก็บค่าสัญญาณความเข้มแสงที่ได้จากเทคนิคการเลื่อนเฟสมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี แต่อย่างไรก็ตาม ก็มีแนวคิดเบื้องต้นที่เหมือนกัน คือ ในการประเมินหรือหาค่าของความต่างเฟสจะต้องใช้อินเตอร์เฟอแกรมอย่างน้อย 3 ภาพ การทำให้เฟสเกิดการเลื่อนสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนความแตกต่างของเส้นทางเดินแสงของลำแสงทั้งสอง หรือ โดยการเปลี่ยนความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งจัดว่าเป็นวิธีการเลื่อนเฟสแบบเชิงเวลา (Temporal Method) เทคนิคการปรับเลื่อนเฟสเชิงเวลาที่ใช้มีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ

- แบบเป็นขั้น (Phase-stepping)
- แบบต่อเนื่อง (Phase-ramping)

เทคนิคแรก เฟสของลำแสงอ้างอิงจะถูกปรับเลื่อนไปให้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างไม่ต่อเนื่อง แสดงดังภาพที่ 2.39 (a) ด้านซ้าย เฟสจะถูกเลื่อนไปด้วยค่าที่เท่า ๆ กัน ทั้งหมด 8 ครั้ง ภายในหนึ่งคาบเวลา อินเตอร์เฟอแกรมจะถูกบันทึกไว้ในแต่ละครั้งที่ทำการเลื่อนเฟส โดยภาพที่ 2.39 (a) ด้านขวา แสดงความเข้มแสงที่ถูกตรวจวัดโดยพิกเซลหนึ่งของตัวตรวจวัดความเข้มแสงในแต่ละครั้งที่ทำการเลื่อนเฟส เฟสที่ได้ระหว่างขั้นแต่ละขั้นที่อยู่ติดกันจึงมีค่าไม่ต่อเนื่อง



(a) Phase-stepping technique



(b) Phase-ramping technique

ภาพที่ 2. 40 เทคนิคการปรับเลื่อนเฟสเชิงเวลา [56]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการเลื่อนเฟสแบบ Phase-ramping เฟสจะถูกปรับเปลี่ยนไปอย่างต่อเนื่องเป็นเชิงเส้นกับเวลา ดังภาพที่ 2.39 (b) ด้านซ้าย ความเข้มแสงจะถูกตรวจวัดอย่างต่อเนื่องด้วยเซ็นกัน แสดงดังภาพที่ 2.39 (b) ด้านขวา ข้อดีของวิธีการนี้คือ ความเข้มแสงที่ได้มานั้นเป็นค่าได้การวัดไม่ใช่การประมาณหรือคาดเดา การประเมินค่าเฟสจึงมีความต่อเนื่อง แต่ถ้า เฟสของลำแสงลำแสงอ้างอิงถูกเลื่อนด้วยการเคลื่อนกระจกด้วยชุดขับเคลื่อนทรานส์ดีวเซอร์เพียโซอิเล็กทริก (PZT) นั้น การเลื่อนเฟสแบบ Phase-ramping จะส่งผลทำให้เกิดสภาวะไม่คงตัวหรือหยุดนิ่งของผลึกเพียโซ (damping effect) การบันทึกภาพอินเตอร์เฟอแกรมด้วยวิธีนี้จึงมีความจำเป็นต้องรอให้ PZT เข้าสู่สภาวะคงตัว

เมื่อพิจารณาว่า ความเข้มแสงเป็นฟังก์ชันกับเฟสอ้างอิงที่มีค่าคงที่ค่าหนึ่งแทนที่เฟสนั้นจะเป็นฟังก์ชันกับเวลา ความเข้มแสงที่แต่ละพิกเซลบนภาพอินเตอร์เฟอแกรม จากสมการที่ (2.25) จึงสามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$I(x, y, \delta) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + \delta] \quad (2.26)$$

ถ้าเฟสอ้างอิงเปลี่ยนไป Δ ในระหว่างระยะเวลาการเก็บภาพ (integration or exposure time) ความเข้มแสงที่ของแต่ละแฟรมจะมีค่าเป็น

$$I_i(x, y) = \frac{1}{\Delta} \int_{\delta_i - \Delta/2}^{\delta_i + \Delta/2} \{I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + \delta]\} d\delta \quad (2.27)$$

$$I_i(x, y) = I'(x, y) + \left(\frac{1}{\Delta}\right) I''(x, y) \left\{ \sin\left[\phi(x, y) + \delta_i + \frac{\Delta}{2}\right] - \sin\left[\phi(x, y) + \delta_i - \frac{\Delta}{2}\right] \right\}$$

ใช้คุณลักษณะทางตรีโกณมิติ ได้ว่า

$$I_i(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \operatorname{sinc}\left(\frac{\Delta}{2}\right) \cos(\phi(x, y) + \delta_i) \quad (2.28)$$

หรือสามารถเขียนได้ว่า

$$I_i(x, y) = I_0(x, y) \{1 + \gamma(x, y) \cos(\phi(x, y) + \delta_i)\} \quad (2.29)$$

เมื่อ	δ_i	คือ	เฟสที่เลื่อนไป ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของคาบเวลา
	$I_i(x, y)$	คือ	ความเข้มแสงของอินเตอร์เฟอแกรมภาพ i ที่ถูกบันทึก
	γ	คือ	ความคมชัดของภาพ

$$\operatorname{sinc}(\Delta/2) = \sin(\Delta/2) / (\Delta/2)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (2.28) กับสมการที่ (2.29) เห็นได้ว่า ความคมชัดของภาพมีค่าลดลงด้วยความเข้มแสงที่ถูกมอดูเลตมีค่าลดลงด้วย sinc function เมื่อเฟสเกิดการเลื่อนไป Δ ในระหว่างช่วงเวลาที่ทำการบันทึกภาพ ส่งผลให้ความคมชัดของรีจิสตราร์แทรกสอดลดลง ด้วยสาเหตุนี้ อินเตอร์เฟอแกรมแต่ละแฟรมที่ถูกบันทึกด้วยเทคนิคการเลื่อนเฟสแบบ phase-ramping จะต้องเกิดจากเฟสที่เลื่อนไป Δ ด้วยค่าที่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจาก PSI เป็นเทคนิคคำนวณหาค่าเฟสที่แต่ละพิกเซลด้วยการตรวจสอบการเปลี่ยนไปของความเข้มแสง เทคนิคการเลื่อนเฟสแบบ phase-stepping จึงเป็นกรณีหนึ่งของเทคนิค phase-ramping เมื่อ $\Delta = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีของการปรับเลื่อนเฟสแบบ phase-stepping ค่าของเฟสที่เลื่อนไปในระหว่างที่ทำการบันทึกภาพนั้นมีค่า $\Delta = 0$ ทำให้ผลของช่วงระยะเวลาในการเก็บภาพไม่มีผลกระทบต่อความเข้มแสงที่ถูกมอดดูเลต จึงทำให้ภาพที่ได้มีความคมชัดมากกว่าภาพที่ได้จากเทคนิค phase-ramping เมื่อ $\Delta = 0$ ฟังก์ชันของ sinc (sinc function) จึงมีค่าเป็น 1 เทอมแทรกสอดหรือความเข้มแสงที่ถูกมอดดูเลตจะมีค่าสูงสุด แต่ถ้า $\Delta \neq 0$ (Phase-ramping) ความเข้มแสงที่ถูกมอดดูเลตจะมีค่าลดลงเหลือ 97% เมื่อ $\Delta = \pi/4$ และลดลงเหลือ 90% เมื่อ $\Delta = \pi/2$ ในกรณีที่ $\Delta = \pi/2$ หมายความว่าในขณะที่เกิดการปรับเลื่อนเฟสจนครบ 1 คาบเวลา จะต้องทำการเก็บภาพอย่างต่อเนื่องทั้งหมด 4 ภาพ แต่ถ้า $\Delta = 2\pi$ ความเข้มแสงที่ถูกมอดดูเลตจะมีค่าลดลงเป็นศูนย์ นั่นคือ เพื่อให้ได้ค่าความเข้มแสงมอดดูเลตที่มีอัตราส่วนของระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (signal to noise) ที่ดี จะต้องเลื่อนเฟสให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง π ต่อการบันทึกภาพหนึ่งครั้ง

2.9.4 อัลกอริทึมของอินเตอร์พรีอิมเตอร์แบบเลื่อนเฟส (PSI Algorithms)

ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์หรืออัลกอริทึมที่ใช้สำหรับการประเมินเฟสของริ้วการแทรกสอดที่ได้จากเทคนิคการเลื่อนเฟส มีอยู่ด้วยกันหลายอัลกอริทึมได้แก่ Carre's algorithm, N-bucket algorithm และ การประมาณกำลังสองน้อยที่สุด (least-square approach) เป็นต้น โดย N-bucket algorithm ที่มีการเก็บอินเตอร์พรีอแกรมทั้งหมด 4 ภาพ ในขณะที่เฟสเกิดการเปลี่ยนแปลงครั้งละ $\pi/2$ เป็นวิธีการที่นิยมกันมากที่สุด ถึงแม้จะมีการพัฒนาคิดค้นอัลกอริทึมด้วยกันมากมาย อัลกอริทึมแต่ละอัลกอริทึมจะมีรายละเอียดขั้นตอนการประเมินค่าเฟสที่แตกต่างกันไป ซึ่งความแตกต่างนี้เกิดอาจเกิดขึ้นจากจำนวนภาพของอินเตอร์พรีอแกรมที่ถูกบันทึก ค่าของเฟสที่เลื่อนระหว่างอินเตอร์พรีอแกรมแต่ละภาพและความไวของอัลกอริทึมที่มีต่อความผิดพลาดในการเลื่อนเฟสรวมทั้งสัญญาณรบกวนจากสภาพแวดล้อมเช่น การสั่นสะเทือน ความไม่เป็นเชิงเส้นของตัวตรวจวัดแสงที่มีต่อความเข้มของแสง เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามสิ่งสำคัญของอัลกอริทึมทุก ๆ อัลกอริทึม นั่นคือการบันทึกภาพอินเตอร์พรีอแกรมซึ่งจะต้องถูกบันทึกไว้เป็นลำดับตามเฟสที่เปลี่ยนไป หลังจากนั้นเฟสของหน้าคลื่นที่แต่ละพิกเซลจะถูกคำนวณออกมาจากฟังก์ชันอาร์กแทนของความเข้มแสงบนแต่ละภาพอินเตอร์พรีอแกรมที่ตำแหน่งพิกเซลเดียวกัน ซึ่งค่าของเฟสที่ได้นี้ สอดคล้องกับ modulo 2π (Modulo 2π phase) หรือ เฟสซ้อนรูป (Wrapped Phase) เนื่องจากค่าของเฟสได้มาจากฟังก์ชันอาร์กแทนจึงทำให้ค่าเฟสที่ได้นั้น ดังนั้น จึงจำเป็นต้องทำการคืนรูปเฟส (Phase Unwrapping) เพื่อให้ค่าเฟสที่แท้จริง

จากที่ผ่านมามองเห็นว่าความแตกต่างระหว่างเทคนิคการเลื่อนเฟสแบบ phase-stepping กับ phase-ramping อยู่ที่ค่ายังผลของความเข้มแสงที่ถูกมอดดูเลต อย่างไรก็ตามอัลกอริทึมที่ใช้ในการประเมินภาพอินเตอร์พรีอแกรมที่ได้จากทั้งสองเทคนิคนี้สามารถใช้อัลกอริทึมที่เหมือนกันได้ เพื่อความสะดวกในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มแสง เฟส และ Δ จากสมการที่ (2.28) เขียนใหม่ได้เป็นดังนี้

$$I_i(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y) + \delta_i] \quad (2.29)$$

เมื่อ

$$I''(x, y, \Delta) = I''(x, y) \text{sinc}(\Delta/2) \quad (2.30)$$

เทอม $I''(x, y, \Delta)$ คือค่าความเข้มแสงที่ถูกมอดดูเลต และมีค่าขึ้นกับเฟสที่เปลี่ยนแปลง Δ ในระหว่างช่วงเวลาที่ทำการบันทึกภาพ การประเมินค่าเฟสด้วย PSI ต้องสมมุติค่าเฟสอ้างอิงเริ่มต้น ซึ่งเป็นค่าที่ไม่สามารถหาได้ ค่าที่สมมุติขึ้นมานั้นจึงเป็นมีค่าที่ทำให้สมการทางคณิตศาสตร์มีรูปแบบที่ไม่ซับซ้อนและยุ่งยาก อัลกอริทึมแต่รูปแบบจะมีความไวต่อความผิดพลาดในการเลื่อนเฟสไม่เท่ากัน หมายความว่า การใช้อัลกอริทึมบางแบบในการประเมินภาพ ผลการคำนวณค่าเฟสหน้าคลื่นยังมีความถูกต้องอยู่ถึงแม้ว่าจะเกิดความผิดพลาดในการเลื่อนเฟสค่อนข้างมาก

2.9.4.1) อัลกอริทึมสำหรับเทคนิคการเลื่อนเฟสแบบ 3 ชั้น

ในการประเมินชุดภาพอินเตอร์ฟีรแกรมเพื่อหาค่าเฟสของหน้าคลื่นจากสมการที่ (2.29) พบว่ามีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าอยู่ 3 ตัว ดังนั้น จึงต้องทำการบันทึกภาพอินเตอร์ฟีรแกรมอย่างน้อย 3 ภาพ โดยทั่วไปเทคนิคการเลื่อนเฟสจะทำการเลื่อนเฟสไปด้วยค่าที่ทราบและแต่ละชั้นจะมีระยะห่างของความต่างเฟสที่เท่ากัน สำหรับกรณีทั่วไปกำหนดให้

$$\delta_i = -\alpha, 0, \alpha; \quad i = 1, 2, 3$$

แทนค่าทั้ง 3 ค่าลงในสมการที่ (2.29)

$$I_1 = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y) - \alpha] \quad (2.31)$$

$$I_2(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y)] \quad (2.32)$$

$$I_3(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y) + \alpha] \quad (2.33)$$

จากคุณลักษณะของตรีโกณมิติ ได้ว่า

$$I_1(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \{ \cos[\phi(x, y)] \cos(\alpha) + \sin[\phi(x, y)] \sin(\alpha) \} \quad (2.34)$$

$$I_2(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y)] \quad (2.35)$$

$$I_3(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \{ \cos[\phi(x, y)] \cos(\alpha) - \sin[\phi(x, y)] \sin(\alpha) \} \quad (2.36)$$

ค่าเฟสของหน้าคลื่นสามารถคำนวณหาได้จากการแก้สมการทั้ง 3 สมการนี้ โดยค่าความต่างเฟส ของหน้าคลื่นที่แต่ละพิกเซล มีค่าเป็น

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left\{ \left[\frac{1 - \cos(\alpha)}{\sin(\alpha)} \right] \frac{I_1 - I_3}{2I_2 - I_1 - I_3} \right\} \quad (2.37)$$

ส่วนความเข้มแสงที่ถูกมอดดูเลต สามารถคำนวณหาได้จาก

$$I'(x, y) = \frac{I_1 + I_3 - 2I_2 \cos(\alpha)}{2[1 - \cos(\alpha)]} \quad (2.38)$$

$$I''(x, y, \Delta) = \frac{\{ [1 - \cos(\alpha)(I_1 - I_3)]^2 + [\sin(\alpha)(2I_2 - I_1 - I_3)]^2 \}^{1/2}}{2\sin(\alpha)[1 - \cos(\alpha)]} \quad (2.39)$$

อัตราส่วนระหว่างความเข้มแสงทั้งสองนี้เป็นการมอดูเลตสัญญาณที่ถูกบันทึกที่แต่ละจุดและเป็นค่าความคมชัดของแต่ละพิกเซล มีค่าเป็น

$$\begin{aligned} \gamma(x, y) &= \frac{I''(x, y, \Delta)}{I'(x, y)} \\ &= \frac{\{[1 - \cos(\alpha)](I_1 - I_3)\}^2 + [\sin(\alpha)(2I_2 - I_1 - I_3)]^2\}^{1/2}}{[I_1 + I_3 - 2I_2 \cos(\alpha)]\sin(\alpha)} \end{aligned} \quad (2.40)$$

ขนาดการเลื่อนของเฟสที่นิยมใช้กับการบันทึกภาพจำนวน 3 เฟรม คือ เลื่อนเฟสครึ่งละ 90° และ 120° ถ้า $\alpha = \pi/2$ ได้ว่า

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_1 - I_3}{2I_2 - I_1 - I_3} \right) \quad (2.41)$$

ถ้า $\alpha = 2\pi/3$ ได้ว่า

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left(\sqrt{3} \frac{I_1 - I_3}{2I_2 - I_1 - I_3} \right) \quad (2.42)$$

โดยถ้าใช้เทคนิคการเลื่อนเฟสแบบ phase-stepping เมื่อ $\alpha = \pi/2$ ความเข้มแสงที่ถูกบันทึกไว้จะมีค่าลดเหลือ 90% และ เมื่อ $\alpha = 2\pi/3$ จะเหลือเพียง 83% ดังนั้นในการใช้อัลกอริทึมนี้จึงนิยมที่จะทำการเลื่อนเฟสครึ่งละ 90° และให้มีค่าเริ่มต้นของเฟสที่ 45° จากเงื่อนไขนี้ได้ว่า

$$\delta_i = \pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4; \quad i = 1, 2, 3$$

และ

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} \right) \quad (2.43)$$

แต่อย่างไรก็ตาม อัลกอริทึมของเทคนิคการเลื่อนเฟสแบบ 3 ระยะนี้ยังมีความไวต่อความผิดพลาดในการเลื่อนเฟสระหว่างแต่ละเฟรมภาพค่อนข้างมาก

2.9.4.2) อัลกอริทึมสำหรับเทคนิคการเลื่อนเฟสแบบ 4 ชั้น

อัลกอริทึมที่ถือได้ว่าเป็นพื้นฐานสำหรับการคำนวณค่าความต่างเฟสด้วย PSI คือ อัลกอริทึมแบบ 4 ชั้น ซึ่งภาพที่ถูกบันทึกทั้งหมดมี 4 เฟรม แต่ละภาพจะถูกเก็บที่ระยะห่างของเฟส 90° ซึ่งทำโดยการเลื่อนเส้นทางเดินของแสงที่ตกกระทบกับพื้นผิวอ้างอิงโดย

$$\delta_i = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2 \quad i = 1, 2, 3, 4$$

แทนค่า δ_i ทั้ง 4 ค่าลงในสมการที่ (2.28)

$$I_1(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y)] \quad (2.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_2(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y) + \pi/2] \quad (2.45)$$

$$I_3(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y) + \pi] \quad (2.46)$$

$$I_4(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y) + 3\pi/2] \quad (2.47)$$

จากคุณลักษณะของตรีโกณมิติ

$$I_1(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y)] \quad (2.48)$$

$$I_2(x, y) = I'(x, y) - I''(x, y, \Delta) \sin[\phi(x, y)] \quad (2.49)$$

$$I_3(x, y) = I'(x, y) - I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y)] \quad (2.50)$$

$$I_4(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \sin[\phi(x, y)] \quad (2.51)$$

ถึงแม้ว่าจากสมการทั้ง 4 นี้มีตัวแปรเพียง 3 ตัว ที่ไม่ทราบค่า $I'(x, y)$ $I''(x, y, \Delta)$ และ $\phi(x, y)$ ก็ตาม โดยสมการที่เพิ่มเข้าอีกสมการหนึ่งนั้น ทำให้การคำนวณหาค่าไม่ต้องยุ่งเกี่ยวกับความเข้มแสงที่ถูกมอดดูเลตเทอม $I'(x, y)$ โดยจับคู่สมการทั้ง 4 แล้วทำการลบ จะได้ว่า

$$I_4 - I_2 = 2I''(x, y, \Delta) \sin[\phi(x, y)] \quad (2.52)$$

$$I_1 - I_3 = 2I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y)] \quad (2.53)$$

จากสมการทั้งสองนี้ ได้ว่า

$$\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} = \frac{\sin[\phi(x, y)]}{\cos[\phi(x, y)]} = \tan[\phi(x, y)] \quad (2.54)$$

จากสมการนี้ทำให้ได้ค่าความต่างเฟสที่ได้จากอัลกอริทึมของ PSI แบบ 4 ขั้น มีค่าเป็น

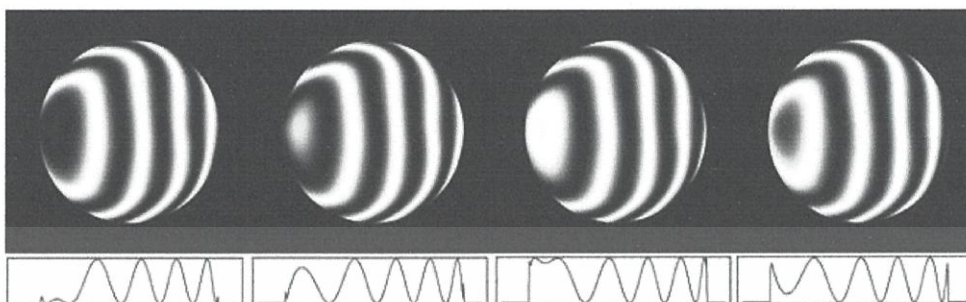
$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right] \quad (2.55)$$

หน้าคลื่นนี้มีความสัมพันธ์กับความสูงของพื้นผิวทดสอบดังแสดงไว้ในสมการที่ (2.20) ซึ่งความสัมพันธ์กับผลต่างของเส้นทางเดินแสง (Optical path difference, OPD) :

$$OPD(x, y) = \lambda \phi(x, y) / 2\pi \quad (2.56)$$

ตัวอย่างภาพอินเทอร์เฟอแกรมทั้ง 4 เฟรมที่ทำการบันทึกไว้เมื่อความต่างเฟสของลำแสงเลื่อนไปครึ่งละ 90° แสดงดังภาพที่ 2.40 จากภาพรีจิสเทรชันที่ปรากฏจะค่อยๆ เลื่อนผ่านขอบภาพไป และความเข้มแสงทุก ๆ พิกเซลจะเปลี่ยนแปลงไปตามเฟส และเมื่อเลื่อนเฟสครบ 360° จะทำให้ภาพในเฟรมที่ 1 และเฟรมที่ 5 จะปรากฏรีจิสเทรชันที่ปรากฏที่มอดดูเลตที่มีลักษณะเหมือนกัน ค่าของความเข้มแสงที่ถูกมอดดูเลตและถูกทำการบันทึกไว้ มีเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความเข้มแสงที่ถูกมอดดูเลตข้างต้น ซึ่งมีค่าเป็น

$$\gamma(x, y) = \frac{2[(I_4 - I_2)^2 + (I_1 - I_3)^2]^{1/2}}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \quad (2.57)$$



ภาพที่ 2. 41 (ด้านบน) ภาพอินเตอร์เฟอแกรม 4 เฟรม เมื่อความต่างเฟสเปลี่ยนไปครั้งละ 90 องศา และ (ด้านล่าง) ความเข้มแสง เมื่อทำการสแกนตามเส้นผ่านศูนย์กลางของเฟรม [57]

2.9.4.3) คาร์เรอัลกอริทึม (Carré Algorithm)

โดยทั่วไปนั้นพบว่าอัลกอริทึมที่ใช้กับ PSI นั้นค่าของเฟสที่เลื่อนไประหว่างเฟรมของภาพที่ต่อเนื่องกันจะต้องทราบค่าแน่นอน ถ้าเฟสที่เลื่อนไปนั้นมีค่าผิดพลาดไปจะส่งผลให้การประเมินค่าเฟสของหน้าคลื่นเกิดความผิดพลาดขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งความผิดพลาดนี้โดยส่วนมากเกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของชุดขับเคลื่อนเพียโซระหว่างระยะกระจัดที่เพียโซยึดหรือหดกับระดับแรงดันทางไฟฟ้าที่ป้อนให้กับผลึกเพียโซ เช่น ต้องการให้ความต่างเฟสของลำแสงมีค่าเลื่อนไป 90° แต่ชุดขับเคลื่อนเพียโซขับให้เฟสเลื่อนไปเพียง 88° เท่านั้น นอกจากนี้ความไม่เป็นลำขนานของลำแสงอย่างแท้จริงยังส่งผลต่อความผิดพลาดในการควบคุมการขับเคลื่อนเฟสนี้อีกด้วย จึงทำให้มีการพัฒนาอัลกอริทึมขึ้นมาหลายอัลกอริทึมด้วยกันโดยมีจุดประสงค์เดียวกันคือลดผลกระทบของความผิดพลาดในการเลื่อนเฟสที่มีผลการคำนวณเฟสของหน้าคลื่น ในปี 1996 Carré [58] ได้ทำการพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับ PSI ที่ลดผลกระทบของความผิดพลาดในการเลื่อนเฟสขึ้นเป็นครั้งแรก อัลกอริทึมนี้ต้องการเก็บภาพอินเตอร์เฟอแกรม 4 เฟรม เช่นเดียวกับอัลกอริทึมสำหรับเทคนิคการเลื่อนเฟสแบบ 4 ชั้น เพียงแต่ค่าของความต่างเฟสที่ทำการเลื่อนไปในการเก็บภาพแต่ละเฟรมหรือแต่ละชั้นไม่จำเป็นต้องมีค่าเป็น 90° ดังนั้นค่าเฟสของลำแสงอ้างอิงที่เปลี่ยนไปจึงเป็นตัวแปรอีกตัวแปรหนึ่งที่ต้องทำการหาค่า โดยในแต่ละชั้นจะมีค่าเฟสของลำแสงอ้างอิงต่างกัน 2α ดังนั้นค่าเฟสของลำแสงอ้างอิง จะมีค่าเป็น

$$\delta_i = -3\alpha, -\alpha, \alpha, 3\alpha \quad i = 1, 2, 3, 4$$

และความเข้มแสงที่ได้จากอินเตอร์เฟอแกรมทั้ง 4 เฟรม มีค่าเป็น

$$I_1(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y) - 3\alpha] \quad (2.58)$$

$$I_2(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y) - \alpha] \quad (2.59)$$

$$I_3(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y) + \alpha] \quad (2.60)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_4(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y) + 3\alpha] \quad (2.61)$$

จากสมการเห็นได้ว่าตัวแปรที่ไม่ทราบในคาร์เรย์ อัลกอริทึม มีอยู่ด้วยกัน 4 ตัวแปรคือ ความเข้มแสงที่ถูกมอดดูเลต 2 ค่าคือ $I'(x, y)$ และ $I''(x, y, \Delta)$ ความต่างเฟส $\phi(x, y)$ และเฟสของลำแสงอ้างอิงที่ถูกเลื่อนไป α ดังนั้นสมการ 4 สมการนี้จึงเพียงพอที่จะทำการหาค่าของตัวแปรเหล่านี้โดยเฟสของลำแสงอ้างอิงที่ทำการเลื่อนไปมีค่าเป็น

$$\alpha(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)}{(I_1 + I_4) - (I_2 + I_3)} \right]^{1/2} \quad (2.62)$$

และเฟสของหน้าคลื่นที่แต่ละตำแหน่ง มีค่าเป็น

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left\{ \tan[\alpha(x, y)] \frac{(I_1 - I_4) + (I_2 - I_3)}{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)} \right\} \quad (2.63)$$

จากสมการทั้งสองได้ว่า

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\{[3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)][(I_1 - I_4) + (I_2 - I_3)]\}^{1/2}}{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)} \right\} \quad (2.64)$$

เห็นได้ว่าคาร์เรย์ อัลกอริทึม เป็นอัลกอริทึมที่ลดความผิดพลาดจากการระบุค่าของเฟสที่ต้องการเลื่อน แต่อย่างไรก็ตามเฟสที่เลื่อนไปในแต่ละขั้นยังคงต้องมีค่าเท่ากัน

2.9.4.4) ฮาริฮาราน อัลกอริทึม (Hariharan algorithm)

ฮาริฮารานอัลกอริทึม เป็นอัลกอริทึมหนึ่งที่ทำกรเลื่อนเฟสของลำแสงอ้างอิงครึ่งละ 90° แต่เมื่อเกิดความผิดพลาดในการเลื่อนไปของเฟส ค่าความผิดพลาดนั้นจะส่งผลน้อยมากต่อผลการคำนวณ รวมทั้งอัลกอริทึมนี้ยังถูกออกแบบมาเพื่อลดความเป็นไปได้ที่ทั้งตัวตั้งและตัวหารของฟังก์ชันอาร์คแทน (Arctan function) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ฮาริฮาราน อัลกอริทึม ถูกพัฒนาขึ้นโดย Hariharan และคณะ ในปี 1987 [59] อัลกอริทึมนี้จะทำการบันทึกภาพอินเตอร์เฟอแกรมทั้งหมด 5 เฟรม โดยเฟสของลำแสงอ้างอิงจะถูกทำการเลื่อนเป็นเชิงเส้น ภาพแต่เฟรมจะระยะห่างของเฟสเป็น α ดังนี้

$$\delta_i = -2\alpha, -\alpha, 0, \alpha, 2\alpha \quad i = 1, 2, 3, 4, 5$$

ความเข้มที่ตำแหน่งใด ๆ ในอินเตอร์เฟอแกรมทั้ง 5 คือ

$$I_1(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y) - 2\alpha] \quad (2.65)$$

$$I_2(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y) - \alpha] \quad (2.66)$$

$$I_3(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y)] \quad (2.67)$$

$$I_4(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y) + \alpha] \quad (2.68)$$

$$I_5(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y) + 2\alpha] \quad (2.69)$$

จากสมการทั้ง 5 สมการนี้ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\tan[\phi(x, y)]}{2 \sin(\alpha)} = \frac{I_2 - I_4}{2I_3 - I_5 - I_1} \quad (2.70)$$

โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง α กับ $1/2 \sin \alpha$ แสดงดังภาพที่ 2.42 และเมื่อทำการอนุพันธ์ (Differentiation) สมการที่ (2.75) เทียบกับ α ได้ว่า

$$\frac{d}{d\alpha} \left\{ \frac{\tan[\phi(x, y)]}{2 \sin(\alpha)} \right\} = \frac{-\cos(\alpha) \tan[\phi(x, y)]}{2 \sin^2(\alpha)} \quad (2.71)$$

ซึ่งผลของการหาอนุพันธ์จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เมื่อ $\alpha = \pi/2$ แสดงให้เห็นว่า เมื่อเฟสถูกเลื่อนออกไปด้วยระยะ $\pi/2$ ทำให้สมการที่ (2.75) ไม่ได้รับผลกระทบต่อความผิดพลาดในการเลื่อนเฟส ท้ายสุดแล้วค่าความต่างเฟสที่คำนวณได้จากฮาร์ริฮาราน อัลกอริทึม คือ

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{2 \sin \alpha (I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1} \right] \quad (2.72)$$

ถ้า $\alpha = \pi/2$

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1} \right] \quad (2.73)$$

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงที่ถูกมอดูเลตทั้งสองเทอม มีค่าเป็น

$$\gamma(x, y) = \frac{3[4(I_4 - I_2)^2 + (I_1 - I_5 - 2I_3)^2]^{1/2}}{2(I_1 + I_2 + 2I_3 + I_4 + I_5)} \quad (2.74)$$

จะเห็นได้ว่าสมการที่ (2.70) และ (2.71) ซึ่งเป็นผลของการใช้ฮาร์ริฮาราน อัลกอริทึม กับสมการที่ (2.55) และ (2.57) ซึ่งเป็นผลของการใช้อัลกอริทึมสำหรับเทคนิคการเลื่อนเฟสแบบ 4 ชั้น ซึ่งอัลกอริทึมทั้งสองนี้ทำการเลื่อนเฟสครั้งละ 90° มีความคล้ายคลึงกันมาก เนื่องจาก I1 และ I5 ควรจะมีค่าเท่ากัน นอกจากนี้จากกราฟภาพที่ 2.42 เห็นว่าได้จุดต่ำสุดอยู่ 90° และมีช่วงค่อนข้างกว้าง จึงเป็นผลทำให้ฮาร์ริฮาราน อัลกอริทึม เป็นอัลกอริทึมที่สามารถยังคำนวณค่าของความเฟสของหน้าคลื่นได้อย่างถูกต้อง ถึงแม้ว่าเฟสของความลำแสงอ้างอิงที่ถูกเลื่อนไปจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นก็ตาม โดยถ้าเฟสที่ถูกเลื่อนไปจริงมีค่าเป็น $\pi/2 + \varepsilon$ ซึ่งสอดคล้องกับ $\phi'(x, y) = \phi(x, y) + \Delta\phi(x, y)$ จากการประมาณค่าในสมการที่ (2.70) และสมมติว่า ε มีค่าน้อยมาก พบว่า

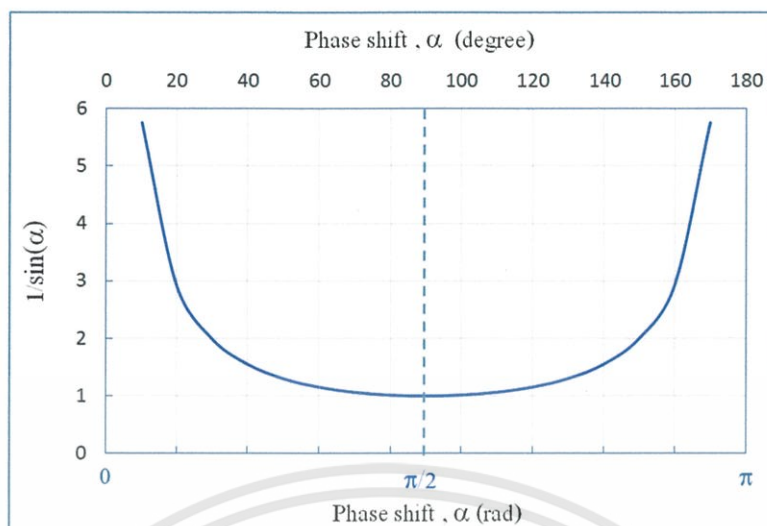
$$\tan[\phi'(x, y)] \cong [1 + (\varepsilon^2 / 2)] \tan[\phi(x, y)] \quad (2.75)$$

ความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดเฟส ประมาณได้ว่ามีค่าเป็น

$$\Delta\phi(x, y) = \phi'(x, y) - \phi(x, y) \cong (\varepsilon^2 / 4) \sin[2\phi(x, y)] \quad (2.76)$$

ความผิดพลาดในการวัดเฟสมีค่าขึ้นอยู่กับเฟสของหน้าคลื่น โดยถ้าทำการเลื่อนเฟสผิดพลาดจาก 90° เป็น 88° ($\varepsilon = 2^\circ = 0.035$ rad) จะมีค่าความผิดพลาดสูงสุดในวัดเฟสเป็น 0.02° หรือมีค่าความผิดพลาดสูงสุดในการวัดความสูงของพื้นผิวเพียง 9 A เท่านั้น และเมื่อเปรียบเทียบอัลกอริทึมแบบ 3 ชั้นที่มีการเลื่อนเฟสเท่ากัน พบว่ามีความผิดพลาดในการวัดเฟสสูงถึง 1°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2. 42 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\sin(\alpha)$ กับ ความต่างเฟสที่ถูกลื่อนไป [60]

อัลกอริทึมหรือระเบียบวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้นิยมนำมาในการวิเคราะห์ลวดลายรีวการแทรกสอดที่ได้จากอินเตอร์เฟอริเตอร์แบบเลื่อนเฟสมีอยู่ด้วยกันหลายอัลกอริทึม บางอัลกอริทึมใช้อินเตอร์เฟอริแกรมเพียง 3 เฟรม เท่านั้น แต่แต่ละอัลกอริทึมมีวิธีมีข้อดีที่แตกต่างกันไป ซึ่งพอสรุปได้ดัง Error! Reference source not found.

ตารางที่ 2. 1 ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กับอินเตอร์เฟอริเตอร์แบบเลื่อนเฟส [56, 57, 60, 61]

ระเบียบวิธี	การคำนวณค่าเฟส	คุณสมบัติ
3 ชั้น 45°	$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} \right]$	<ol style="list-style-type: none"> 1. ใช้อินเตอร์เฟอริแกรม 3 เฟรมในการคำนวณค่าเฟส 2. ไวต่อสัญญาณรบกวนมากที่สุด เนื่องจากมีจำนวนข้อมูลน้อย
3 ชั้น 90°	$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{I_1 - I_3}{2I_2 - I_1 - I_3} \right]$	
3 ชั้น 120°	$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\sqrt{3} \frac{I_1 - I_3}{2I_2 - I_1 - I_3} \right]$	
คาเรย์	$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{\{[3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)][(I_1 - I_4) + (I_2 - I_3)]\}^{1/2}}{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)} \right]$	<ol style="list-style-type: none"> 1. ใช้อินเตอร์เฟอริแกรม 4 เฟรม เฟสเลื่อนไปแต่ละเฟรมไม่จำเป็นต้องมีค่าเป็น 90° แต่ต้องมีค่าเท่ากันทุกเฟรม 2. ลดความผิดพลาดจากการระบุค่าของเฟสที่ต้องทำการเลื่อน 3. เป็นวิธีที่มีความยุ่งยากและไม่นิยมนำมาใช้
4 ชั้น	$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right]$	<ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นวิธีพื้นฐานสำหรับการคำนวณค่าความต่างเฟส 2. ใช้อินเตอร์เฟอริแกรมทั้งหมด 4 เฟรม แต่ละเฟรมมีเฟสต่างกัน 90°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กับอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบเลื่อนเฟส

ระเบียบวิธี	การคำนวณค่าเฟส	คุณสมบัติ
ฮารีฮาราน	$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1} \right]$	<ol style="list-style-type: none"> 1. ใช้อินเตอร์เฟอโรแกรมทั้งหมด 5 เฟรม 2. แต่ละเฟรมมีเฟสต่างกัน 90° โดยเฟรมที่ 1 และเฟรมที่ 5 อินเตอร์เฟอโรแกรมจะมีลักษณะเหมือนกันทุกประการ 3. เมื่อเกิดความผิดพลาดในการเลื่อนเฟส จะส่งผลต่อผลการคำนวณน้อยมาก 4. ออกแบบมาเพื่อลดความเป็นไปได้ที่ทั้งตัวตั้งและตัวหาร ของฟังก์ชันอาร์คแทน (Arctan function) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์

2.9.5 การคืนรูปเฟส (Phase Unwrapping)

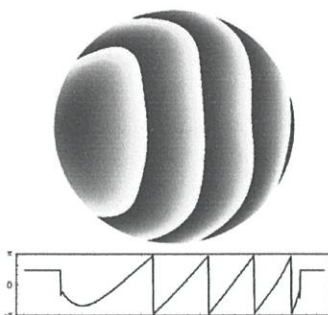
อัลกอริทึมสำหรับการประเมินเฟสของหน้าคลื่นจากรีการแทรกสอดด้วย PSI เห็นได้ว่า เฟสนั้นเป็นฟังก์ชันอาร์คแทน (Arctan function) ของความเข้มแสง โดยค่าของฟังก์ชันผกผัน (inverse function) นี้มีค่าอยู่ในช่วง $[-\pi/2, \pi/2]$ จึงต้องมีการแก้ค่าเฟส การปรับแก้ค่าเป็นไปดังตารางที่ 2.2 ซึ่งค่าเฟสที่ได้จากการปรับค่าแก้เนื่องจากผลของฟังก์ชันอาร์คแทนซึ่งเป็นการทำมอดูโล 2π ให้กับเฟสเฟสที่ได้ เรียกว่า เฟสซ้อนรูป (Wrapped phase) เฟสซ้อนรูปยังคงไม่มีความต่อเนื่องเฟสที่อยู่ติดกัน การสร้างหรือคำนวณค่าเฟสเพื่อให้ได้ค่าเฟสที่แท้จริงจากเฟสซ้อนรูปเรียกว่า การคืนรูปเฟส เฟสที่ผ่านกการคืนรูปเฟส เรียกว่า เฟสถอดรูป (Unwrapped phase) ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสซ้อนกับเฟสถอดรูป เป็นดังสมการ

$$\phi_{\text{unwrapped}}(i) = \phi_{\text{wrapped}}(i) + 2\pi n$$

และ

$$\Delta\phi_{\text{wrapped}}(i) = \phi_{\text{wrapped}}(i) - \phi_{\text{wrapped}}(i-1)$$

โดยที่ i แทน ตำแหน่งของพิกเซล $i-1$ แทน ตำแหน่งของพิกเซลที่อยู่ติดกับพิกเซล i และ n เป็น เลขจำนวนเต็มที่คุณกับ 2π แล้วนำไปบวกหรือลบกับเฟสซ้อนรูปแล้วทำให้พิกเซลที่อยู่ติดกันมีค่าความต่างเฟสแตกต่างกันน้อยกว่า π และ เครื่องหมายบวกลบของ $\sin \phi$ และ $\cos \phi$ จะต้องถูกนำมาพิจารณาด้วย ดังตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการประเมินค่าเฟสที่ยังคงเป็นค่าเฟสซ้อนรูปจากอินเตอร์เฟอโรแกรม 4 เฟรม เป็นดังภาพที่ 2.42

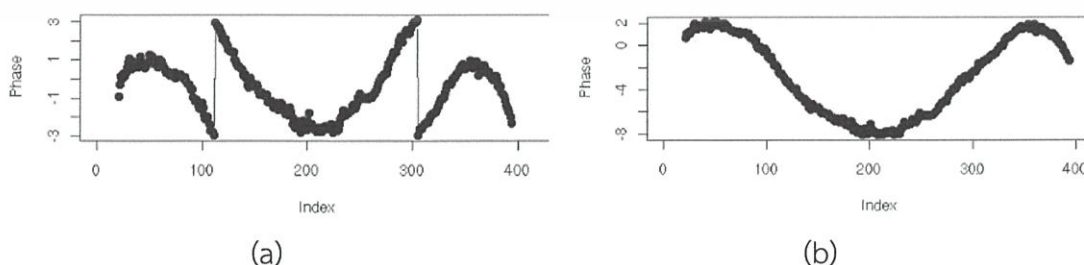


ภาพที่ 2. 43 ตัวอย่างเฟสซ่อนรูปจากอินเตอร์เฟรม 4 เฟรม [57]

ตารางที่ 2. 2 การคำนวณเฟสมอดุโล 2π (Phase modulo 2π)

$\sin \phi$	$\cos \phi$	ค่าเฟสที่ถูกปรับแก้	ช่วงของเฟส
$\sin \phi > 0$	$\cos \phi > 0$	ϕ	$0 \rightarrow \pi/2$
$\sin \phi > 0$	$\cos \phi < 0$	$\pi - \phi$	$\pi/2 \rightarrow \pi$
$\sin \phi < 0$	$\cos \phi < 0$	$\phi + \pi$	$\pi \rightarrow 3\pi/2$
$\sin \phi < 0$	$\cos \phi > 0$	$2\pi - \phi$	$3\pi/2 \rightarrow 2\pi$
$\sin \phi > 0$	$\cos \phi = 0$	$\pi/2$	$\pi/2$
$\sin \phi = 0$	$\cos \phi < 0$	π	π
$\sin \phi < 0$	$\cos \phi = 0$	$3\pi/2$	$3\pi/2$
$\sin \phi = 0$	$\cos \phi \geq 0$	0	0

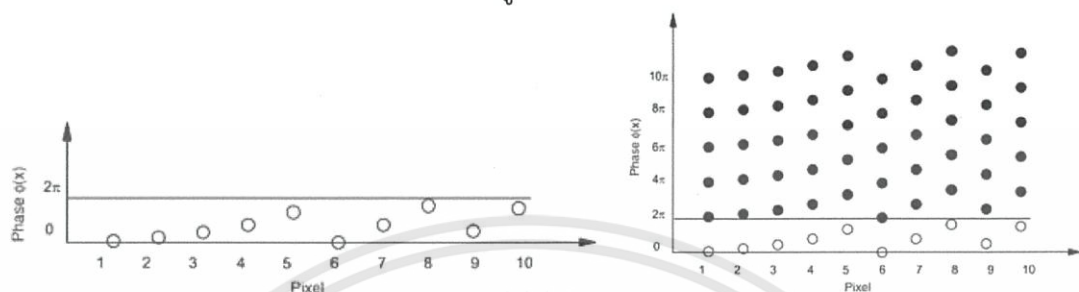
กระบวนการคืนรูปเฟส เป็น ขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการสร้างหรือประเมินหน้าคลื่น เป็นกระบวนการแปลงค่าเฟสซึ่งเป็นข้อมูลดิบและเป็นค่าที่ไม่มีความต่อเนื่อง เนื่องจากเป็นค่าเฟสมอดุโล 2π (modulo 2π phase) กระบวนการนี้จะทำให้เกิดความต่อเนื่องกันของหน้าคลื่นหรือเฟส ค่าเฟสที่มีความต่อเนื่องเกิดจากการนำค่าเฟสมอดุโล 2π มาบวกด้วยจำนวนเท่าของค่า $\pm 2\pi$ ดังสมการที่ 7 กระบวนการคืนรูปเฟสจึงเป็นการเปรียบเทียบค่าเฟสระหว่างพิกเซลภาพที่อยู่ใกล้เคียงถ้าหากค่าเฟสระหว่างพิกเซลสองพิกเซลมีความต่อเนื่อง ค่าของเฟสก็จะมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างราบเรียบ ถ้าหากค่าของเฟสไม่ต่อเนื่องหรือเกิดการกระโดดของค่าเฟส (Phase jumps) อันเนื่องมาจากการใช้ฟังก์ชันอาร์คแทน ก็จะมีกระบวนการคืนรูปเฟสเกิดขึ้นดังภาพที่ 2.44 กระบวนการคืนรูปเฟสที่แต่ละพิกเซลใน 1 มิติ แสดงดังภาพที่ 2.45



ภาพที่ 2. 44 การคืนรูปเฟส (a) เฟสซ่อนรูป (b) เฟสถอดรูป [62]

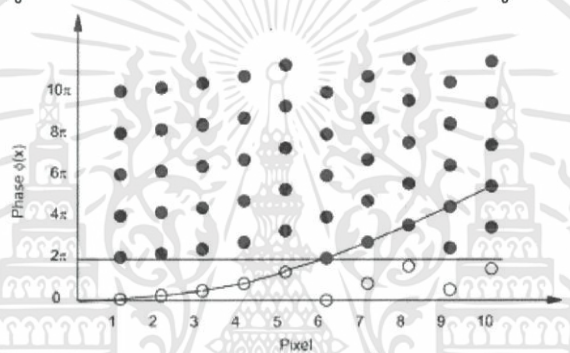
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการคืนรูปเฟสแสดงดังภาพที่ 2.45 เริ่มจากการเลือกตำแหน่งใดๆ บนหน้าคลื่น ซึ่งควร จะเลือกพิกเซลที่อยู่ใกล้กับจุดศูนย์กลางของอินเตอร์เฟอแกรมเพื่อต้องการให้เฟสระหว่างสองพิกเซล เปลี่ยนแปลงไปได้ไม่เกินค่า π ถ้าผลต่างเฟสที่คำนวณได้จากสองพิกเซลนั้นเกินกว่า π จะต้องแก้ไข โดยการบวกค่าของจำนวนเต็มเท่าของ $\pm 2\pi$ เข้าไปในการคำนวณจนกว่าค่าของพิกเซลลำดับที่สอง จะเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยผลของการคืนรูปเฟสจากของภาพที่ 2.45 จะเป็นดังภาพที่ 2.46



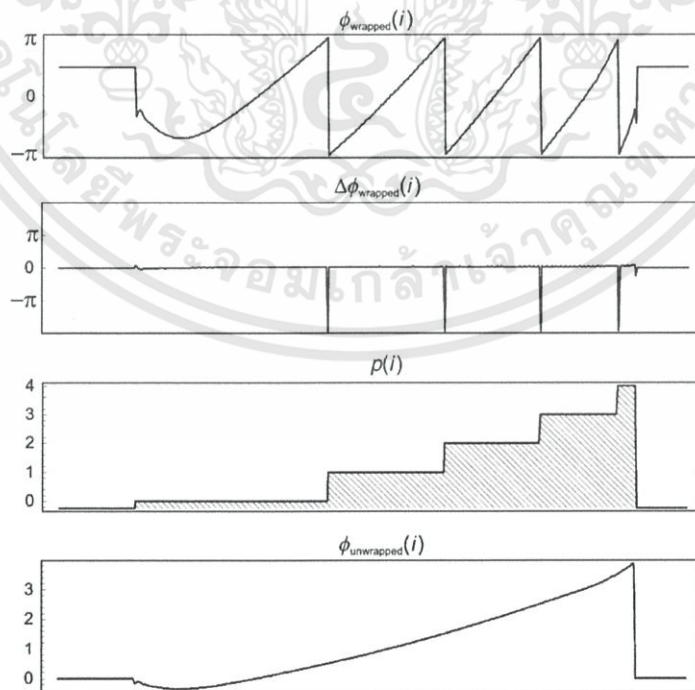
(a) ข้อมูลเฟสมอดูลุ 2π ที่แต่ละพิกเซล

(b) ข้อมูลเฟสที่เป็นไปได้ทั้งหมด

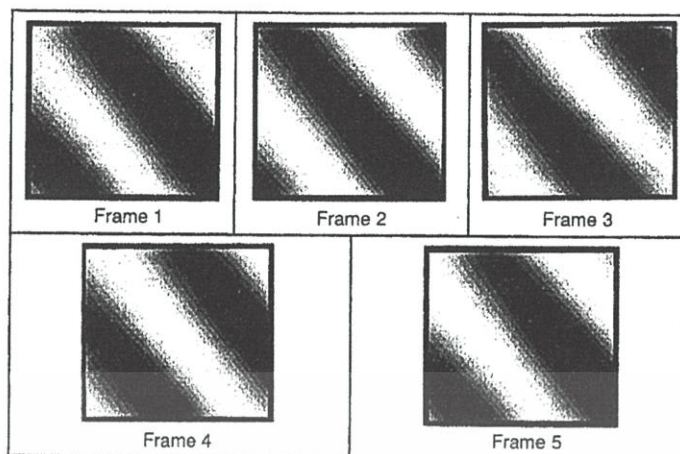


(c) ข้อมูลเฟสที่ถูกสร้างขึ้นใหม่

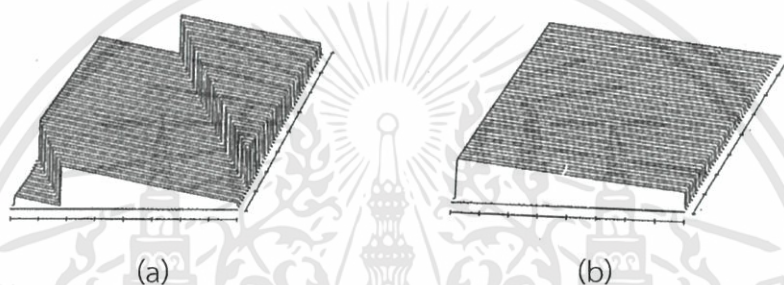
ภาพที่ 2.45 กระบวนการคืนรูปเฟสของ PSI [63]



ภาพที่ 2.46 ขั้นตอนการคืนรูปเฟสในแนวเส้นตรงของเฟสซ่อนรูปที่ได้จากภาพที่ 2.45 [63]



ภาพที่ 2. 47 อินเตอร์เฟรอม 5 เฟรม ที่เกิดจากการเลื่อนเฟสครึ่งละ $\pi/2$ หรือ 90° [64]

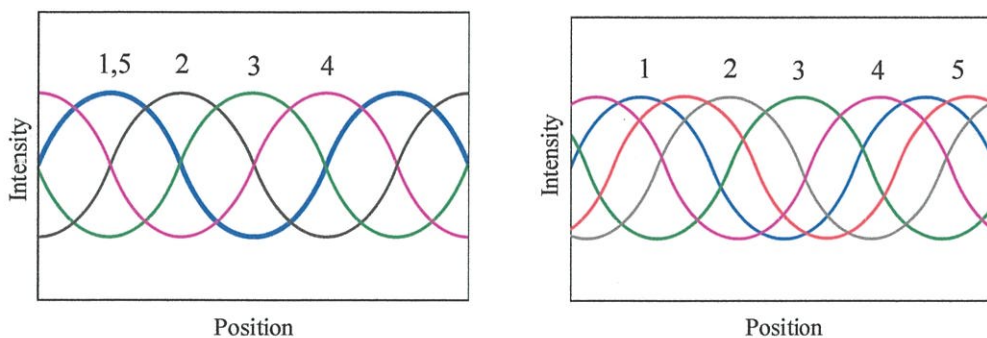


ภาพที่ 2. 48 (a) ข้อมูลเฟสมอดูล 2π (b) ข้อมูลเฟสที่ unwrapped เสร็จเรียบร้อย [64]

ภาพที่ 2. 47 เป็นตัวอย่างอินเตอร์เฟรอม 5 เฟรม ที่ถูกบันทึกไว้ เกิดจากการเลื่อนเฟส ครึ่งละ $\pi/2$ rad หรือ 90° โดยภาพแรกและภาพสุดท้ายมีลวดลายริ้วการแทรกสอดที่เหมือนกัน เนื่องจากระหว่างภาพทั้งสองเฟสเกิดจากการเลื่อนไป 2π หรือ 360° ส่วน ภาพที่ 1 และ 3 จะมีริ้วการแทรกสอดที่ตรงข้ามกัน เนื่องจากระหว่างภาพ เฟสนั้นถูกเลื่อนไป π หรือ 180° ภาพที่ 2 และ 4 กับ ภาพที่ 3 และ 5 ก็เช่นเดียวกัน เฟสซ่อนรูป ที่ถูกประเมินจากอินเตอร์เฟรอมทั้ง 5 เฟรม หลังการทำมอดูล 2π จากภาพที่ 2. 47 ด้วยอัลกอริทึมเป็นดังภาพที่ 2. 48 จากภาพที่ 2. 48 (a) เห็นได้ว่า ข้อมูลเฟสมอดูล 2π ไม่มีความต่อเนื่อง เมื่อเฟสมีค่าเกินขอบเขตของ 2π และ เมื่อคืนรูปเฟส ค่าของเฟสที่แท้จริงเป็นดังภาพที่ 2. 48 (b)

2.9.6 การสอบเทียบการเลื่อนเฟส (Phase Shift Calibration) [56, 57]

การสอบเทียบค่าเฟสที่ถูกเลื่อนนั้นถือเป็นขั้นตอนสำคัญในการตรวจหาความคลาดเคลื่อนของค่าเฟสระหว่างอินเตอร์เฟรอมแต่ละเฟรม เพื่อเป็นยืนยันประสิทธิภาพในการวัด เนื่องจากวิธีการวัดบางวิธีนั้นไวต่อความคลาดเคลื่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้เฟียโซอิเล็กทริก การเลื่อนไปของเฟสอาจไม่มีความเป็นเชิงเส้นกับระดับแรงดันที่ใช้ขับเคลื่อนผลึกเพียโซ ทำให้เฟสที่ถูกเลื่อนไปเกิดความคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ได้ตั้งไว้

(a) เฟสถูกเลื่อนไป 90° (b) เฟสถูกเลื่อนไป 97°

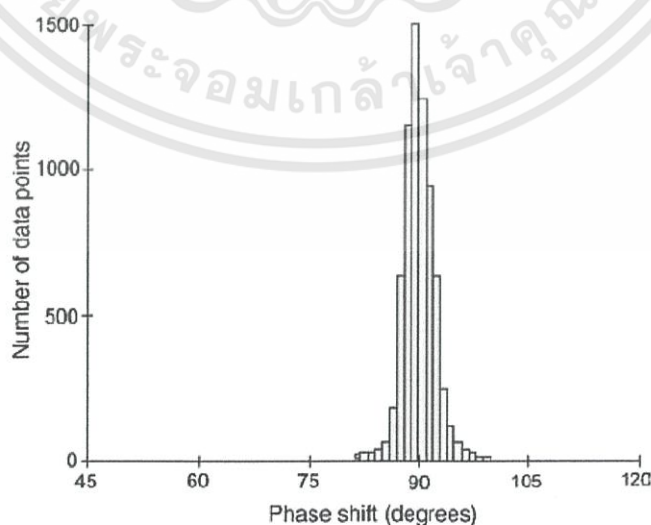
ภาพที่ 2. 49 ความเข้มแสงแนวเส้นตรงหนึ่งที่ลากผ่านภาพทั้ง 5 เฟรม เมื่อเฟสที่แท้จริงถูกเลื่อนไป 90° และ 97° [59]

จากตัวอย่างวีการแทรกสอดทั้ง 5 เฟรมในภาพที่ 2. 47 ซึ่งเฟสจะถูกเลื่อนไปครั้งละ 90° เมื่อเปรียบเทียบความเข้มแสงแนวเส้นตรงแนวหนึ่งของภาพทั้ง 5 เฟรม พบว่าเป็นดังภาพที่ 2. 49 (a) เห็นได้ว่า ที่ตำแหน่งใด ๆ ความเข้มแสงของภาพที่ 1 และ 5 มีค่าเท่ากัน และความเข้มแสงของภาพที่ 2 และ 4 มีค่าตรงข้ามกัน แสดงว่า เฟสของแต่ละฟิสิกเซลนั้นถูกเลื่อนไป 90° แต่ถ้าเฟสในแต่ละฟิสิกเซลไม่ได้ถูกเลื่อนไป 90° แต่เลื่อนไป 97° ความเข้มแสงแต่ละเฟรมเป็นดังภาพที่ 2. 479 (b)

สำหรับกรณีที่มีการบันทึกอินเตอร์เฟอแกรม 5 เฟรม และ ทำการเลื่อนเฟสครั้งละ 90° ค่าของเฟสที่ถูกเลื่อนไปอย่างแท้จริงสามารถคำนวณได้จาก

$$\alpha(x, y) = \cos^{-1} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{I_5 - I_1}{I_4 - I_2} \right) \right] \quad (2.77)$$

ข้อมูลจากการคำนวณค่าเฟสที่ถูกเลื่อนไปนั้นของทุกฟิสิกเซลจะแสดงเป็นแผนภาพฮิสโตแกรม (Histogram) ดังตัวอย่างภาพที่ 2. 50 จากรูปแสดงให้เห็นว่าข้อมูลส่วนใหญ่กระจายอยู่ที่ 90° หมายถึง ส่วนมากแล้วฟิสิกเซลบนภาพแต่ละเฟรมที่อยู่ติดกัน ถูกเลื่อนไปด้วยค่าเฟส 90° มีเพียงบางฟิสิกเซลของภาพที่เฟสนั้นถูกเลื่อนไปด้วยค่าน้อยกว่า หรือ มากกว่า 90°

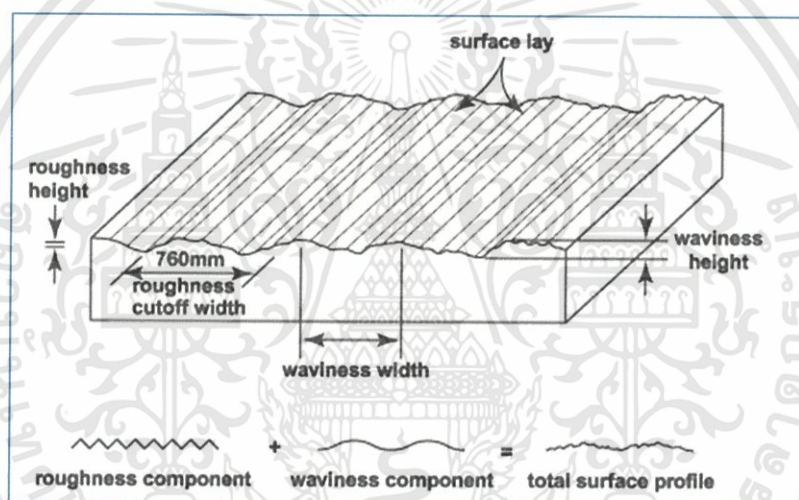


ภาพที่ 2. 50 แผนภาพฮิสโตแกรมการกระจายข้อมูลของเฟสที่ถูกเลื่อนไป [65]

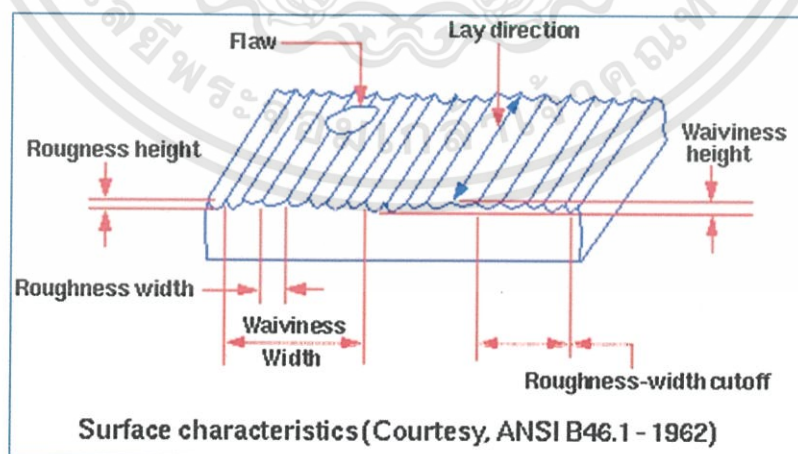
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 การวิเคราะห์ความหยาบผิว (Analysis of Surface Roughness) [66-69]

สำหรับพื้นผิวของวัสดุที่มี ร่อง หลุม รอยนูน หรือ เป็นคลื่น ปรากฏอยู่บนพื้นผิว เรียกได้ว่าพื้นผิวดังกล่าวนั้นเกิดความผิดเพี้ยนไปของพื้นผิวที่มีความเรียบอย่างสมบูรณ์ ลักษณะ ร่อง หลุม หรือ รอยนูน ที่มีรูปร่าง ขนาด และ ลักษณะการจัดเรียงตัว ที่แตกต่างกัน ทำให้พื้นผิวนั้นมีสภาพพื้นผิวหรือความหยาบละเอียด (Surface texture) ที่ต่างกันออกไป ลักษณะของความหยาบละเอียดบนพื้นผิวถูกกำหนดจาก ความสูง (height) ความลึก (depth) และ ระยะห่าง (interval) ระหว่างร่องหรือรอยนูนซึ่งเปรียบเทียบหรืออ้างอิงจากพื้นผิวหรือระนาบปกติ (Nominal surface) องค์ประกอบหรือลักษณะของความหยาบละเอียดของพื้นผิว แบ่งออกได้เป็น 4 แบบด้วยกัน คือ ความขรุขระระดับนาโนและไมโคร (nono- and microroughness) ความเป็นลอน (Waviness) ซึ่งเป็นความขรุขระระดับมาโคร ร่อง (Lay) และ รอยตำหนิ (Flaws) ลักษณะของความหยาบละเอียดบนพื้นผิวในแบบต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 2.51 (a) และ (b) ตัวอย่างของลักษณะของพื้นผิวที่มีความขรุขระกับความเป็นลอนอยู่บนพื้นผิวเป็นดังภาพที่ 2.52 และแสดงความหยาบผิวด้วยข้อมูล 2 มิติ



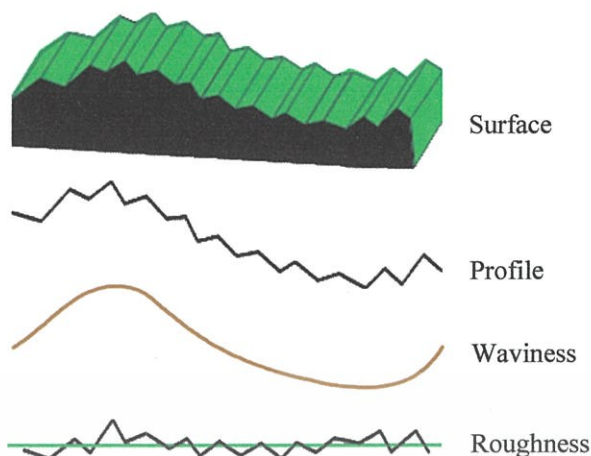
(a)



Surface characteristics (Courtesy, ANSI B46.1 - 1962)

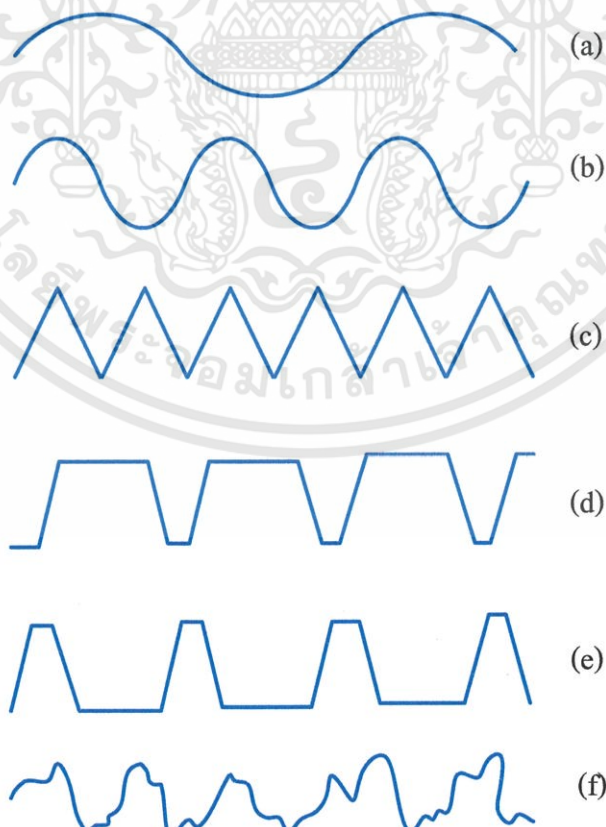
(b)

ภาพที่ 2.51 องค์ประกอบของความหยาบละเอียดพื้นผิว [70]



ภาพที่ 2. 52 ตัวอย่างค่าโครงสร้างพื้นผิว 3 มิติ ที่มีเพียงความขรุขระและความเป็นลอนบน พื้นผิวพร้อมทั้งแสดงค่าโครงสร้าง 2 มิติ [71]

จากภาพที่ 2.52 เห็นได้ว่า ถ้าพื้นผิวมีลักษณะของความหยาบผิวที่ซับซ้อนและยุ่งยากจะส่งผลทำให้การระบุหรือแสดงค่าโครงสร้างด้วยข้อมูลเพียง 2 มิติ ไม่มีเพียงพอที่สามารถชี้ชัดได้ว่า ค่าโครงสร้างของพื้นผิวที่แท้จริงนั้นเป็นอย่างไร ตัวอย่างเช่น พื้นผิวที่มีค่าโครงสร้าง 2 มิติที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 2.53 ถึงแม้ว่าพื้นผิวจะมีค่าโครงสร้าง 2 มิติ ที่แตกต่างกัน แต่พบว่า มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย R_a ที่เท่ากัน โดย ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย R_a เป็น พารามิเตอร์หนึ่งที่ยอมรับใช้ในการระบุค่าความหยาบผิว ดังนั้น การวัดและแสดงลักษณะพื้นผิวใน 3 มิติ จึงเป็นวิธีการที่ทำให้ทราบถึงค่าโครงสร้างของพื้นผิวที่แท้จริงได้



ภาพที่ 2. 53 ค่าโครงสร้าง 2 มิติของพื้นผิวที่แตกต่างกันแต่มีค่า R_a เท่ากัน [72]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้พารามิเตอร์ของความหยาบผิวสื่อถึงค่าโครงสร้างพื้นผิวได้อย่างถูกต้องมากขึ้น ในปัจจุบัน จึงได้มีการระบุพารามิเตอร์และกำหนดนิยามแสดงความหยาบของพื้นผิวไว้ด้วยกับ 2 แบบ คือ พารามิเตอร์เชิงแอมพลิจูด (Amplitude Parameters) และ พารามิเตอร์เชิงระยะห่าง (Spatial Parameters)

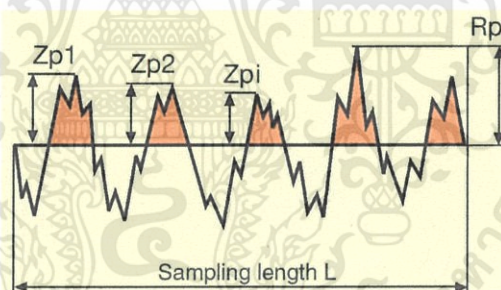
2.10.1 พารามิเตอร์เชิงแอมพลิจูด

พารามิเตอร์เชิงแอมพลิจูด เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงค่าความหยาบผิวหรือความขรุขระพื้นผิว จะอ้างอิงจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของพื้นผิวที่เปรียบเทียบกับระนาบอ้างอิง พารามิเตอร์เชิงแอมพลิจูดยังสามารถแยกออกได้เป็นอีก 2 ชนิด คือ พารามิเตอร์แบบการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย เป็นการบ่งบอกระดับความหยาบโดยรวมแต่ไม่สามารถรู้ลักษณะความคลาด เคลื่อนสูงต่ำของความหยาบของพื้นผิวได้ และ พารามิเตอร์แบบการวัดค่าความหยาบผิวจากการวัดหาสูงต่ำของขนาดความหยาบผิว (Peak to Valley) ทำให้สามารถบ่งบอกระดับความหยาบได้อย่างชัดเจนกว่าแบบเฉลี่ย

2.10.1.1) พารามิเตอร์เชิงแอมพลิจูดแบบจุดสูงสุดและต่ำสุด (Amplitude parameters – Peaks and valleys)

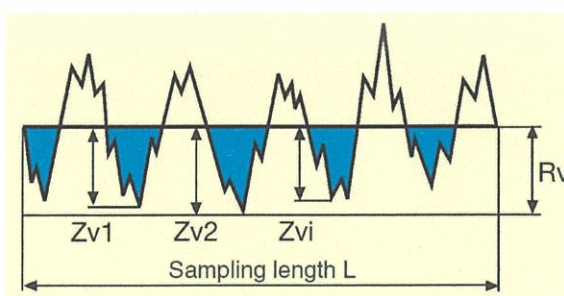
- 1) ความหยาบผิวแบบจุดสูงสุด (Roughness Peak : Rp) Rp เป็นความสูงของพีคที่สูงที่สุดที่ปรากฏอยู่บนพื้นผิว ดังภาพที่ 2.54 พารามิเตอร์นี้มีความสัมพันธ์กับความต้านทานทางไฟฟ้า และ แรงเสียดทาน ของพื้นผิว โดย

$$R_p = \max(Z(x))$$



ภาพที่ 2. 54 ความหยาบผิวยอดสูงสุด [68]

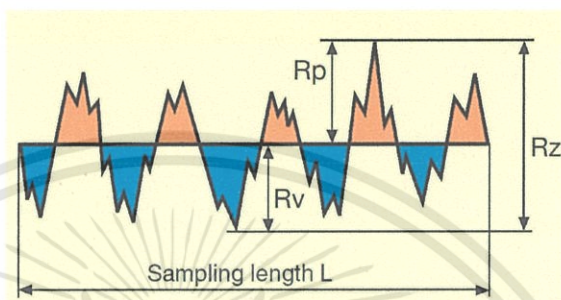
- 2) ความหยาบผิวแบบจุดต่ำสุด (Roughness Valley : Rv) Rv เป็นความสูงของพีคที่ต่ำสุดที่ปรากฏอยู่บนพื้นผิว ดังภาพที่ 2.55 พารามิเตอร์นี้สัมพันธ์กับความคงทน และความทนต่อการกัดกร่อนของพื้นผิว



ภาพที่ 2. 55 ความหยาบผิวจุดต่ำสุด [68]

- 3) ความหยาบผิวสูงสุด (Maximum height of the roughness profile, RZ) ตามมาตรฐาน ISO4287'84 $Rz=Ry$ ค่านี้เป็นผลรวมของความสูงที่สุดที่ยอดกับค่าความลึกที่สุดของหลุมในช่วงระยะที่วัด l ดังภาพที่ 2.56 พารามิเตอร์นี้ใช้มีความสัมพันธ์กับสมบัติหลายอย่างของพื้นผิว เช่น ความมันวาว ความต้านทานทางไฟฟ้า และ แรงเสียดทาน โดย

$$Rz = Rp + Rv$$

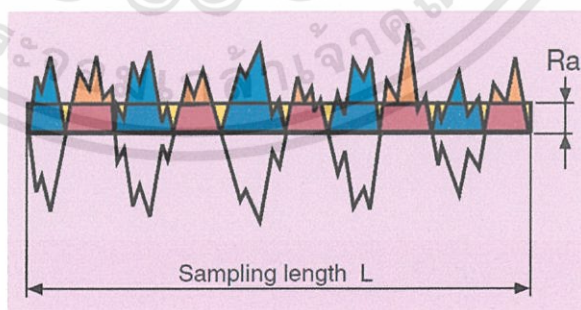


ภาพที่ 2.56 ความหยาบผิวจุดสูงสุด-ต่ำสุด [68]

2.10.1.2) พารามิเตอร์เชิงแอมพลิจูดแบบเฉลี่ย (Amplitude parameters – average of ordinates)

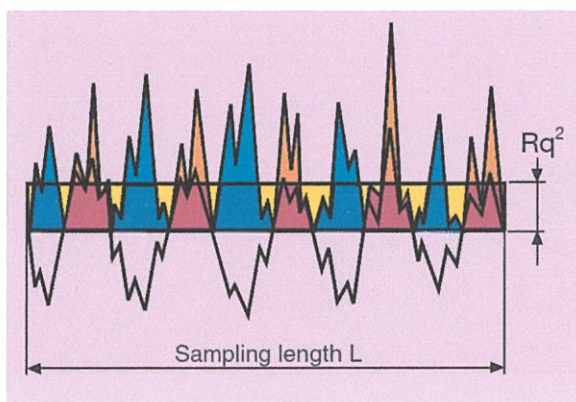
- 1) ความหยาบผิวเฉลี่ย (Roughness average: R_a) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวด้วยค่าเฉลี่ยของค่าความหยาบที่แต่ละตำแหน่ง $Z(x)$ ในช่วงความยาว l ของผิวที่วัด R_a เป็นค่าที่นิยมใช้กันมากที่สุด เหมาะสำหรับพื้นผิวที่มีความหยาบผิวกระจายตัวแบบสุ่ม (Random type surfaces) ความหยาบผิวเฉลี่ยหาได้จากการรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลางกับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลาง ทหารด้วยความยาวเฉลี่ย (l) ดังภาพที่ 2.57 เป็นไปตามสมการ

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx$$



ภาพที่ 2.57 ความหยาบผิวเฉลี่ย [68]

- 2) ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (Roughness root mean square : R_q หรือ R_{rms}) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวด้วยรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของผิวที่วัด ดังภาพที่ 2.58 เป็นไปตามสมการ



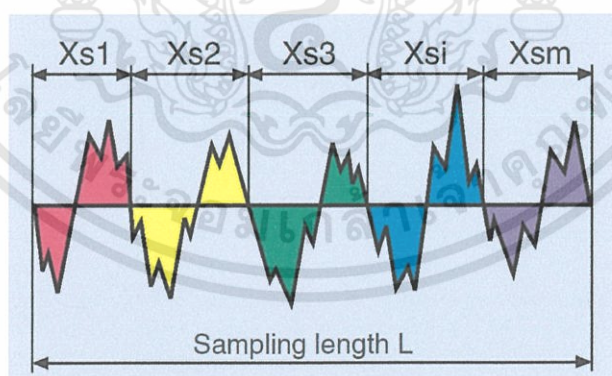
ภาพที่ 2. 58 ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง [68]

ถึงแม้ว่า พารามิเตอร์เชิงแอมพลิจูดจะมีหลายค่าด้วยกันก็ตาม แต่ก็ยังไม่เพียงพอที่จะระบุความหยาบผิวหรือเค้าโครงร่างของพื้นผิวได้อย่างถูกต้องและสมบูรณ์ ตัวอย่างเช่น พื้นผิวที่มีเค้าโครงร่างที่แตกต่างกัน 6 ลักษณะดังภาพที่ 2.53 พื้นผิวเหล่านี้มีรูปร่างของคลื่นและระยะของยอดและหลุมที่แตกต่างกัน แต่พบว่า พื้นผิวเหล่านี้มีค่าความหยาบผิว R_a และ R_q ที่เท่ากัน การระบุเค้าโครงร่างของพื้นผิวให้ชัดเจนจึงจำเป็นต้องใช้พารามิเตอร์เชิงระยะทางควบคู่กันไปด้วย

2.10.2 พารามิเตอร์เชิงระยะทาง

พารามิเตอร์เชิงระยะทางแสดงถึงความกว้างของเค้าโครงของยอดและหลุมแต่ละอันในช่วงระยะที่วัดดังภาพที่ 2.59 มีชื่อเรียกว่า ความกว้างเฉลี่ยของเค้าโครงความหยาบผิว (Mean width of the roughness profile elements, RSm) สำหรับ ISO4287'84 $RSm = S_m$ โดย

$$RSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{si}$$



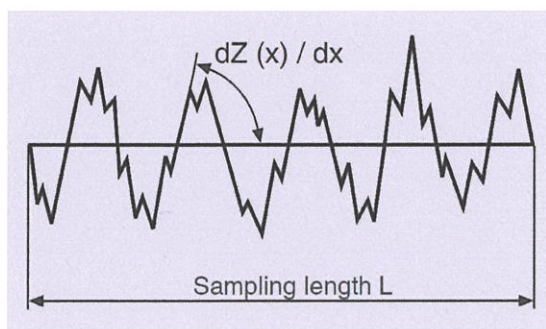
ภาพที่ 2. 59 ความกว้างเฉลี่ยของเค้าโครงความหยาบผิว [68]

2.10.3 พารามิเตอร์เชิงไฮบริด

พารามิเตอร์เชิงไฮบริดเป็นค่าเฉลี่ยกำลังสองของความชันของยอดดังภาพที่ 2.60 โดย

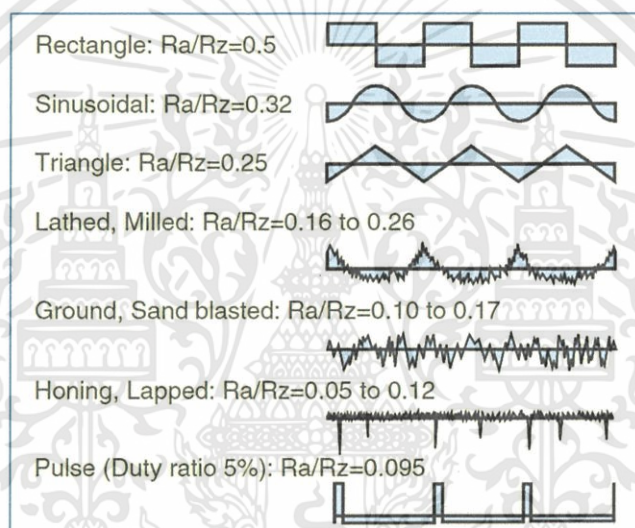
$$R\Delta q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L \left(\frac{d}{dx} Z(x) \right)^2 dx}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2. 60 พารามิเตอร์ไฮบริด [68]

ถึงแม้ค่าความหยาบผิวค่าใดค่าหนึ่งนั้นไม่สามารถบ่งบอกโครงสร้างที่แท้จริงของพื้นผิวได้ แต่ถ้าพิจารณาอัตราส่วนระหว่าง R_a กับ R_z (R_a/R_z) จะพบว่า พื้นผิวที่มีค่าโครงสร้างที่แตกต่างกัน จะมีค่า R_a/R_z ที่แตกต่างกันดังภาพที่ 2.61



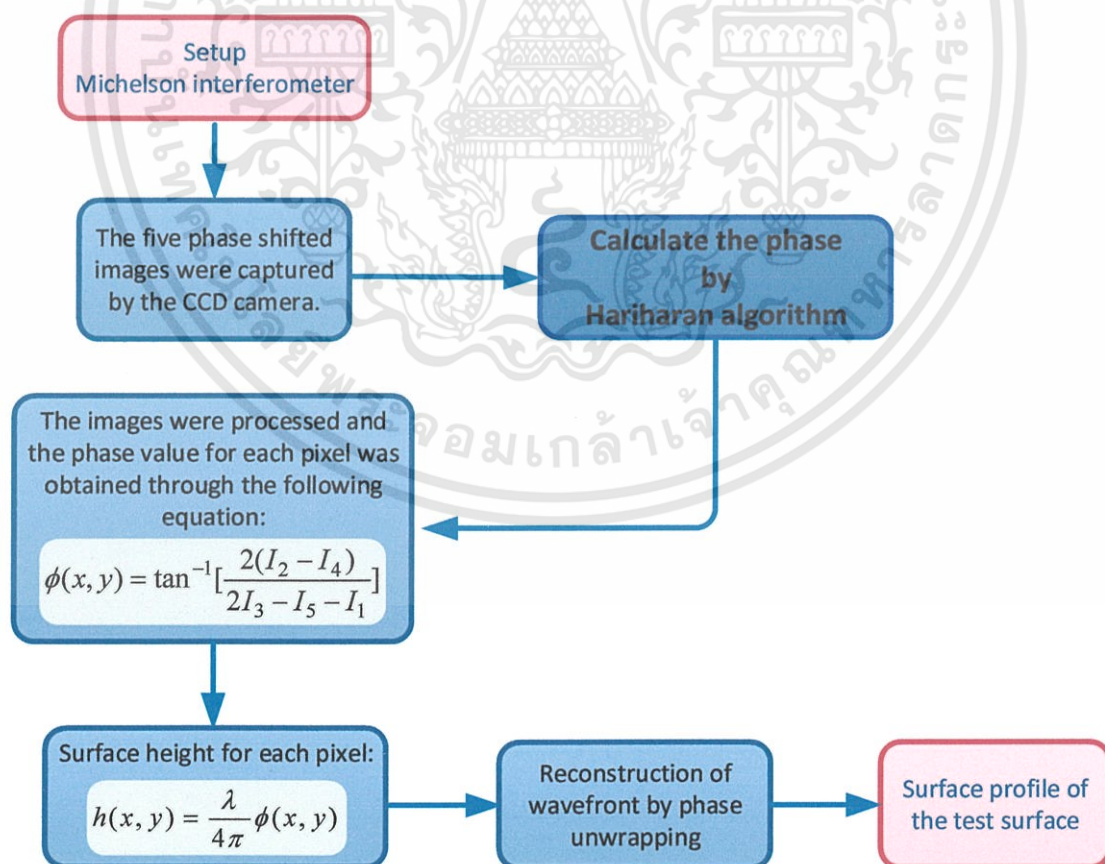
ภาพที่ 2. 61 ค่าโครงสร้างของพื้นผิวที่ได้จากการตีความจากความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์เชิงแอมพลิจูด [68]

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยเพื่อพัฒนาชุดเครื่องมือวัดความเรียบพื้นผิวที่มีความเรียบพื้นผิวสูงด้วยเทคนิคการแทรกสอดทางแสงพร้อมโปรแกรมประเมินความเรียบหรือเค้าโครงร่างพื้นผิวจากรีการแทรกสอด ได้แบ่งดำเนินงานออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ ด้วยกัน คือ ส่วนแรกเป็นการจัดเตรียมและติดตั้งระบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์พร้อมชุดขับเคลื่อนพื้นผิวอ้างอิงด้วยผลึกเพียโซอิเล็กทริก และส่วนที่สองเป็นการพัฒนาโปรแกรมประเมินความเรียบซึ่งระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์แบบ Hariharan

ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เป็นอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ถูกเลือกใช้ในงานวิจัยนี้ โดยใช้ลำแสงขนานของแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนเป็นโพรบในการตรวจวัดพื้นผิว พื้นผิวอ้างอิงจะถูกควบคุมระยะทางด้วยชุดขับเคลื่อนเพียโซ ขั้นตอนการดำเนินงานทั้งหมดแสดงดังไดอะแกรมภาพที่ 3.1 อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์พร้อมชุดขับเคลื่อนเพียโซจะถูกจัดเตรียมขึ้น หลังจากนั้นรีการแทรกสอดหรืออินเตอร์เฟอแกรมจะถูกบันทึกที่ตำแหน่งค่าความต่างเฟสต่าง ๆ กัน 5 ตำแหน่ง คือ $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ และ 2π rad อินเตอร์เฟอแกรมจะถูกบันทึกด้วยกล้อง CCD หลังจากนั้น ความเข้มแสงที่ตำแหน่งพิกเซลเดียวกันของอินเตอร์เฟอแกรมทั้ง 5 เฟรม จะถูกนำไปใช้เพื่อคำนวณหาค่าเฟสของพื้นผิวที่แต่ละพิกเซล ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความสูงต่ำของพื้นผิวที่เทียบจากระดับพื้นผิวอ้างอิง ซึ่งท้ายสุดแล้วจะทำให้ได้เค้าโครงร่าง 3 มิติของพื้นผิว

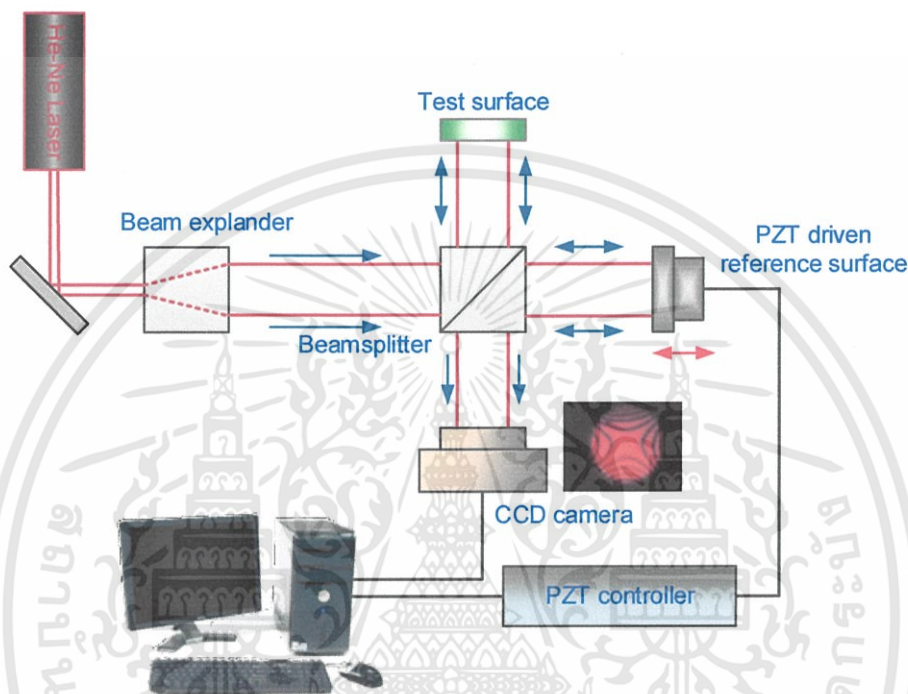


ภาพที่ 3.1 ผังการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน (He-Ne Laser) กระจกสะท้อนแสง 45° ชุดขยายลำแสง ตัวแยกลำแสงชนิด 50:50 พื้นผิวทดสอบ กระจกอ้างอิงความเรียบสูงติดตั้งอยู่บนชุดขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริก และ กล้อง CCD ที่ทำหน้าที่ในการบันทึกภาพอินเตอร์เฟอแกรม ดังไดอะแกรมภาพที่ 3. 2 ระบบทั้งหมดถูกติดตั้งบนโต๊ะทางแสง (Optical Table) ที่มีระบบป้องกันการสั่นสะเทือน

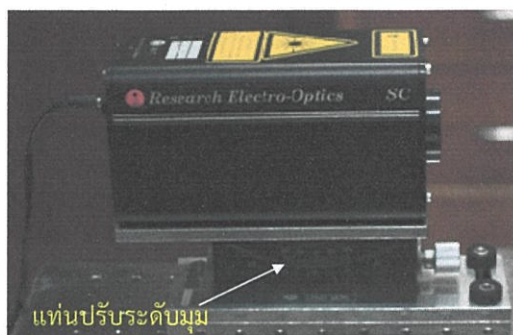


ภาพที่ 3. 2 ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์พร้อมชุดขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริก

แสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดจะตกกระทบบนกระจกสะท้อนแสงด้วยมุมตกกระทบ 45° หลังจากนั้นแสงเคลื่อนเข้าสู่ตัวขยายลำแสง ลำแสงถูกขยายขนาดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm และ เป็นลำแสงขนาน ด้วยชุดขยายลำแสง ก่อนที่จะเคลื่อนที่เข้าสู่ตัวแยกแสง (Beam splitter) ลำแสงถูกแยกออกเป็น 2 ลำ แต่ละลำมีความเข้มเท่ากันและเคลื่อนที่ที่ตั้งฉากกัน ลำหนึ่งเคลื่อนไปสู่พื้นผิวอ้างอิงที่เป็น Optical flat ที่มีความเรียบ $\lambda/20$ ซึ่งถูกติดตั้งอยู่บนชุดขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริก (PZT driven) ส่วนลำแสงอีกลำหนึ่งเคลื่อนที่ไปสู่พื้นผิวทดสอบ (Surface Under Test) ซึ่งสามารถสะท้อนแสงได้ดี จากนั้นแสงทั้งสองลำจะสะท้อนกระจกกลับเข้าสู่ตัวแยกแสงอีกครั้ง และไปรวมกันบนฉากรับภาพจนเกิดริ้วการแทรกสอด ริ้วการแทรกสอดหรืออินเตอร์เฟอแกรม 5 เฟรมที่แต่ละเฟรมเกิดจากค่าความต่างเฟสที่ค่าต่าง ๆ ซึ่งจะถูกบันทึกไว้ด้วยกล้อง CCD รายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละชิ้นที่ใช้กับอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์และขั้นตอนการจัดลำแสงมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน

ลำแสงที่ใช้เป็นโพรบตรวจวัด เป็นแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ความยาวคลื่น 632.8 nm กำลังงาน 0.5 mW ของบริษัท Research Electro-Optics ซึ่งติดตั้งอยู่แทนปรับระดับมุม ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม - นีออน

3.1.2 กระจกสะท้อนแสง 45°

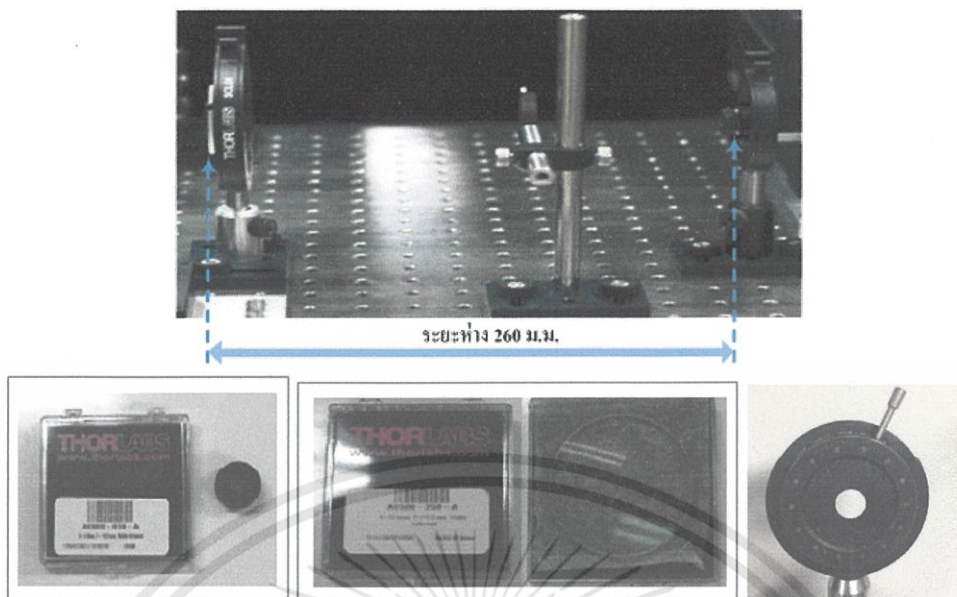
กระจกสะท้อนแสงทำหน้าที่สะท้อนแสงเข้าสู่ตัวขยายแสง ติดตั้งไว้ที่ด้านหน้าของแหล่งกำเนิดเลเซอร์เพื่อเป็นลดขนาดของพื้นที่การทำงาน กระจกนี้จะสะท้อนแสงเฉพาะในช่วงความยาวคลื่นสีแดง แสงที่มากกระทบบนกระจกจะถูกสะท้อนไปในแนว 90° เมื่อเทียบกับแสงตกกระทบ ดังภาพที่ 3.4



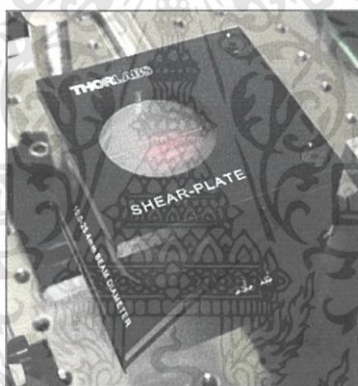
ภาพที่ 3.4 กระจกสะท้อนแสง 45°

3.1.3 ตัวขยายลำแสง

ตัวขยายลำแสงทำหน้าที่ในการขยายขนาดของลำแสงและทำให้ลำแสงเป็นลำขนาน ประกอบด้วยเลนส์นูน 2 ชั้นที่มีความยาวโฟกัส 10 และ 250 mm ของบริษัท THORLABS วางห่างกัน 26 mm ดังภาพที่ 3.5 ลำแสงที่ถูกขยายมีขนาด $\varnothing 20$ mm ระหว่างเลนส์ทั้งสองได้ทำการวางไอริส (Iris Diaphragm) เพื่อกำหนดขนาดของลำแสงที่ผ่านออกมาจากเลนส์ตัวแรกซึ่งมีระยะโฟกัสเพียง 10 mm โดยความขนานของลำแสงจะถูกตรวจวัดด้วย Shearing Interferometer ดังภาพที่



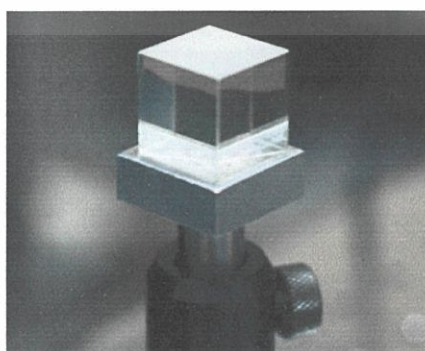
ภาพที่ 3.5 ตัวขยายลำแสง ประกอบด้วย เลนส์นูน 2 ชิ้น ขนาด 10 mm และ 250 mm วางห่างกัน 260 mm พร้อมด้วยไอริสวางอยู่ระหว่างเลนส์ทั้งสอง



ภาพที่ 3.6 Thorlabs- SI500 Shearing Interferometer, 25.4-50 mm Beam Diameter Shearplate

3.1.4 ตัวแยกแสง

ตัวแยกลำแสงทำหน้าที่แยกลำแสงออกเป็นสองลำแต่แต่ละลำมีความเข้มเท่ากัน ตัวแยกแสงที่ใช้เป็นของบริษัท Thorlab รุ่น BS016 (50:50 Non-polarizing and 400-700 nm Broadband Beam Splitter Cube, 20 mm)

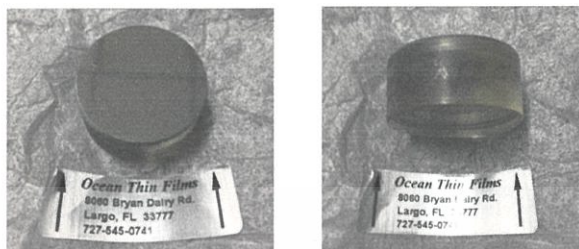


ภาพที่ 3.7 Thorlab BS016 Beamsplitter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 พื้นผิวอ้างอิงความเรียบสูง

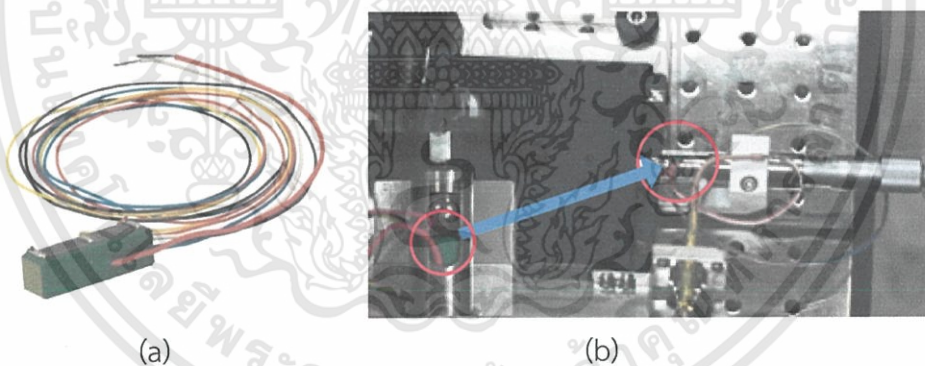
พื้นผิวอ้างอิงที่ใช้ในที่นี้เป็น Optical flat (Optical flat) ของ Ocean Thin Films ความเรียบสูง $\lambda/20$ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.6 มิลลิเมตรดังภาพที่ 3. 8



ภาพที่ 3. 8 Ocean Thin Films Optical flat ความเรียบ $\lambda/20$

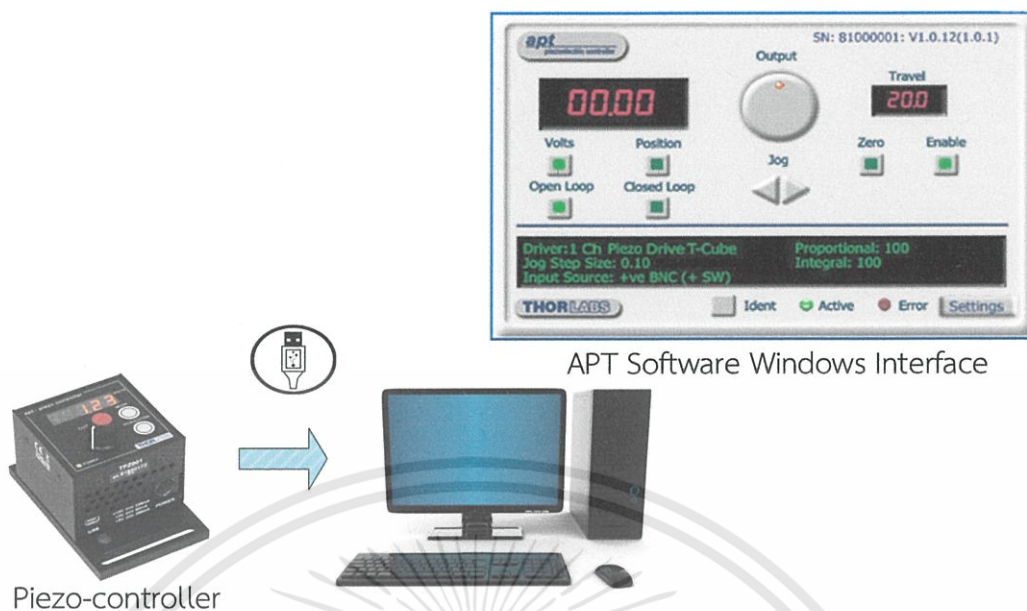
3.1.6 ชุดขับเคลื่อนพื้นผิวอ้างอิง

พื้นผิวอ้างอิงจะถูกติดตั้งอยู่บนแท่นเลื่อนและถูกควบคุมตำแหน่งด้วยชุดขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริก โดยใช้ Piezo-electric actuator ของบริษัท Thorlab รุ่น PZS001 Bare Piezo Stacks มีลักษณะรูปร่างดังภาพที่ 3. 9 (a) Piezo-electric actuator จะถูกประกอบเข้าไว้ภายในในท่อกวางท่อหนึ่งที่สามารถยึดติดเข้ากับไมโครมิเตอร์ได้ ดังภาพที่ 3. 9 (b) เมื่อป้อนแรงดันให้กับ Piezo-electric actuator จะทำให้ actuator เกิดการปรับเปลี่ยนรูปร่างด้วยการยืดตัวออก มีผลทำให้แท่นเลื่อนเกิดการเปลี่ยนระยะได้ โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้า 150 V จะทำให้ actuator ยืดออกเป็นระยะ $17.4 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$



ภาพที่ 3. 9 (a) Piezo-electric actuator และ (b) แท่นเลื่อนพร้อมไมโครมิเตอร์ที่มี Piezo-electric actuator ติดตั้งไว้ภายใน

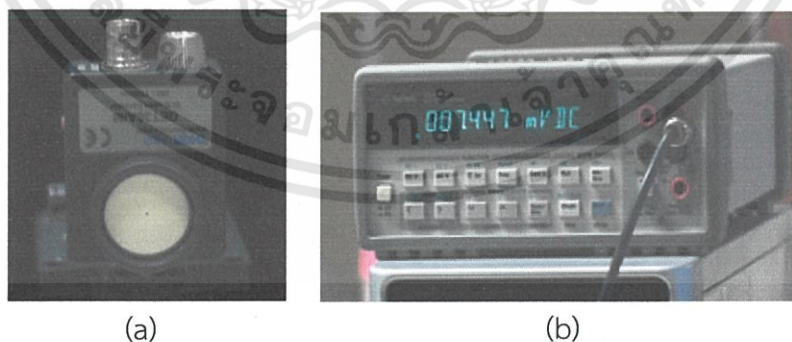
แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับ actuator จะถูกป้อนผ่านทาง APT controller ด้วยสิ่งผ่านทางคอมพิวเตอร์ หน้าต่างติดต่อผู้ใช้งานแสดงดังภาพที่ 3. 10 เนื่องจากการควบคุมตำแหน่งของพื้นผิวอ้างอิงหรือความต่างเฟสระหว่างพื้นผิวอ้างอิงกับพื้นผิวทดสอบถูกควบคุมด้วย Piezo-electric actuator เป็นแบบ Open Loop Control จึงทำให้ ระยะทางที่ Piezo-electric actuator ยืดออกนั้นไม่มีความเป็นเชิงเส้นกับแรงดันไฟฟ้า รวมทั้งยังเกิด hysteresis effect จึงจำเป็นต้องศึกษาถึงการตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้าที่มีผลต่อการยืด-หด ตัวของ Piezo-electric actuator



Piezo-controller

ภาพที่ 3. 10 ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้าของ Piezo-electric actuator และ หน้าต่างเชื่อมต่อผู้ใช้งาน

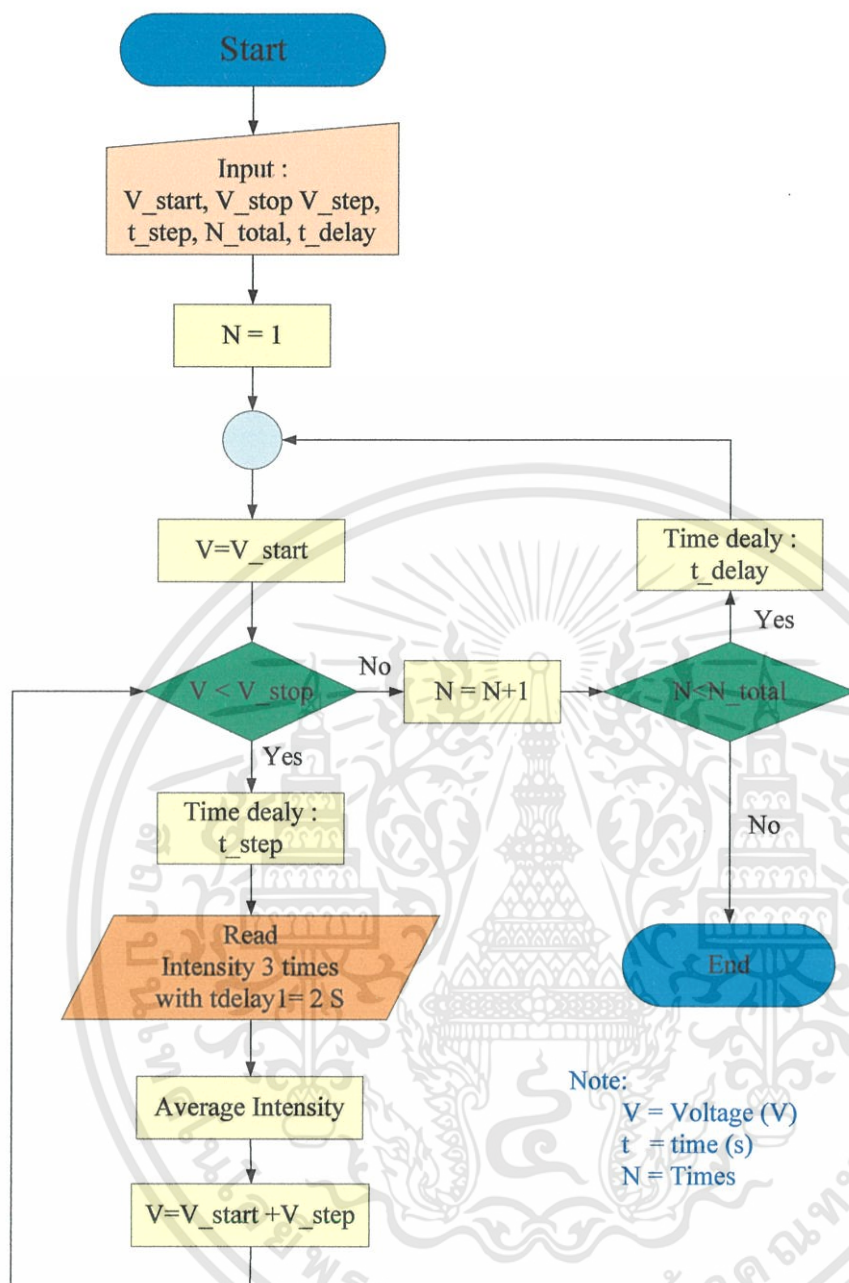
การศึกษาและวัดการตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้าของ Piezo-electric actuator ทำโดยการติดตั้งตัวตรวจวัดความเข้มแสง (Light Photodetector) ของบริษัท Thorlab รุ่น DET36A/M แทนที่ CCD Camera ดังไดอะแกรมภาพที่ 3. 2 ด้านหน้าของตัวตรวจวัดความเข้มแสงติดตั้งรูเปิดขนาดประมาณ 0.5 mm ดังภาพที่ 3. 11 (a) เอ้าท์พุทของตัวตรวจวัดความเข้มแสงมีค่าเป็นแรงดันทางไฟฟ้าซึ่งมีค่าแปรผันตรงกับความเข้มแสงและจะถูกวัดด้วยมัลติมิเตอร์ ซึ่งเป็นของบริษัท Agilent Technologies รุ่น 34401A ดังภาพที่ 3. 11 (b) แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ Piezo-electric actuator จะถูกป้อนโดย Programmable Supply ด้วยค่าตั้งแต่ 0 – 10 V ซึ่งจะเกิดแรงดันไฟฟ้าที่ Piezo-electric actuator 0 – 150 V ซึ่งจะถูควบคุมด้วยชุดคำสั่งที่เขียนเพิ่มเติมให้กับ APT Software ซึ่งมีผังการทำงานดังไดอะแกรม



(a)

(b)

ภาพที่ 3. 11 (a) ตัวตรวจวัดความเข้มแสง และ (b) ดิจิตอลมัลติมิเตอร์



ภาพที่ 3. 12 ฟังก์ชันการทำงานของชุดคำสั่งควบคุมการทำงานสำหรับการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับ Piezo-electric actuator

ชุดคำสั่งนี้เริ่มต้นทำงานโดยต้องกำหนดค่าแรงดันเริ่มต้น (V_{start}) แรงที่เพิ่มขึ้นในแต่ละครั้ง (V_{step}) แรงดันสุดท้าย (V_{stop}) ให้แก่ Piezo-electric actuator ระยะเวลาระหว่างการจ่ายแรงดันในแต่ละครั้ง (t_{step}) เวลาหน่วงเวลาเมื่อครบรอบการทำงานแต่ละรอบ (t_{delay}) และจำนวนรอบการทำงาน (N) ในแต่ละรอบการทำงานที่แต่ละค่าของแรงดันไฟฟ้า ความเข้มแสงจะถูกบันทึกด้วยกัน 3 ครั้ง แต่ละครั้งจะถูกบันทึกที่ระยะเวลาห่างกัน 2 วินาที แล้วจึงนำค่าความเข้มแสงมาหาค่าเฉลี่ย

3.1.7 พื้นผิวทดสอบ

พื้นผิวที่นำมาทำการวัดมีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะ คือ พื้นผิวทดสอบที่ทราบค่าความเรียบ และพื้นผิวที่ไม่ทราบค่าโครงสร้างของพื้นผิว เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของระบบการวัดความเรียบและโปรแกรมวิเคราะห์ พื้นผิวทดสอบที่ทราบค่าความเรียบจะถูกนำมาใช้ทดสอบด้วยกัน 2 ชั้น มีค่าความเรียบ $\lambda/10$ และ $\lambda/4$ ซึ่งเป็นของบริษัท Ocean Thin Films สำหรับพื้นผิวที่ไม่ทราบค่าความเรียบและค่าโครงสร้างของพื้นผิวนั้นเป็นแผ่นแก้วสไลด์ (Microscope Slide) 2 ชั้น ซึ่งแต่ละชั้นมาจากแหล่งผลิตที่แตกต่างกัน แผ่นแก้วสไลด์ทั้งสองนี้โดยส่วนมากนิยมนำมาใช้เป็นฐานรองรับในการปลูกฟิล์มบาง

เนื่องจากแผ่นแก้วสไลด์มีความสามารถในการสะท้อนแสงต่ำมาก จึงต้องมีการจัดเตรียมแผ่นแก้วด้วยการเคลือบฟิล์มบางของอลูมิเนียม โดยระบบที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางนั้นเป็นระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่ได้จัดสร้างขึ้นภายในห้องปฏิบัติการวิจัยเลเซอร์และฟิสิกส์เชิงพื้นผิว ที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. เงื่อนไขในการเคลือบฟิล์มเป็นดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3. 1 สภาวะของระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงสำหรับเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม

Target	Al (99.99%)	
Substrate	Microscope Slide A and B	
Target to substrate distance	80	mm
Base pressure	3.0×10^{-6}	mbar
Working pressure	4.6×10^{-3}	mbar
Argon mass flow rate	25	sccm
RF Power	200	W
Deposition time	15	min

3.1.8 กล้อง CCD

อินเตอร์เฟอแกรมจะถูกบันทึกภาพด้วยกันจำนวน 5 เฟรม ที่ตำแหน่งเฟส $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ และ 2π rad ภาพจะถูกบันทึกด้วยกล้องถ่ายภาพรุ่น Canon EOS 450D ด้วยความเร็วชัตเตอร์ 1/20 วินาที ค่า ISO100 จุดโฟกัส 8.0 และ ตั้งเวลาการกดชัตเตอร์ 2 วินาที แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมจะถูกป้อนให้กับ Piezo-electric actuator เพื่อให้เกิดการเลื่อนเฟสครั้งละ $\pi/2$ rad ภาพอินเตอร์เฟอแกรมจะถูกบันทึกทุกครั้งที่ทำกรเลื่อนเฟสแต่ละครั้ง

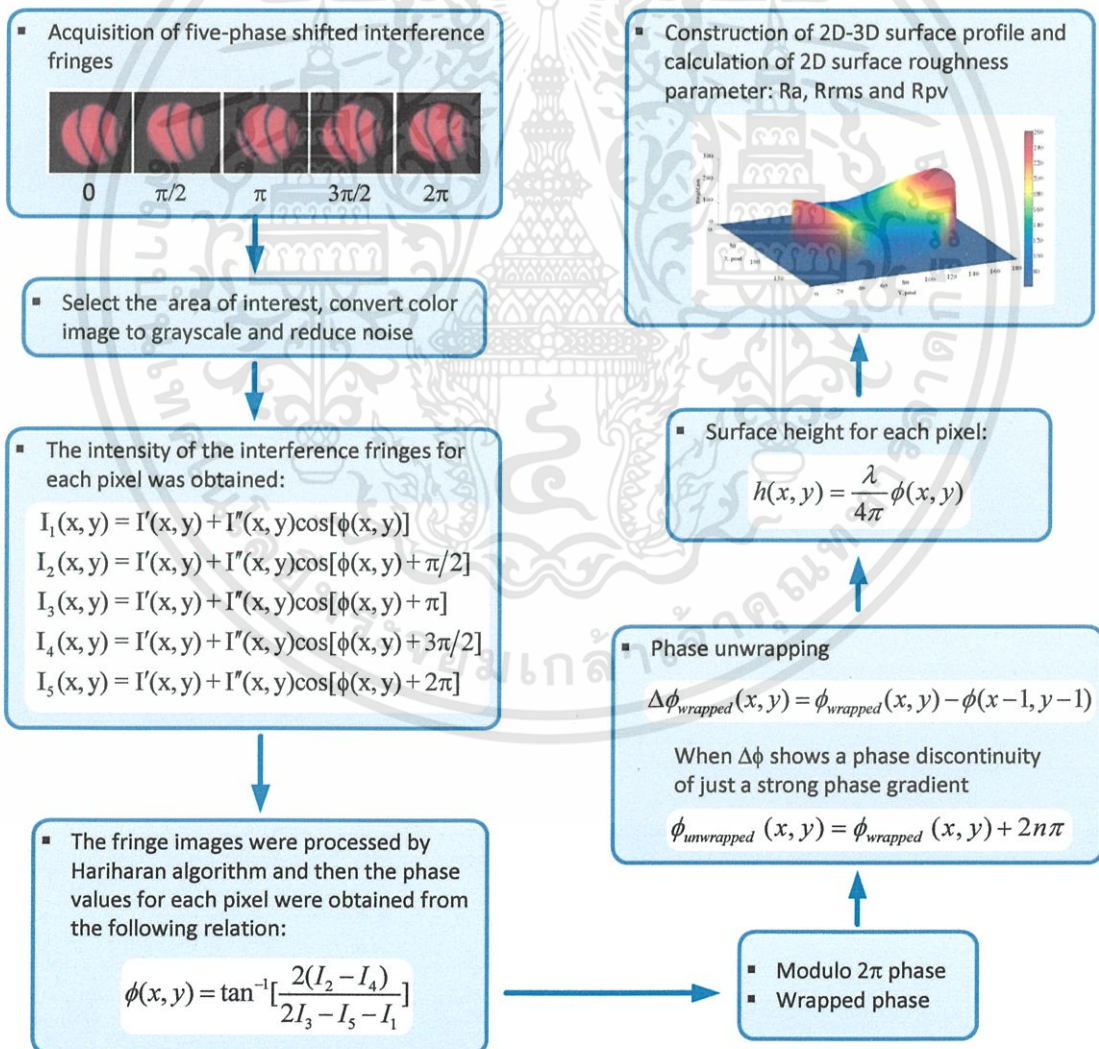
3.2 โปรแกรมประเมินค่าโครงสร้างพื้นผิว

โปรแกรมประเมินค่าโครงสร้างพื้นผิวถือได้ว่าเป็นหัวใจสำคัญของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้โดยอินเตอร์เฟอแกรมทั้ง 5 เฟรม ที่เกิดจากการเลื่อนเฟสครั้งละ $\pi/2$ rad จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณเพื่อให้ได้ค่าความต่างเฟสของพื้นผิวทดสอบที่เทียบกับพื้นผิวอ้างอิง โดยที่แต่ละพิกเซลของภาพทั้ง 5 เฟรมจะประเมินหาค่าความเข้มแสง ความเข้มแสงที่แต่ละพิกเซลจะถูกนำไปใช้เพื่อคำนวณหาค่าความเฟสระหว่างพื้นผิวอ้างอิงกับพื้นผิวทดสอบด้วย Hariharan algorithm ซึ่งความต่างเฟสมีความสัมพันธ์กับความสูงต่ำของพื้นผิว ผังการทำงานของโปรแกรมประเมินค่าโครงสร้าง 3 มิติของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นผิวนั้น เป็นดังภาพที่ 3. 13 โดยก่อนเริ่มต้นใช้งานโปรแกรมนั้นจะต้องทำการสร้างโพลเดอร์พร้อมทั้งจัดเก็บโปรแกรมย่อยต่าง ๆ ไว้ภายในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ โปรแกรมมีหน้าที่ในการเตรียมและจัดการภาพอินเตอร์เฟอแกรมทั้ง 5 เฟรม คำนวณความสูงของพื้นผิวจากการคำนวณค่าเฟสด้วย Hariharan algorithm และ พร้อมทั้งแสดงภาพเค้าโครงร่างพื้นผิว 3 มิติพร้อมทั้งพารามิเตอร์ความหยาบผิว

การทำงานของโปรแกรมทั้งหมดประกอบด้วย 3 ภาคส่วนหลัก ๆ คือ ภาคส่วนการเตรียมและจัดการภาพอินเตอร์เฟอแกรม ภาคส่วนการคำนวณความสูงพื้นผิว และ ภาคส่วนการแสดงผลและติดต่อผู้ใช้งาน ชุดคำสั่งของทั้ง 3 ภาคส่วนจะอยู่ภายใต้โปรแกรมย่อย main และ main2 หลังจากที่เกิดการทำงานของโปรแกรมย่อย main2 หน้าต่างแสดงผลเค้าโครงร่าง 3 มิติ และ พารามิเตอร์ความหยาบผิว จะปรากฏขึ้นมา ซึ่งหน้าต่างแสดงผลนี้ยังเป็นหน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้งาน เพื่อง่ายต่อการทำความเข้าใจในส่วนของการรายละเอียดของแต่ละภาคส่วนของโปรแกรม ผู้ทำการวิจัยจึงขอกล่าวถึงการดำเนินงานของไดอะแกรมโปรแกรมควบคู่ไปพร้อมการใช้งานโปรแกรมผ่านหน้าต่างติดต่อผู้ใช้งานไปรวมทั้งทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่ใช้ในการประมวลผลภาพ (Image Processing)

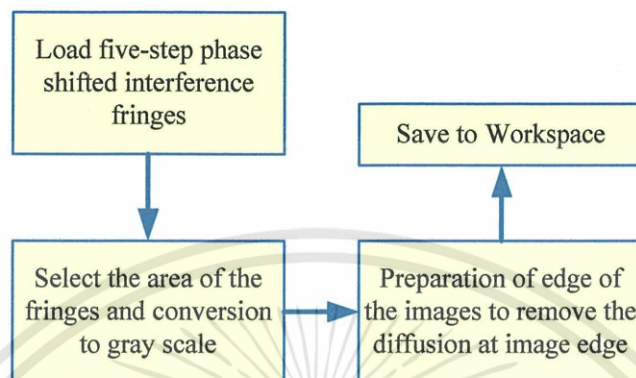


ภาพที่ 3. 13 ผังการทำงานของโปรแกรมการประเมินเค้าโครงร่างจาก PSI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 ภาคส่วนการเตรียมและจัดการภาพอินเตอร์เฟอโรแกรม

ภาคส่วนการเตรียมและจัดการภาพอินเตอร์เฟอโรแกรมซึ่งอยู่ในโปรแกรมย่อยชื่อ main.m นั้นมีขั้นตอนการทำงานดังแผนผัง ดังภาพที่ 3. 14 โดยการแปลงภาพสี (Color image) ไปเป็นภาพสเกลสีเทา (Grayscale image) ถือได้ว่าเป็นส่วนสำคัญของโปรแกรมย่อยนี้



ภาพที่ 3. 14 แผนผังการทำงานของโปรแกรมย่อย main

ระดับเฉดสีบนพิกเซลแต่ละพิกเซลของภาพสีเกิดจากผลรวมของความเข้มแสงของสีแดง สีเขียว และ สีน้ำเงิน เข้าด้วยกัน จึงทำให้แต่ละพิกเซลของภาพถูกบ่งบอกระดับสีด้วย 3 dimensional array ซึ่งประกอบด้วยอาร์เรย์ 2 มิติ 3 อาร์เรย์ (3 two dimensional arrays) คือ อาร์เรย์ของแสงสีแดง (R-red) เขียว (G-green) และ น้ำเงิน (B-blue) หรือที่เรียกกันว่า RGB color model [73] ตัวอย่างของการระบุองค์ประกอบสีของภาพสี หรือ RGB color ที่พิกเซล (n, m) ของภาพซึ่งมีองค์ประกอบของสีทั้ง 3 สี เช่น $Mylmage(m,n,1) = red$, $Mylmage(m,n,2) = green$, $Mylmage(m,n,3) = blue$ การระบุแถบสีของภาพด้วย RGB color model จึงทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนในการคำนวณและเขียนโปรแกรมเพื่อหาค่าระดับความเข้มแสงของแต่ละพิกเซลของภาพ

ภาพสเกลสีเทาเป็นภาพที่แต่ละพิกเซลจะระบุความเข้มแสงด้วยค่าตัวเลขเพียงค่าเดียว ระดับเฉดสีของภาพจะมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่างสีขาวกับดำ สีขาวแทนระดับความเข้มแสงสูงสุดและสีดำแทนระดับความเข้มแสงต่ำสุด ในกรณีที่ภาพสเกลสีเทาถูกแปลงมาจากภาพสีที่แต่ละอาร์เรย์ของ RGB มีขนาด 8 บิต ภาพสเกลสีเทาจะมีระดับความต่างของเฉดสีอยู่ 255 ระดับด้วยกัน ซึ่งถือได้ว่าเพียงพอต่องานวิจัยนี้ การแปลงภาพสีให้เป็นภาพสเกลสีเทามีวิธีการอยู่ด้วยกัน 2 วิธีหลัก ๆ คือ วิธีการเฉลี่ยค่า (Average method) และ วิธีการถ่วงดุล (Weighted method หรือ Luminosity method) การแปลงภาพด้วยวิธีการเฉลี่ยค่าถือได้ว่าเป็นวิธีการพื้นฐาน สามารถทำได้โดยนำระดับสี R G B มาบวกกันแล้วหารด้วย 3 ดังนี้

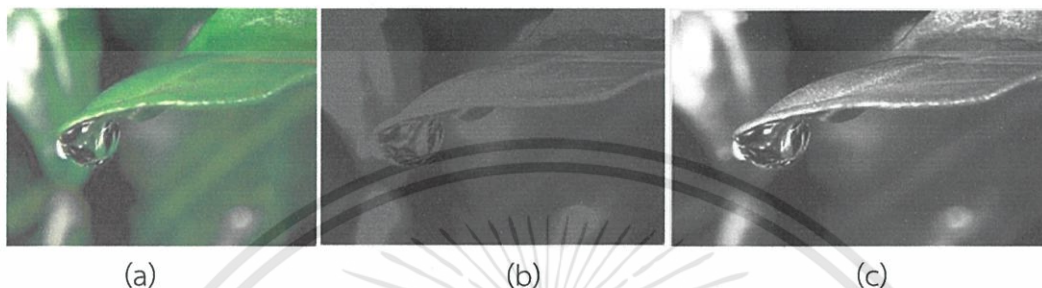
$$\text{Grayscale} = (R + G + B)/3$$

แต่อย่างไรก็ตามถ้าภาพสีมีลักษณะขององค์ประกอบสีเขียวเป็นหลักดังภาพที่ เมื่อทำการแปลงเป็นภาพสเกลสีเทาจะได้ทำภาพดังภาพที่ 3. 15 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ภาพที่ได้นั้นมีเฉดสีที่ค่อนข้างมืด ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจาก แสงสีเขียวเป็นแสงที่ตามนุษย์ตอบสนองได้ดีที่สุด และ แสงสีเขียวยังเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าแสงสีแดง เมื่อเปรียบเทียบกับแสงสีเขียวและน้ำเงินแล้ว แสงสีแดงถือได้ว่าเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นมากที่สุด จึงทำให้ต้องมีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความสำคัญหรือถ่วงดุลระดับของสีทั้ง 3 สี ใหม่ โดยเพิ่มความสำคัญของระดับสีเขียวให้มากขึ้น ในขณะที่ลดความสำคัญของ

ระดับสีแดงให้มีค่าน้อยลง โดยที่ความสำคัญของระดับสีน้ำเงินมีค่าอยู่ระหว่างระดับสีทั้งสองนั้น การแปลงภาพสีให้เป็นภาพสีเทาจึงเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{New grayscale image} = 0.3 * R + 0.59 * G + 0.11 * B$$

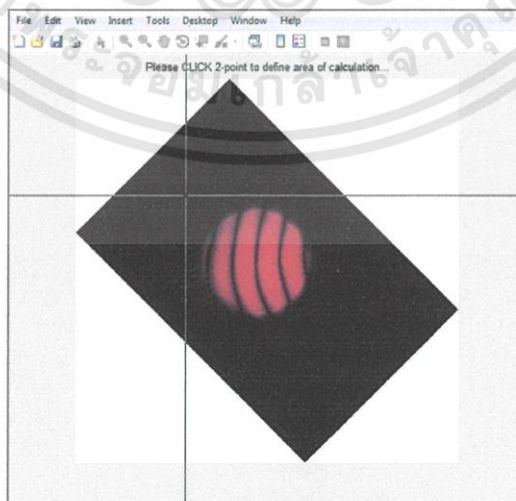
วิธีการนี้จะให้ความสำคัญของระดับสีแดงอยู่ 30% สีเขียว 59% และ สีน้ำเงิน 11% ภาพที่ได้จากการแปลงภาพสีด้วยวิธีการถ่วงดุลแสดงดังภาพที่ 3. 15 (c)



ภาพที่ 3. 15 ภาพเปรียบเทียบภาพสีกับภาพสเกลสีเทาที่ได้จากการแปลงด้วยวิธีการเฉลี่ยและการถ่วงดุลระดับสี (a) ภาพระดับสี RGB และ ภาพสเกลสีเทาที่ได้จากการแปลงด้วยวิธีการ (b) เฉลี่ย (c) ถ่วงดุล [74]

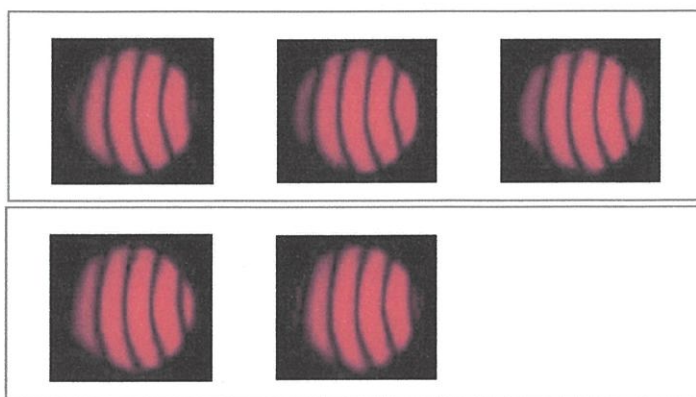
สำหรับในงานวิจัยนี้ภาพสีจะถูกแปลงเป็นภาพสเกลสีเทาเมื่อโปรแกรมย่อย main ถูกเรียกใช้งาน โดยจะปรากฏหน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้งานซึ่งมีรายละเอียดและขั้นตอนการใช้งานดังนี้

- 1) เมื่อสั่งให้โปรแกรม main.m เริ่มทำงาน โปรแกรมจะทำการเรียกอินเตอร์โปรแกรมทั้ง 5 เฟรมขึ้นมา หลังจากนั้นจะปรากฏหน้าต่างขึ้นดังภาพที่ 3. 16 พร้อมคำอธิบาย
- 2) ผู้ใช้งานทำการเลือกขอบเขตของภาพที่ต้องการ โดยใช้เคอร์เซอร์ที่ปรากฏบนรูปเป็นกากบาท ให้คลิก 2 ครั้งเพื่อกำหนดจุด 2 จุดบนภาพเพื่อทำการตัดขอบรูปภาพให้เล็กลง โดยอินเตอร์โปรแกรมทุกภาพจะถูกตัดที่พิกเซลเดียวกัน ผลลัพธ์ที่ได้จากการตัดภาพแสดงดังภาพที่ 3. 17 หลังจากนั้นโปรแกรมจะทำการแปลงภาพจากภาพสีที่มีระดับแบบ RGB scale ไปเป็น gray scale และ ปรากฏหน้าต่างขึ้นดังภาพที่ 3. 18 (a)



ภาพที่ 3. 16 หน้าต่างสำหรับเลือกขอบเขตภาพภาพอินเตอร์โปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

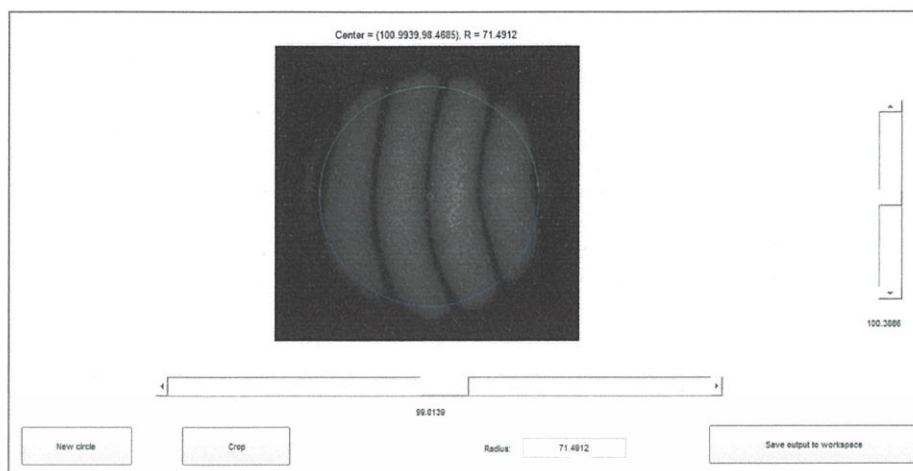


ภาพที่ 3. 17 อินเตอร์โปรแกรมที่ถูกเลือกขอบเขตของภาพแล้วทั้ง 5 เฟรม

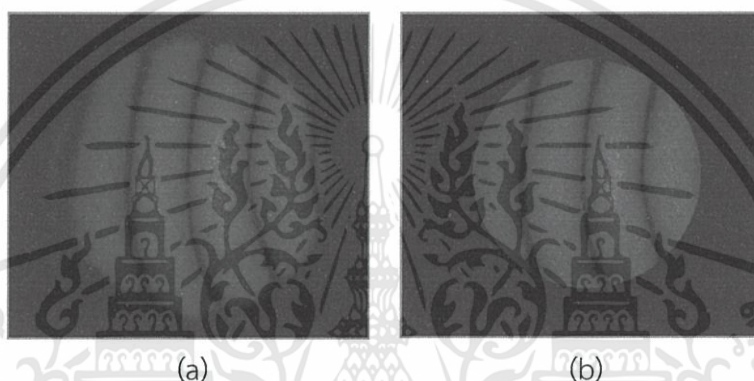
- 3) จากหน้าต่างในภาพที่ 3. 18 มีเคอร์เซอร์เป็นกากบาทให้คลิก 2 ครั้งเพื่อกำหนดขอบเขตของภาพเพื่อทำการตัดขอบภาพ การคลิกเมาส์ครั้งที่ 1 เป็นการกำหนดจุดศูนย์กลางของวงกลม และ คลิกครั้งที่ 2 เป็นการกำหนดขนาดรัศมีของวงกลม โดยขอบเขตของวงกลมในภาพที่ 3. 19 นั้นยังสามารถเลื่อนเพื่อทำการเลือกพื้นที่ที่ไม่ต้องการตัดภาพไปทางซ้าย-ขวา หรือ ขึ้น-ลงได้ ปรับจนกว่าจะได้ตำแหน่งที่สวยงามและเหมาะสม ลักษณะของภาพก่อนและหลังการตัดขอบแสดงดังภาพที่ 3. 20 จากการทดลองวิเคราะห์ภาพพบว่าการตัดขอบไม่พึงประสงค์ออกช่วยลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการฟุ้งกระจายของเม็ดสีที่ขอบภาพได้เป็นอย่างดี
- 4) บันทึกผลโดยกดปุ่ม Save output to workspace โปรแกรมจะทำการบันทึกข้อมูลของอินเตอร์โปรแกรมหลังจากทำการตัดขอบภาพแล้วเพื่อไปคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วย Hariharan algorithm ในโปรแกรมถัดไป



ภาพที่ 3. 18 คลิกเมาส์ครั้งที่ 1 เพื่อกำหนดจุดศูนย์กลางของวงกลม



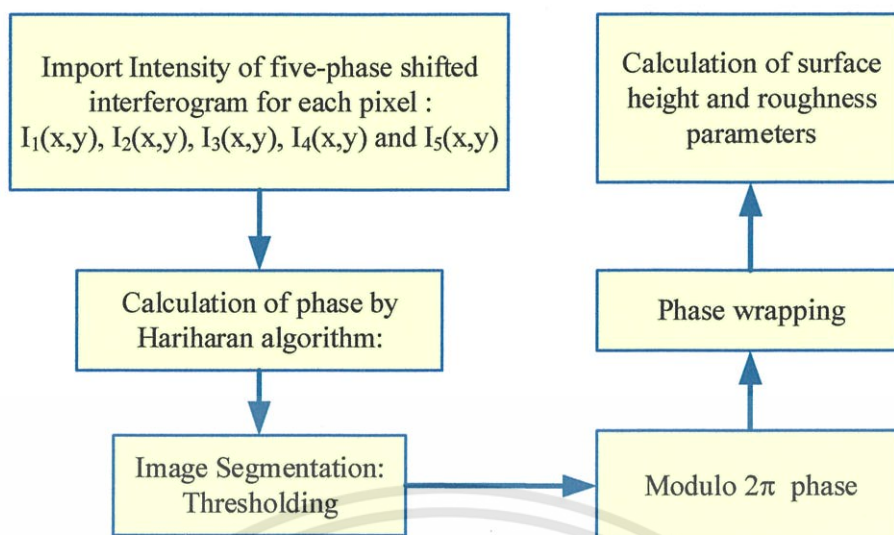
ภาพที่ 3.19 คลิกเมาส์ครั้งที่ 2 เพื่อกำหนดรัศมีของวงกลม



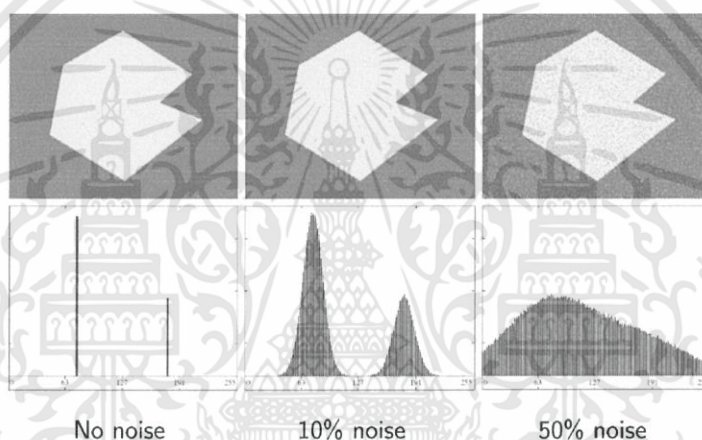
ภาพที่ 3.20 ภาพก่อนและหลังการตัดขอบภาพ

3.2.2 ภาคส่วนการคำนวณความสูงของพื้นผิว

ภาคส่วนการคำนวณความสูงของพื้นผิวจากอินเตอร์เฟอแกรมซึ่งอยู่ในโปรแกรมย่อยชื่อ mian2 ซึ่งมีฝั่งการทำงานดังไดอะแกรมภาพที่ 3.21 เมื่อโปรแกรมย่อยนี้เริ่มทำงาน โปรแกรมย่อยจะนำเข้าค่าความเข้มแสงของอินเตอร์เฟอแกรมทั้ง 5 เฟรมที่เกิดจากการเลื่อนเฟสครั้งละ $\pi/2$ rad ซึ่งภาพทั้ง 5 เฟรมนั้นเป็นภาพสเกลสีเทา ระดับความเข้มแสงจะถูกวัดจากระดับสเกลสีเทา ค่าความต่างเฟสที่แต่ละพิกเซลถูกคำนวณออกมาด้วยอัลกอริทึมของฮารีฮาราน ซึ่งค่าเฟสที่ได้เรียกว่า เฟสมอดูโล 2π (Modulo 2π phase) เกิดเนื่องจากค่าเฟสคำนวณจากฟังก์ชันอาร์กแทนของความเข้มแสงแต่อย่างไรก็ตามจะพบว่า หลังจากการคำนวณหาค่าความต่างเฟสดังกล่าวแล้วพบว่ามีความบกพร่องของพิกเซลในตัวอย่างและบริเวณขอบเขตเนื่องจากมีสัญญาณรบกวนจากพื้นผิวด้านหลัง ทำให้ไม่สามารถระบุขอบเขตของภาพได้อย่างแน่นอน ตัวอย่างของภาพที่มีสัญญาณรบกวนร่วมอยู่ด้วยเป็นดังภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3. 21 ผังการทำงานของโปรแกรมย่อย main2



ภาพที่ 3. 22 ผลของสัญญาณรบกวนที่มีต่อภาพ

กระบวนการประมวลผลภาพ (Image processing) จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการแก้ไขจุดบกพร่องของเฟสในตัวภาพและการระบุขอบภาพ วิธีการที่พื้นฐานและง่ายที่สุด คือ การแบ่งส่วนของภาพ (Image segmentation) ด้วยการกำหนดระดับขีดเริ่ม (Thresholding) ซึ่งหมายถึงการแบ่งหรือแยกบริเวณสว่างและมืดของภาพออกจากกันด้วยการพิจารณาความเข้มแสงขีดเริ่มจากพิกเซลและพิกเซลที่อยู่ใกล้เคียงกัน เมื่อภาพถูกกำหนดระดับความสว่างขีดเริ่ม ทำให้ภาพสเกลสีเทากลายเป็นภาพขาวดำ (Binary image) ซึ่งมีระดับสีเพียง 2 ระดับเท่านั้น คือ 0 และ 1 ถ้าพิกเซลใดของภาพมีค่าระดับความเข้มแสงต่ำกว่าระดับขีดเริ่มจะมีค่าเป็น 0 แต่ถ้าพิกเซลใดของภาพมีค่าระดับความเข้มแสงมากกว่าระดับขีดเริ่มจะมีค่าเป็น 1 โดยถ้า $g(x,y)$ คือ ระดับสีเทาของพิกเซล $f(x,y)$ ที่ถูกกำหนดระดับสีขาวดำ ด้วยระดับขีดเริ่ม T แล้ว

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{if } f(x,y) \geq T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

การกำหนดค่าขีดเริ่มในลักษณะนี้ T เรียกว่า Global Threshold ซึ่งเหมาะสมสำหรับการหาขอบของภาพ แต่ไม่เหมาะสมกับภาพที่มีการเปลี่ยนความเข้มแสงในตัวภาพ ซึ่ง Global Thresholding ไม่คำนึงความสัมพันธ์ของความเข้มแสงของพิกเซลที่อยู่รอบ ๆ พิกเซลที่กำลังพิจารณา การแก้ปัญหานี้ทำได้โดยการกำหนดขีดเริ่มแบบ Local Thresholding ตัวอย่างเช่น

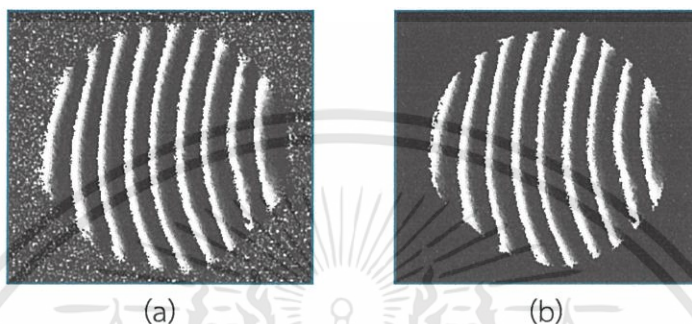
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$g(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{if } f(x,y) > T_{xy} = a\sigma_{xy} + bm_{xy} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

เมื่อ σ_{xy} คือ ความแปรปรวนของความเข้มแสงที่มีอยู่ในขอบเขตใด ๆ

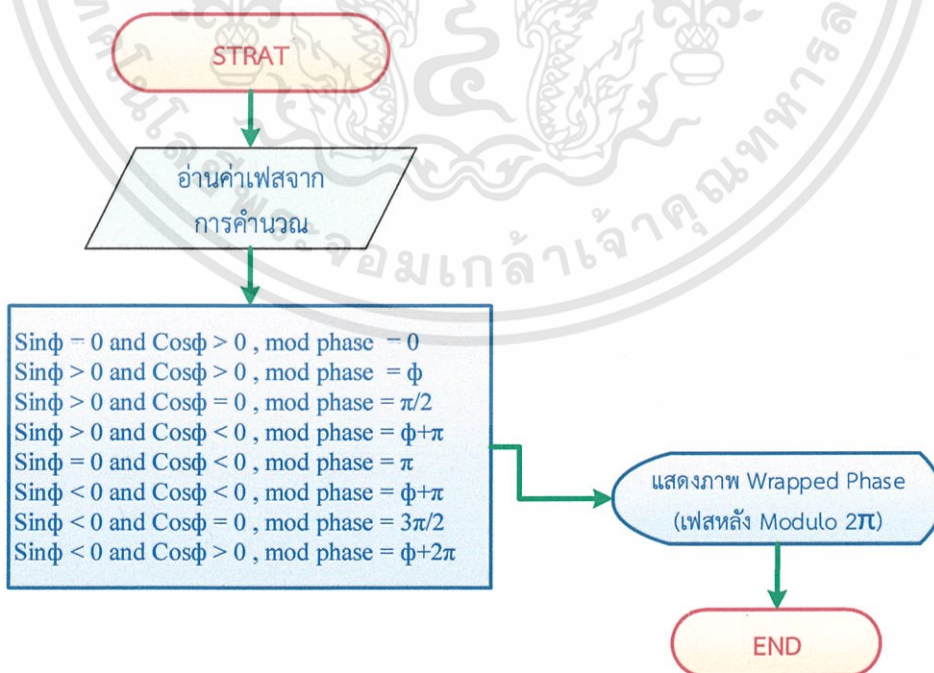
m_{xy} คือ ความเข้มแสงเฉลี่ยของพิกเซลทั้งหมดที่มีอยู่ในขอบเขตใด ๆ

Local Thersholding นี้จึงเหมาะกับบริเวณของภาพที่มีระดับขีดเริ่มหลายระดับ ตัวอย่างของ Thresholding ภาพด้วยโปรแกรมย่อยที่อยู่ภายใน mian2 เป็นดังภาพที่ 3. 23



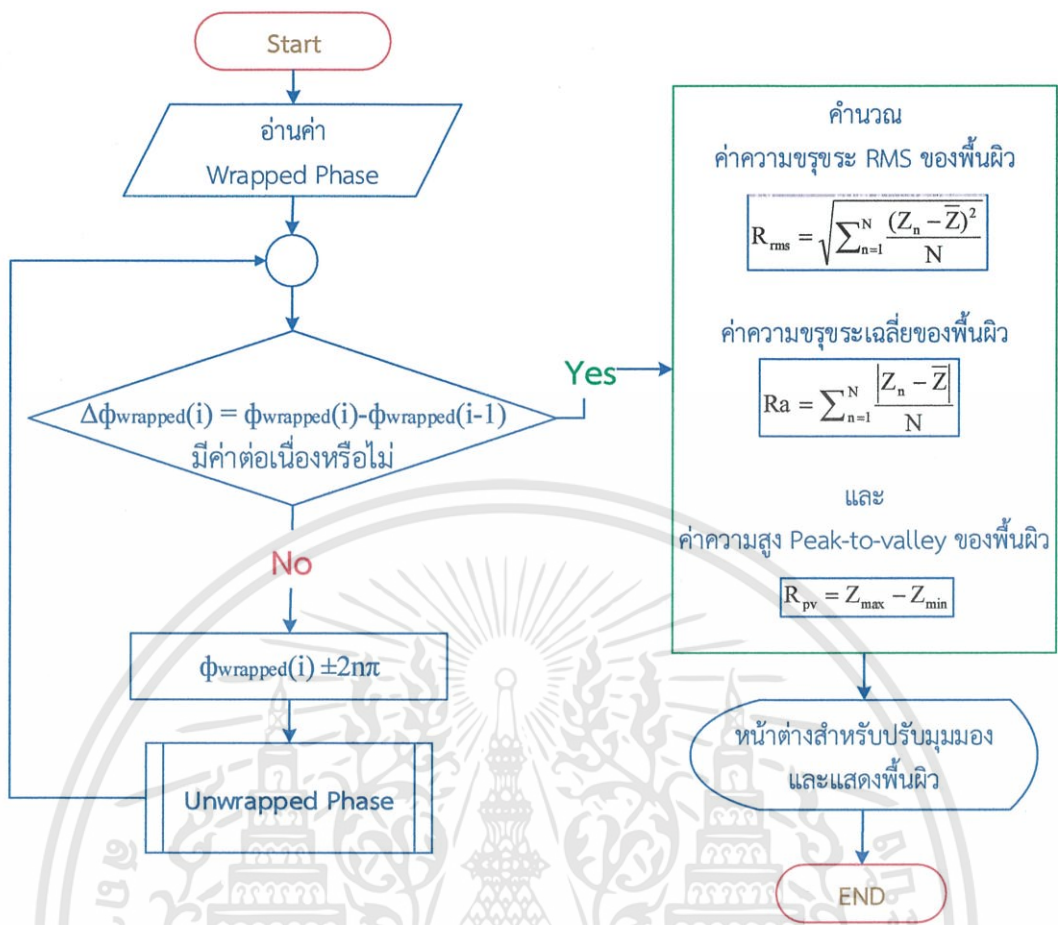
ภาพที่ 3. 23 ภาพก่อน (a) และ หลัง (b) Thersholding

หลังจากที่ภาพผ่านกระบวนการ Thersholding จะมีการปรับแก้เฟสด้วยการทำมอดูโล 2π ดังอัลกอริทึมดังต่อไปนี้ตามภาพที่ 3. 24 ค่าเฟสที่ได้หลังจากการมอดูโลแล้วจะเรียกว่าเฟสซ่อนรูป เนื่องจากเฟสซ่อนรูปนั้นเป็นค่าเฟสที่ไม่มีความต่อเนื่องกันของเฟสที่อยู่ติดกัน กระบวนการถอดรูปเฟสจึงต้องถูกนำเข้ามาใช้ การถอดรูปเฟสทำได้ดังอัลกอริทึมดังต่อไปนี้ตามภาพที่ 3. 25 เฟสที่ได้เรียกว่า เฟสถอดรูป ความแตกต่างระหว่างเฟสที่ได้จากฟังก์ชันอาร์กแทนของความเข้มแสง เฟสซ่อนรูป และ เฟสถอดรูปแสดงดังภาพที่ 3. 26

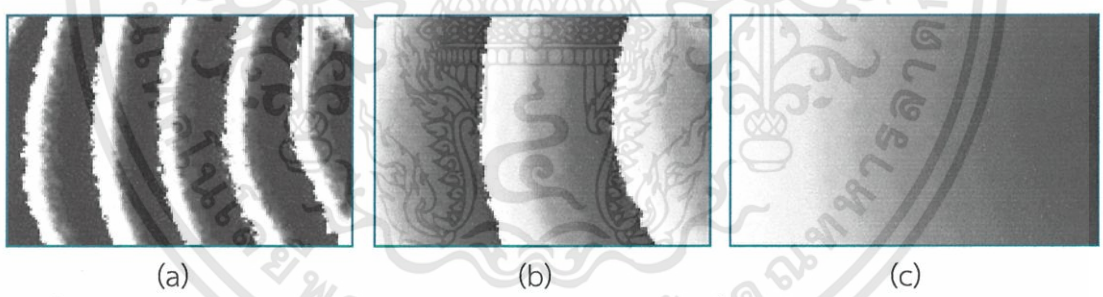


ภาพที่ 3. 24 อัลกอริทึมการปรับแก้ค่าเฟสจากผลของฟังก์ชันอาร์กแทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3. 25 Algorithm for Phase unwrapping process

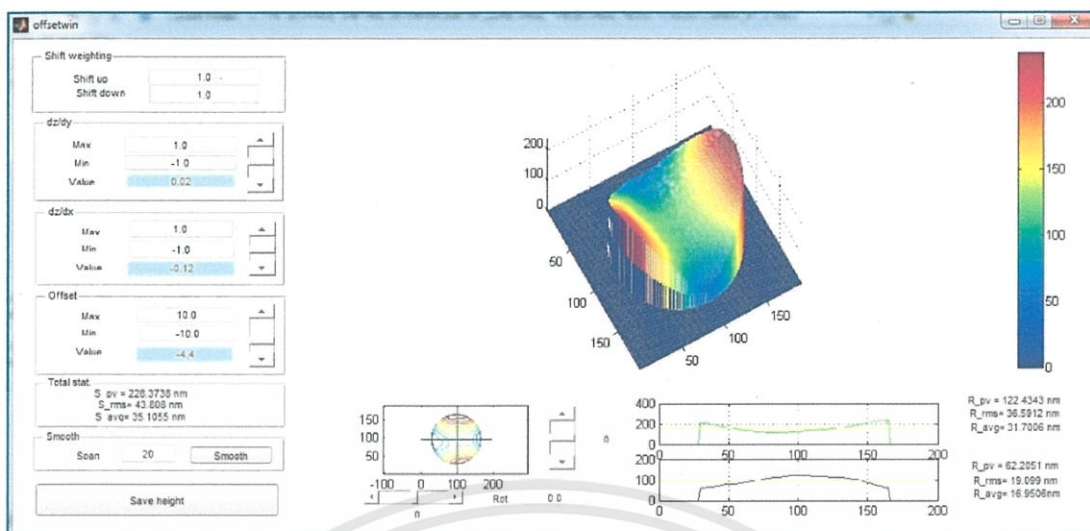


ภาพที่ 3. 26 เฟสของหน้าคลื่นจากอินเตอร์เฟอแกรม 5 เฟรม เมื่อ
 (a) เฟสคำนวณจากฟังก์ชันอาร์กแทนของความสัมพันธ์และผ่านการทำ Thersholding
 (b) เฟสซ่อนรูปได้จากเฟสในรูป (a) ถูกทำการมอดูโล 2π (Phase modulo 2π)
 (c) เฟสในรูป (b) ผ่านกระบวนการ Phase unwrapping

3.2.3 หน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้ offsetwin.fig

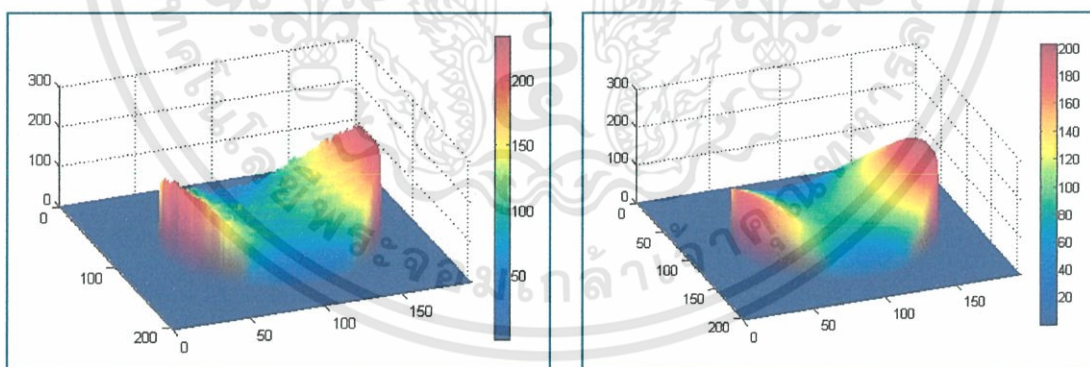
หลังจากโปรแกรม main2.m จบการทำงาน หน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้ offsetwin.fig จะถูกเรียกขึ้นอัตโนมัติ หน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้ offsetwin.fig จะแสดงค่าความสูงของพื้นผิว ค่าความขรุขระเฉลี่ย และค่าความขรุขระ RMS ซึ่งจะแสดงข้อมูลของทั้งภาพ และข้อมูลพื้นผิวที่อ่านได้จากเส้นตรงสัมผัสพื้นผิว 2 เส้นได้จากหน้าต่างนี้ โดยผู้ใช้งานสามารถปรับระดับ (offset) ของภาพ ในกรณีที่ภาพสามมิติแสดงได้ไม่สมบูรณ์หรือไม่ได้ระดับ และสามารถเลื่อนปรับแนวของเส้นสัมผัสพื้นผิวให้ลากผ่านจุดที่ต้องการดูข้อมูลพื้นผิวได้อีกด้วย โดยหน้าจอ offsetwin.fig แสดงดังภาพที่ 3. 27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3. 27 ภาพหน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้ offsetwin.fig แสดงการจำลองโครงร่างสามมิติของพื้นผิว
หน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้ offsetwin.fig สามารถปรับระดับของภาพและปรับมุมมองการแสดงผลได้ดังนี้

1. ปรับระดับความเอียงและระดับอ้างอิงตามความเหมาะสม
2. ก่อนทำบันทึกผล สามารถปรับความเรียบโดยโปรแกรมจะทำการเกลี่ยภาพด้วยคำสั่ง Smooth
3. บันทึกผลด้วยการกดปุ่ม Save height
4. เมื่อต้องการแสดงกราฟพื้นผิว ให้โหลดข้อมูลไว้ใน Workspace จากนั้นแสดงข้อมูลพื้นผิวตามความต้องการ ดังตัวอย่างภาพที่ 3.28 โดยภาพที่ 3.28 (a) เป็นเค้าโครงร่างของพื้นผิวที่ได้จากการประเมินโดยยังไม่ได้ทำการเกลี่ยภาพด้วยโปรแกรมน้อย mesh(height.h) และเมื่อภาพดังกล่าวถูกเกลี่ยแล้วจะได้ลักษณะพื้นผิวเป็นดังภาพที่ 3.28 (b)

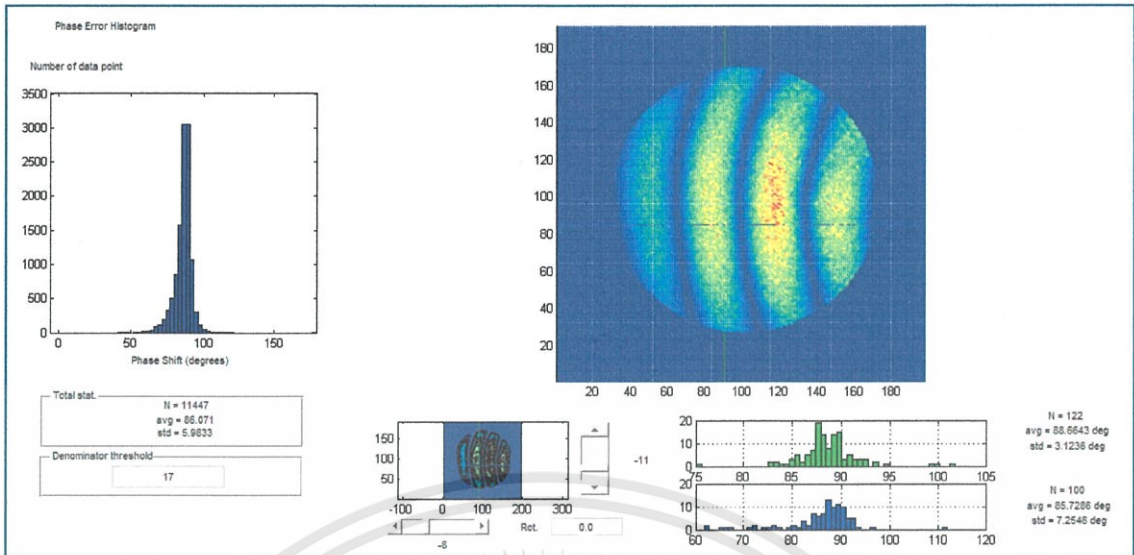


(a)

(b)

ภาพที่ 3. 28 ผลการเกลี่ยภาพด้วยคำสั่ง Smooth (a) ก่อนเกลี่ยภาพ และ (b) หลังเกลี่ยภาพ

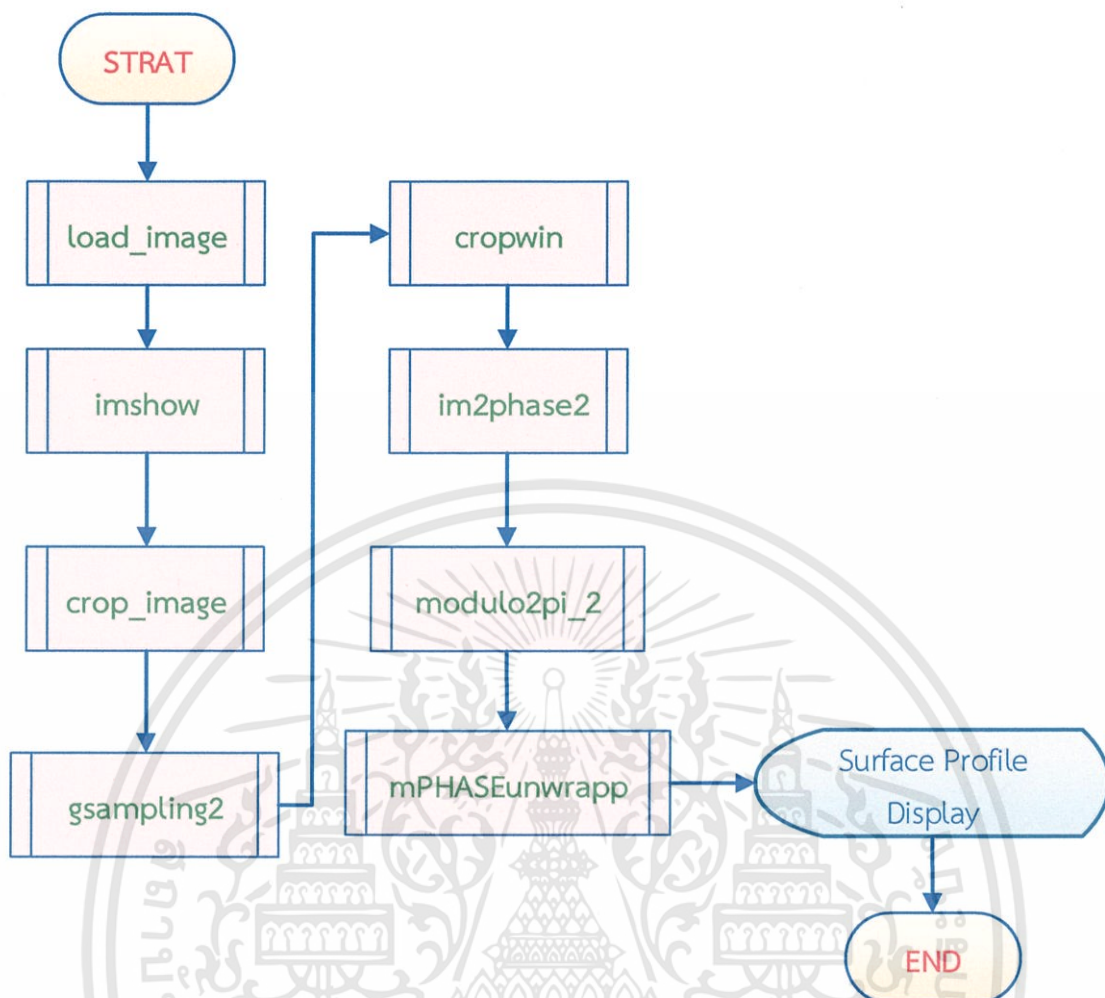
5. เมื่อต้องการทราบค่าความผิดพลาดในการเลื่อนเฟส ให้เรียกคำสั่ง pwin(sgCl1, sgCl2, sgCl3, sgCl4, sgCl5) จะปรากฏหน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้ pwin.fig ขึ้นมาดังภาพที่ 3. 29



ภาพที่ 3. 29 ภาพหน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้ pewin.fig แสดงค่าความผิดพลาดในการเลื่อนเฟส

หน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้ pewin.fig จะแสดงแผนภาพฮิสโตแกรมของการเลื่อนเฟสและแสดงข้อมูลจำนวนพิกเซลทั้งหมดที่นำมาวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดจากการเลื่อนเฟส ค่าการเลื่อนเฟสเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยแผนภาพฮิสโตแกรมจะสามารถบอกได้ว่าข้อมูลส่วนใหญ่เป็นอย่างไรทำให้ทราบค่าความผิดพลาดในการเลื่อนเฟส ผู้ใช้งานสามารถทำการปรับค่าเทรชโฮลด์ได้ตามความเหมาะสม ผ่านทางหน้าต่างนี้ การปรับค่าเทรชโฮลด์จะมีผลต่อจำนวนของข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ ซึ่งค่าความผิดพลาดของการเลื่อนเฟสจะแปรผันตรงกับจำนวนข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ ถ้าจำนวนข้อมูลน้อยค่าความผิดพลาดที่คำนวณก็จะน้อย ถ้าจำนวนข้อมูลมาก ความผิดพลาดที่คำนวณได้ก็จะมีค่ามาก

ขั้นตอนการดำเนินงานของโปรแกรมแสดงตั้งผังการทำงานนี้เกิดจากการทำงานร่วมกันของโปรแกรมย่อย ๆ หลายโปรแกรมด้วยกัน โดยเริ่มต้นจะเรียกข้อมูลภาพอินเตอร์เฟอแกรมผ่านชุดคำสั่ง load_image ภาพอินเตอร์เฟอแกรมทั้ง 5 ภาพจะปรากฏขึ้นพร้อมกัน จากนั้นใช้คำสั่ง imshow เรียกภาพขึ้นมา 1 ภาพ ใช้เมาส์กดบนภาพ 2 จุดเพื่อกำหนดตำแหน่งต้องการครอบด้วยคำสั่ง crop_image ภาพทั้ง 5 จะถูกครอบที่ตำแหน่งเดียวกัน โปรแกรมจะแปลงภาพจากภาพสี เป็นภาพขาวดำ จากนั้นลดขนาดของภาพด้วยชุดคำสั่ง gsampling2 ภาพจะถูกหาค่าเฉลี่ยแบบสุ่ม ขั้นตอนนี้จะทำให้ภาพมีขนาดเล็กลง และสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนออกไปได้บางส่วน ที่ขอบของภาพไม่คมชัด เนื่องจากมีการฟุ้งกระจายของเม็ดสี ส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวน ดังนั้นคำสั่ง cropwin จะใช้เพื่อตัดขอบภาพเป็นวงกลม ทำให้มีคมชัดมากขึ้น ช่วยลดสัญญาณรบกวนได้ จากนั้นทำการบันทึกข้อมูลภาพ และทำพื้นหลังให้เป็นสีดำด้วยชุดคำสั่ง cropwin แปลงข้อมูลความเข้มแสงเป็นข้อมูลเฟสตามระเบียบวิธีฮาริฮารานผ่านชุดคำสั่ง im2phase2 ทำการมอดูโลค่าเฟสด้วยชุดคำสั่ง modulo2pi_2 และหา Phase Unwrapping ด้วยชุดคำสั่ง mPHASEunwrapp เมื่อจบการทำงานหน้าต่างแสดงภาพจำลองโครงสร้างสามมิติของพื้นผิวจะปรากฏขึ้น สามารถทำการปรับมุมมองของภาพและบันทึกค่าความสูงของพื้นผิวที่วิเคราะห์ได้ ผังการทำงานของโปรแกรมย่อยทั้งหมดแสดงดังไดอะแกรมภาพที่ 3. 30



ภาพที่ 3. 30 ผังการทำงานของโปรแกรมย่อยที่ร่วมการทำงานจนสามารถวิเคราะห์เค้าโครงร่างพื้นผิวจากรูการแทรกสอดด้วยเทคนิคการเลื่อนเฟสที่เกิดจากการเรียกโปรแกรมย่อย

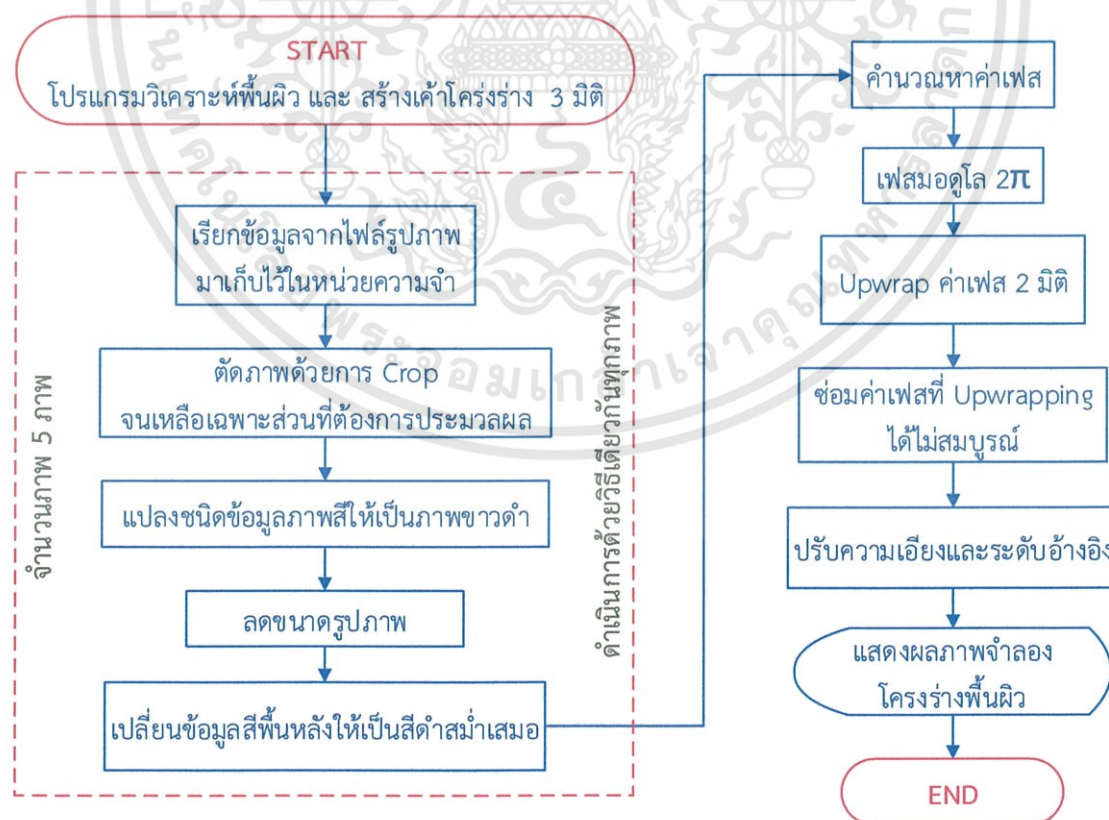
บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

ตามขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ประกอบด้วยสองส่วนที่สำคัญคือ ส่วนที่เป็นการจัดระบบอินเตอร์เฟรมิเตอร์ และ ส่วนที่เป็นการพัฒนาโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์และจำลองโครงสร้างสามมิติของพื้นผิวจากอินเตอร์เฟรมิเตอร์ ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินงานวิจัย เริ่มตั้งแต่ ผลของการทดสอบความขนานของลำแสงในไมเคลสันอินเตอร์เฟรมิเตอร์ ผลการควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้แก่เพียโซอิเล็กทริก โปรแกรมวิเคราะห์พื้นผิวจากอินเตอร์เฟรมิเตอร์ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น ผลการทดลองวัดความเรียบของพื้นผิว Optical flat เพื่อสอบเทียบไมเคลสันอินเตอร์เฟรมิเตอร์ และผลการวัดพื้นผิวของ Microscope Slide ที่ใช้เป็นฐานรองรับที่นิยมนำมาใช้ในการปลูกฟิล์มบาง

4.1 ผลทดสอบการใช้งานโปรแกรมวิเคราะห์ และสร้างโครงสร้างสามมิติของพื้นผิว

โปรแกรมวิเคราะห์ และสร้างโครงสร้างสามมิติของพื้นผิวจากอินเตอร์เฟรมิเตอร์ ในงานวิจัยนี้พัฒนาขึ้นเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ ที่บ่งบอกถึงความเรียบของพื้นผิว และจำลองโครงสร้างสามมิติของพื้นผิวที่ได้ทำการตรวจวัดจากกลดตายอินเตอร์เฟรมิเตอร์ โดยมีลำดับการทำงานสรุปดังภาพที่ 4.1 โดยการใช้งานโปรแกรมประกอบด้วยสคริปต์ไฟล์คำสั่งของโปรแกรมและหน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้สำหรับแสดง และปรับข้อมูลของพื้นผิวให้มีมุมมองที่สวยงาม



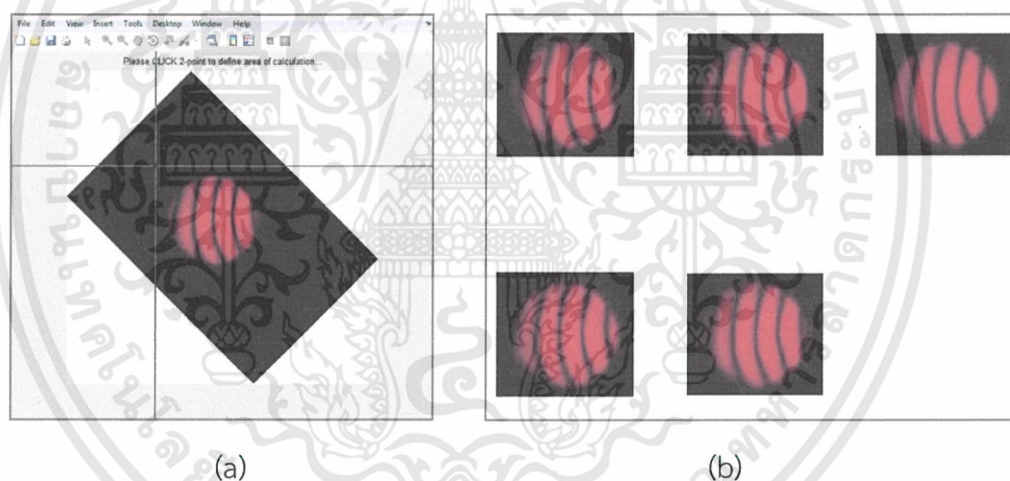
ภาพที่ 4. 1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์พื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 สคริปต์ไฟล์ main.m

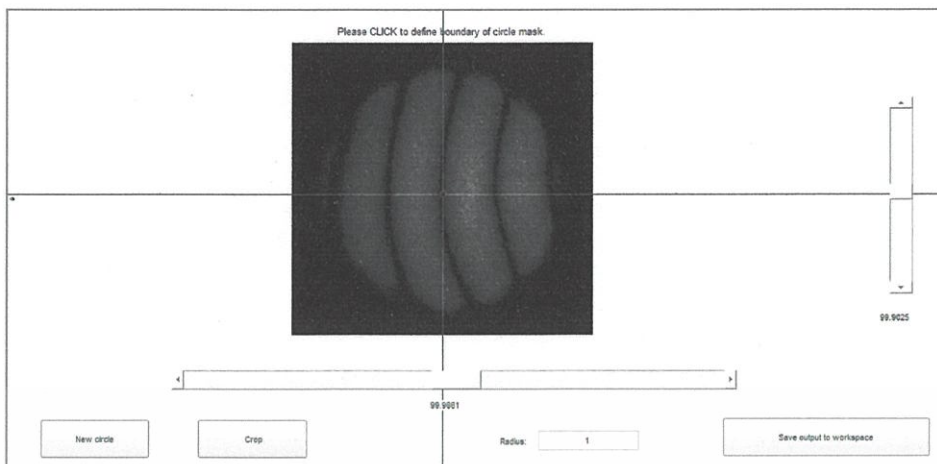
สคริปต์ไฟล์ main.m เป็นสคริปต์ที่รวมคำสั่งการเตรียมภาพอินเตอร์เฟรแกรมที่วัดได้จากอินเตอร์เฟรอมิเตอร์ให้พร้อมก่อนนำไปวิเคราะห์ตามระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ โดยมีขั้นตอนการเรียกใช้งานดังต่อไปนี้

1. สร้างโฟลเดอร์และวางไฟล์สคริปต์ต่างๆไว้ในหน่วยความจำของโปรแกรม โดยเก็บภาพอินเตอร์เฟรแกรมที่ต้องการประมวลผลเป็น JPEG
2. เปลี่ยนชื่อรูปภาพเป็น I1, I2, I3, I4 และ I5 เพื่อให้สอดคล้องกับระเบียบวิธี Hariharan ที่ใช้อ้างอิงถึงลำดับของอินเตอร์เฟรแกรม โดยจะต้องเรียงตามลำดับที่ 1 ถึง 5 ให้ถูกต้อง
3. สั่งให้โปรแกรม main.m เริ่มทำงาน เมื่อโปรแกรมทำงานจะทำการเรียกอินเตอร์เฟรแกรมทั้ง 5 ภาพขึ้นมา
4. หน้าต่างตัดรูปภาพจะปรากฏขึ้นดังภาพที่ 4.2 (a) เคอร์เซอร์บนรูปเป็นกากบาท ให้คลิก 2 ครั้งเพื่อกำหนดจุด 2 จุดบนภาพเพื่อทำการตัดขอบรูปภาพให้เล็กลง โดยอินเตอร์เฟรแกรมทุกภาพจะถูกตัดที่พิกเซลเดียวกัน ผลลัพธ์ที่ได้จากการตัดภาพแสดงดังภาพที่ 4.2 (b)

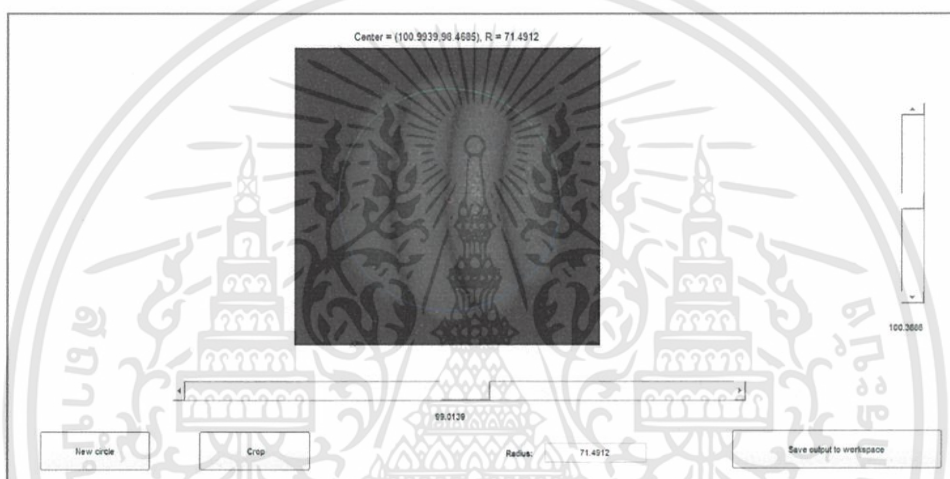


ภาพที่ 4.2 ภาพหน้าต่างสำหรับตัดภาพถ่ายแบบสีเหลี่ยม (a) หน้าจอตัดรูปภาพ (b) ผลลัพธ์จากการตัดรูปภาพ

5. โปรแกรมจะทำการปรับรูปภาพโดยเปลี่ยนค่าสีของอินเตอร์เฟรแกรมให้เป็นขาวดำเสร็จเรียบร้อยหน้าต่างดังภาพที่ 4.3 จะปรากฏขึ้น มีเคอร์เซอร์เป็นกากบาทให้คลิก 2 ครั้งเพื่อกำหนดจุด 2 จุดบนภาพ จุดที่หนึ่งเป็นการกำหนดจุดศูนย์กลางภาพ และจุดที่สองเพื่อเลือกกระยะรัศมีของวงกลมที่เหมาะสมสำหรับการตัดขอบรูปภาพแบบวงกลม



(a)

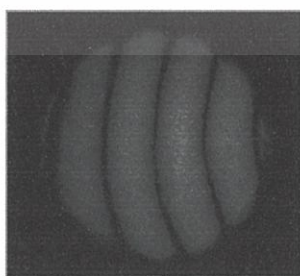


(b)

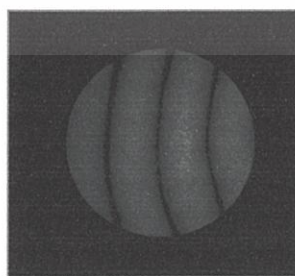
ภาพที่ 4. 3 (a) หน้าจอสำหรับตัดภาพถ่ายแบบวงกลม

(b) หน้าจอสำหรับตัดภาพถ่ายแบบวงกลม

6. ในภาพที่ 4.3 (a) สามารถเลื่อนวงกลมเพื่อเลือกพื้นที่ที่ไม่ต้องการตัดภาพไปทางซ้ายขวา หรือขึ้นลงได้ ปรับจนกว่าจะได้ตำแหน่งที่สวยงามและเหมาะสม เมื่อตัดขอบออกไปแล้วจะได้ขอบที่มีความคมชัดมากขึ้น ดังภาพที่ 4.4 (b) จากการทดลองวิเคราะห์ภาพพบว่า การตัดขอบไม่เพียงประสงค์ออกช่วยลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการฟุ้งกระจายของเม็ดสีที่ขอบภาพได้เป็นอย่างดี



(a)



(b)

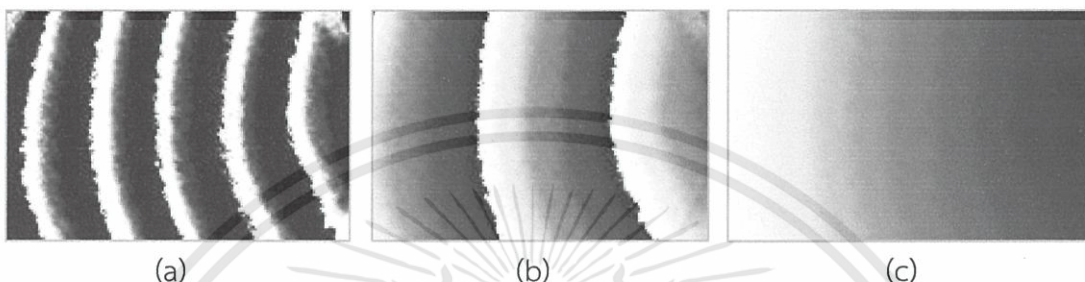
ภาพที่ 4. 4 ผลลัพธ์ก่อน (a) และ หลัง (b) ตัดขอบวงกลมของอินเตอร์โปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. บันทึกผลโดยกดปุ่ม Save output to workspace โปรแกรมจะทำการบันทึกข้อมูลของอินเทอร์เฟอแกรมหลังจากทำการตัดขอบภาพแล้วเพื่อไปคำนวณทางคณิตศาสตร์ในสคริปต์ไฟล์ต่อไป

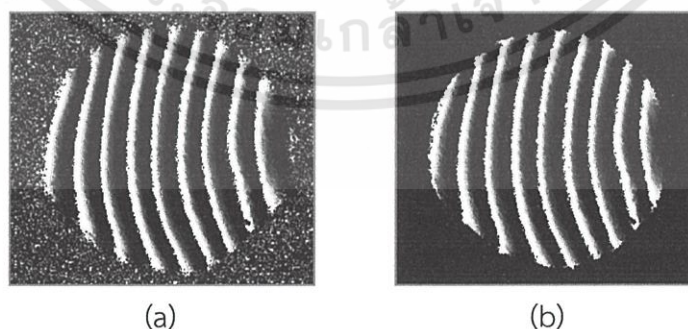
4.1.2 สคริปต์ไฟล์ main2.m

สคริปต์ไฟล์ main2.m เป็นชุดคำสั่งที่ใช้ในการคำนวณหาค่าเฟส ปรับแก้ค่าเฟสและประมวลผลพื้นผิวทั้งหมดก่อนเรียกหน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้ offsetwin.fig ให้ปรากฏขึ้นเพื่อแสดงการจำลองโครงร่างของพื้นผิว โดยผลลัพธ์ในการเรียกใช้โปรแกรมนี้แสดงดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ผลลัพธ์จากการเรียกใช้โปรแกรม main2.m (a) เฟส (b) เฟสมอดูล 2π และ (c) Unwrapped Phase

ภาพที่ 4.5 (a) แสดงข้อมูลเฟสที่คำนวณได้จากระเบียบวิธีของ Hariharan ซึ่งจะมีค่าเฟสอยู่ในช่วง $-\pi/2$ ถึง $\pi/2$ ภาพที่ 4.5 (b) แสดงข้อมูลเฟสในช่วง 0° ถึง 2π และภาพที่ 4.5 (c) แสดงข้อมูลเฟสเต็มรูป ซึ่งเป็นเฟสที่ถูกปรับแก้ความไม่ต่อเนื่องอันเนื่องมาจากฟังก์ชันอาร์คแทน จนได้ค่าเฟสใหม่ที่มีความต่อเนื่อง สุดท้ายโปรแกรมจะคำนวณหาค่าความสูงของพื้นผิวและแสดงผลออกมาที่หน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้นอกจากนี้ในสคริปต์ไฟล์ main2.m ยังมีขั้นตอนในการปรับแต่งภาพอินเทอร์เฟอแกรมเนื่องจากภาพอินเทอร์เฟอแกรมที่นำมาวิเคราะห์หาความเรียบของพื้นผิวหลังจากคำนวณหาค่าเฟสเรียบร้อยแล้วจะมีความบกพร่องเนื่องจากพิกเซลที่เป็นสัญญาณรบกวนอยู่ที่พื้นหลัง ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้วิธีจำกัดค่าขีดเริ่ม (threshold) ให้พิกเซลที่มีค่าระดับสีมากกว่าค่าขีดเริ่มเป็นสีดำเท่านั้น เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนบางส่วนออกไป ทำให้ได้ภาพที่คมชัดมากขึ้น ซึ่งต่อไปจะเรียกว่าการทำเทรซโฮลด์ ลักษณะของข้อมูลของอินเทอร์เฟอแกรมก่อนและหลังจากการใช้วิธีการเทรซโฮลด์ แสดงดังภาพที่ 4.6

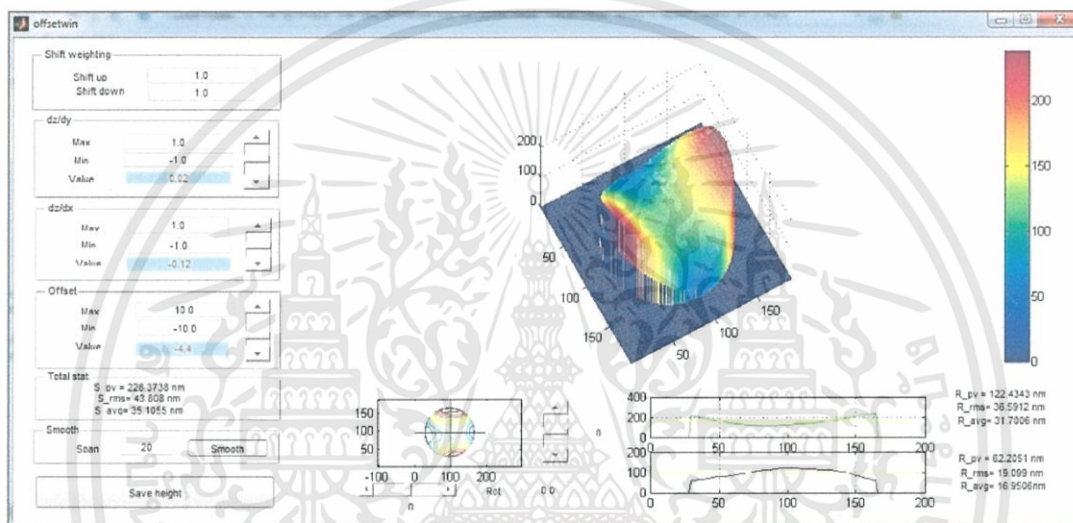


ภาพที่ 4.6 การทำเทรซโฮลด์เพื่อปรับสีพื้นหลังของภาพ และกำจัดสัญญาณรบกวนเบื้องต้น
(a) ข้อมูลเฟสก่อนเทรซโฮลด์
(b) ข้อมูลเฟสหลังเทรซโฮลด์

หลังจากโปรแกรม main2.m จบการทำงาน หน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้ offsetwin.fig จะถูกเรียก ขึ้นอัตโนมัติ หน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้ offsetwin.fig จะแสดงผลลัพธ์จากการประมวลผลภาพอินเตอร์เฟียรแกรมเพื่อให้ผู้ใช้งานได้ทำการปรับค่ามุมมองต่างๆของภาพได้ตามต้องการ

4.1.3 หน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้ offsetwin.fig

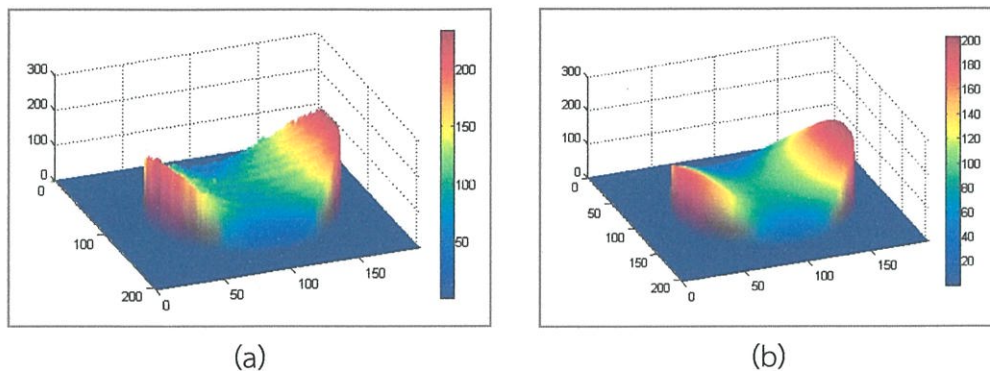
หน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้ offsetwin.fig จะแสดงค่าความสูงของพื้นผิว ค่าความขรุขระเฉลี่ย และค่าความขรุขระ RMS ซึ่งจะแสดงข้อมูลของทั้งภาพ และข้อมูลพื้นผิวที่อ่านได้จากเส้นตรงสัมผัสพื้นผิว 2 เส้นได้จากหน้าต่างนี้ โดยผู้ใช้งานสามารถปรับระดับ (offset) ของภาพ ในกรณีที่ภาพสามมิติแสดงได้ไม่สมบูรณ์หรือไม่ไต่ระดับ และสามารถเลื่อนปรับแนวของเส้นสัมผัสพื้นผิวให้ลากผ่านจุดที่ต้องการดูข้อมูลพื้นผิวได้อีกด้วย โดยหน้าจอ offsetwin.fig แสดงดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4. 7 ภาพหน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้ offsetwin.fig แสดงการจำลองโครงสร้างสามมิติของพื้นผิว

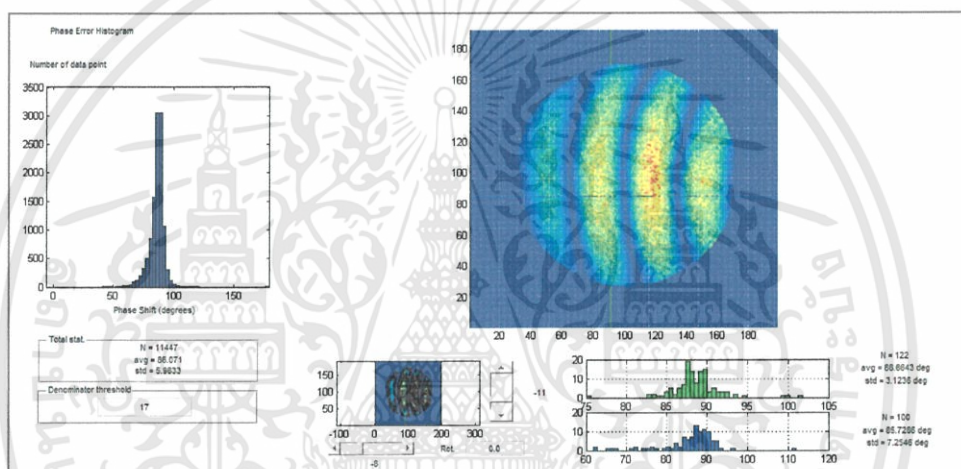
หน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้ offsetwin.fig สามารถปรับระดับของภาพและปรับมุมมองการแสดงผลได้ดังนี้

1. ปรับระดับความเอียงและระดับอ้างอิงตามความเหมาะสม
2. ก่อนทำบันทึกผล สามารถปรับความเรียบโดยโปรแกรมจะทำการเกลี่ยภาพด้วยคำสั่ง Smooth
3. บันทึกผลด้วยการกดปุ่ม Save height
4. เมื่อต้องการแสดงกราฟพื้นผิว ให้โหลดข้อมูลไว้ใน Workspace จากนั้นแสดงข้อมูลพื้นผิวตามความต้องการ เช่น พื้นผิวที่ยังไม่ได้ทำการเกลี่ยภาพ ด้วยคำสั่ง `mesh(height.h)` ดังภาพที่ 4.8 (a) และ พื้นผิวที่ทำการเกลี่ยภาพแล้ว ด้วยคำสั่ง `mesh(height.final)` ดังภาพที่ 4.8 (b)



ภาพที่ 4. 8 ผลการเกลี่ยภาพด้วยคำสั่ง Smooth (a) ก่อนเกลี่ยภาพ และ (b) หลังเกลี่ยภาพ

5. เมื่อต้องการทราบค่าความผิดพลาดในการเลื่อนเฟส ให้เรียกคำสั่ง pewin (sgCI1, sgCI2, sgCI3, sgCI4, sgCI5) จะปรากฏหน้าต่างติดต่อผู้ใช้ pewin.fig ขึ้นมาดังภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4. 9 ภาพหน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้ pewin.fig แสดงค่าความผิดพลาดในการเลื่อนเฟส

หน้าต่างติดต่อผู้ใช้ pewin.fig จะแสดงแผนภาพฮิสโตแกรมของการเลื่อนเฟสและแสดงข้อมูลจำนวนพิกเซลทั้งหมดที่นำมาวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดจากการเลื่อนเฟส ค่าการเลื่อนเฟสเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยแผนภาพฮิสโตแกรมจะสามารถบอกได้ว่าข้อมูลส่วนใหญ่เป็นอย่างไรทำให้ทราบค่าความผิดพลาดในการเลื่อนเฟส ผู้ใช้งานสามารถทำการปรับค่าเทรชโฮลด์ได้ตามความเหมาะสม ผ่านทางหน้าต่างนี้ การปรับค่าเทรชโฮลด์จะมีผลต่อจำนวนของข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ ซึ่งค่าความผิดพลาดของการเลื่อนเฟสจะแปรผันตรงกับจำนวนข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ ถ้าจำนวนข้อมูลน้อยค่าความผิดพลาดที่คำนวณก็จะน้อย ถ้าจำนวนข้อมูลมาก ความผิดพลาดที่คำนวณได้ก็จะมีค่ามาก


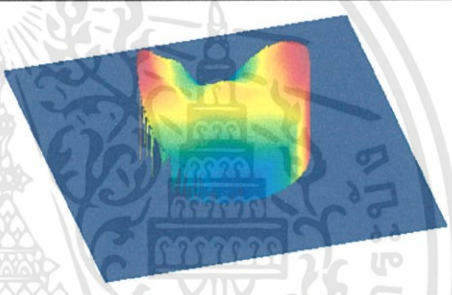
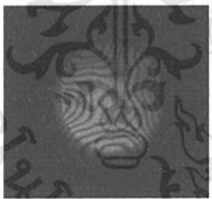
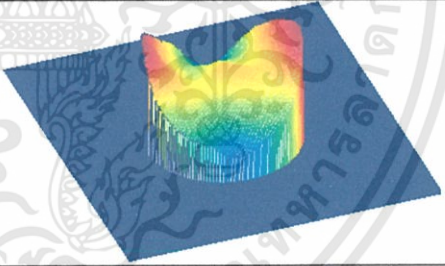
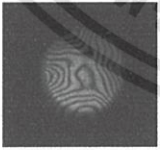
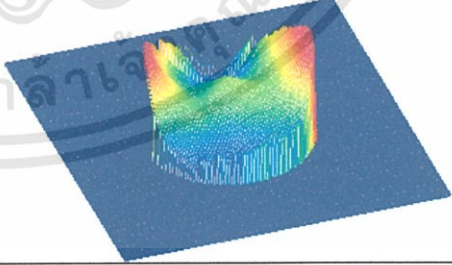

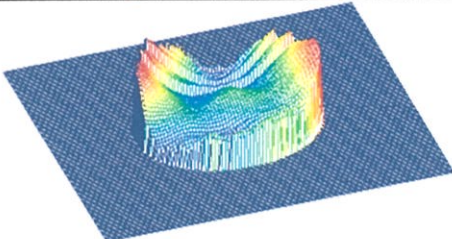
4.2 ผลของการปรับค่าตัวแปรในโปรแกรมสร้างภาพจำลองโครงร่างพื้นผิว

การศึกษการปรับค่าตัวแปรของโปรแกรมที่ใช้จำลองโครงร่างสามมิติของพื้นผิวจากอินเตอร์ฟิรอมแกรมเพื่อศึกษาผลกระทบระหว่างค่าตัวแปรต่อภาพจำลองพื้นผิว โดยจะใช้ตัวอย่าง Microscope Slide A เป็นพื้นผิวทดลองและให้ตัวแปรต่าง ๆ ของโปรแกรมเป็นปัจจัยสำหรับการศึกษผลกระทบต่อภาพจำลองพื้นผิว

4.2.1 จำนวนช่วงพิกเซล (Span)

การลดจำนวนพิกเซลหรือการลดขนาดของภาพอินเตอร์เฟโรแกรมโดยวิธีการสุ่มข้อมูลความเข้มแสงนั้นเป็นอีกขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญ เนื่องจากการถ่ายภาพที่มีความละเอียดมากทำให้จำนวนข้อมูลมีมาก จึงส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการประมวลผลของเครื่องคอมพิวเตอร์ ทำให้การจำลองโครงสร้างพื้นผิวเป็นไปอย่างยากลำบากและล่าช้า การลดขนาดภาพทำให้มีข้อมูลหรือจำนวนพิกเซลน้อยลง จะลดช่วยความหน่วงในการปรับมุมมองภาพ และการแสดงผลภาพในแต่ละขั้นตอน ซึ่งการลดจำนวนพิกเซลนี้ ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อความเรียบของพื้นผิวแต่อย่างใด โดยผลลัพธ์ของการทดลองปรับลดจำนวนพิกเซลแสดงดังตารางที่ 4. 1 เมื่อ Threshold = 5 หมายถึงพิกเซลที่มีค่ามากกว่า 5 ให้เป็นสีดำเสมอจะทำให้พื้นหลังเป็นสีดำ และ Span หมายถึงจำนวนข้อมูลที่ต้องการสุ่ม

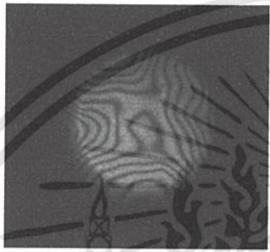
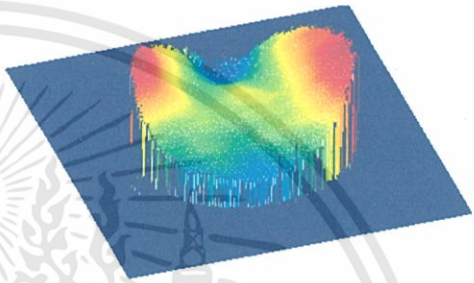

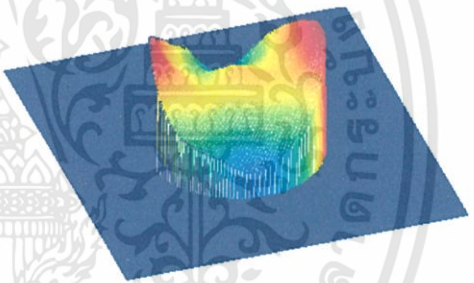
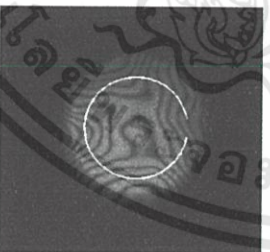
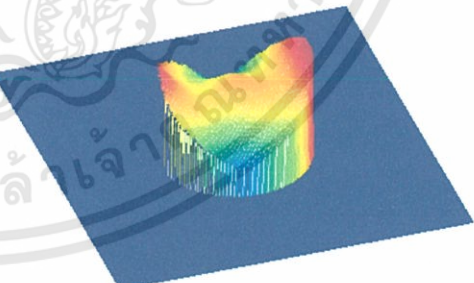
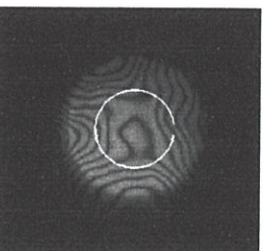
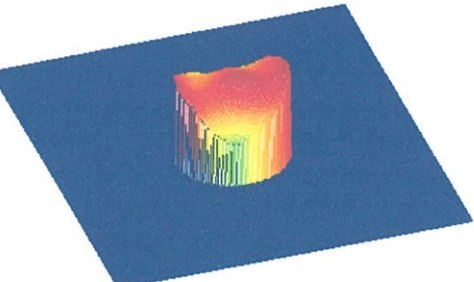
ตารางที่ 4. 1 ผลของจำนวนช่วงพิกเซล ที่ใช้สุ่มข้อมูลความเข้มแสงในขั้นตอนการลดขนาดภาพ

ปัจจัยคงที่	Radius = ประชิดขอบภาพ ; Threshold = 5	
Span	ภาพที่ผ่านการลดขนาด	ภาพจำลองพื้นผิว
Span = 5	 459 x 488	
Span = 10	 229 x 244	
Span = 15	 153 x 162	
Span = 20	 114 x 122	

4.2.2 ขนาดขอบเขตที่ใช้ตัดขอบภาพอินเตอร์ฟีรแกรม

ในขั้นตอนแรกที่ยังไม่ได้ทำการทดลองตัดขอบวงกลม พบว่าเกิดสัญญาณรบกวนที่มาจากการฟู้งกระจายของเม็ดสีที่ขอบภาพเมื่อจำลองโครงร่างพื้นผิวสามมิติ การตัดขอบแบบวงกลมนี้จึงช่วยในการลดสัญญาณรบกวนที่มาจากขอบภาพ ทำให้ขอบภาพคมชัดมากขึ้น ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองตัดขอบวงกลมโดยการกำหนดรัศมีวงกลมที่ต้องการตัด แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4. 2 ขนาดขอบเขตที่มีผลต่อการประเมินค่าโครงร่างพื้นผิว เมื่อ Span = 10 ; Threshold = 5

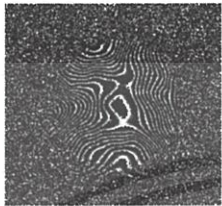
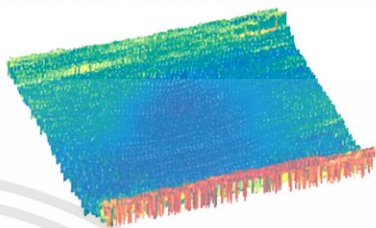
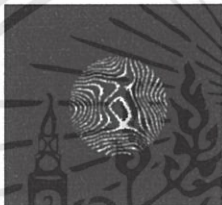
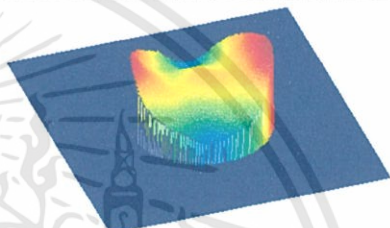




Radius	ตำแหน่งตัดภาพ	ภาพจำลองพื้นผิว
ไม่ตัดภาพ		
R = 55		
R = 48		
R = 37		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ระดับค่าขีดเริ่มสำหรับการปรับสีพื้นหลัง

การกำจัดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากพิกเซลของพื้นหลังและทำให้พื้นหลังเป็นสีดำเป็นตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลของระดับค่าขีดเริ่ม (background threshold) ในการปรับสีพื้นหลังให้เป็นสีดำที่มีต่อผลการمينเค้าโครงร่างของพื้นผิว เมื่อ Span = 10 และ Radius = 55

Threshold	ภาพของข้อมูล Phase ก่อน Unwrapping	ภาพจำลองพื้นผิว
ไม่ปรับพื้นหลัง		
Th = 5		
Th = 50		
Th = 100		

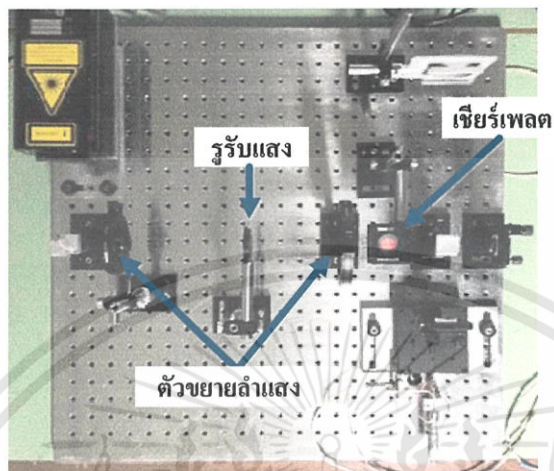
โปรแกรมวิเคราะห์และจำลองโครงร่างสามมิติของพื้นผิวทั้งหมด ได้มีการออกแบบตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 และยังมีพัฒนาเพิ่มเติมอีกหลายครั้งเพื่อให้สามารถใช้งานได้ง่ายมากขึ้น โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้โปรแกรมวิเคราะห์และจำลองโครงร่างของพื้นผิวที่พัฒนาขึ้นนี้ในการวัดความเรียบของพื้นผิว Optical flat เพื่อสอบเทียบระบบไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์และ Microscope Slide ที่ใช้เป็นฐานรองของการปลูกฟิล์มบาง

4.3 ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

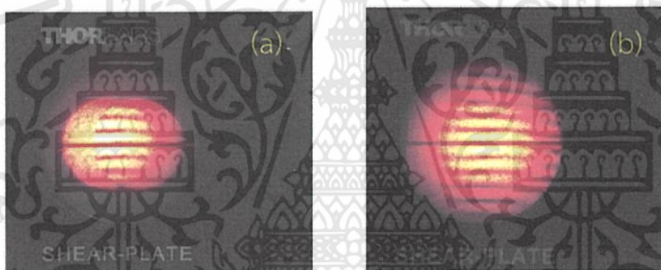
หลังจากที่ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์พร้อมด้วยชุดขับเคลื่อนเพียโซติดตั้งเสร็จเรียบร้อยแล้ว ความขนานของลำแสงจะถูกตรวจวัดด้วยเซียมเพลตอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ และ ประสิทธิภาพในการควบคุม Piezo-electric actuator โดยความถูกต้องในการขับเคลื่อนกระจกจะถูกตรวจสอบก่อนการนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่ลำแสงเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิด ลำแสงจะเคลื่อนที่เข้าสู่ชุดขยายลำแสง และถูกขยายให้มีขนาด \varnothing mm และเป็นลำแสงขนาน ความขนานของลำแสงจะถูกตรวจวัดด้วย เซียเพลตอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ซึ่งจะถูกติดตั้งลงในระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ดังภาพที่ 4.10 และ ผลการตรวจสอบความขนานของลำแสงด้วยเซียเพลตแสดงดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4. 10 เซียเพลตอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ถูกติดตั้งเข้ากับไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์



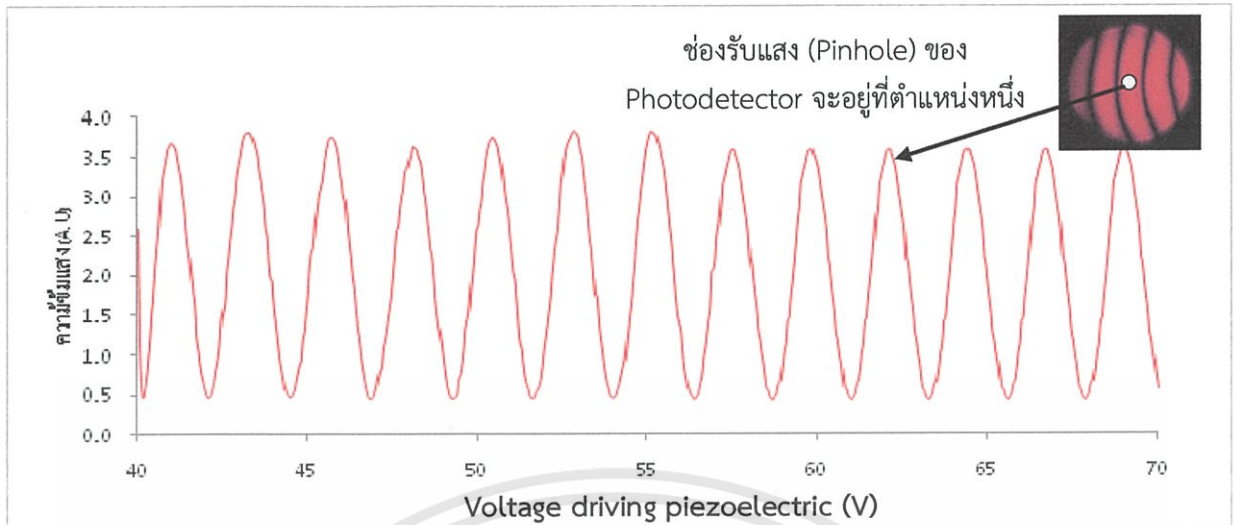
ภาพที่ 4. 11 ผลการวัดความขนานของลำแสง เมื่อ (a) เปิดรูดรับแสงบางส่วน (b) เปิดรูดรับแสงทั้งหมด

ภาพที่ 4.11 (a) เป็นผลการตรวจวัดความขนานของลำแสงเมื่อเปิดรูดรับแสงบางส่วน ลำแสงที่ออกมาจากเลนส์วัตถุจะถูกจำกัดความกว้างก่อนเข้าสู่เลนส์ภาพ โดยเซียเพลตจะแสดงริ้วแทรกสอดซึ่งซ้อนทับกันบางส่วน ริ้วแทรกสอดที่ปรากฏบนเซียเพลตเป็นเส้นตรงขนานกับเส้นอ้างอิงของเซียเพลต และในภาพที่ 4.11 (b) เมื่อการเปิดรูดรับแสงทั้งหมดลำแสงจะไม่ถูกจำกัดขนาด ทำให้เซียเพลตแสดงริ้วแทรกสอดของลำแสงที่ซ้อนทับกันทั้งหมด พบว่าริ้วแทรกสอดที่ปรากฏบนเซียเพลตเป็นเส้นตรงขนานกับเส้นอ้างอิงของเซียเพลตเช่นกัน ดังนั้นลำแสงที่เกิดจากตัวขยายลำแสงในอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์นี้ถือว่าเป็นลำแสงขนานและสามารถนำไปใช้งานได้

4.4 การควบคุมระยะกระจัดด้วยชุดขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริก

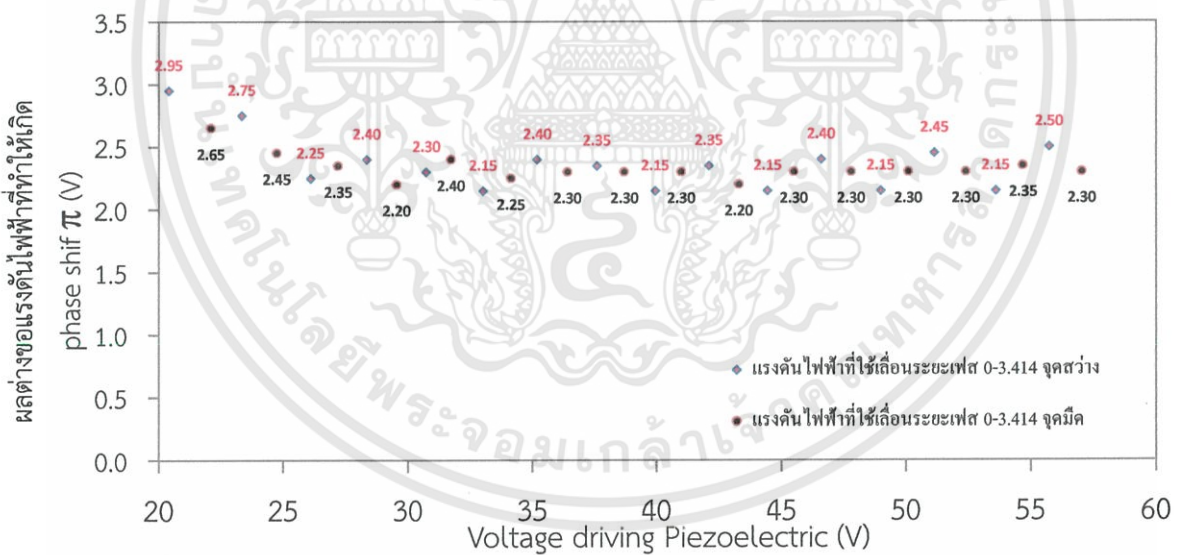
ในการเลื่อนกระจกนั้นเพื่อทำให้เกิดการเลื่อนระยะเฟส ซึ่งการเลื่อนไปของระยะดังกล่าวนั้นจะถูกควบคุมจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้แก่เพียโซอิเล็กทริก โดยในเบื้องต้นจำเป็นต้องทราบค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อป้อนให้แก่ผลึกเพียโซ โดยจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้แก่ผลึกเพียโซเพิ่มขึ้นตามเวลาครั้งละ 0.05 V แล้วทำการวัดค่าความเข้มแสงที่พิเซลหนึ่งบนรีจิสเตอร์แทรกสอด ความเข้มแสงจะถูกวัดด้วย Photodetector และถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำคอมพิวเตอร์ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

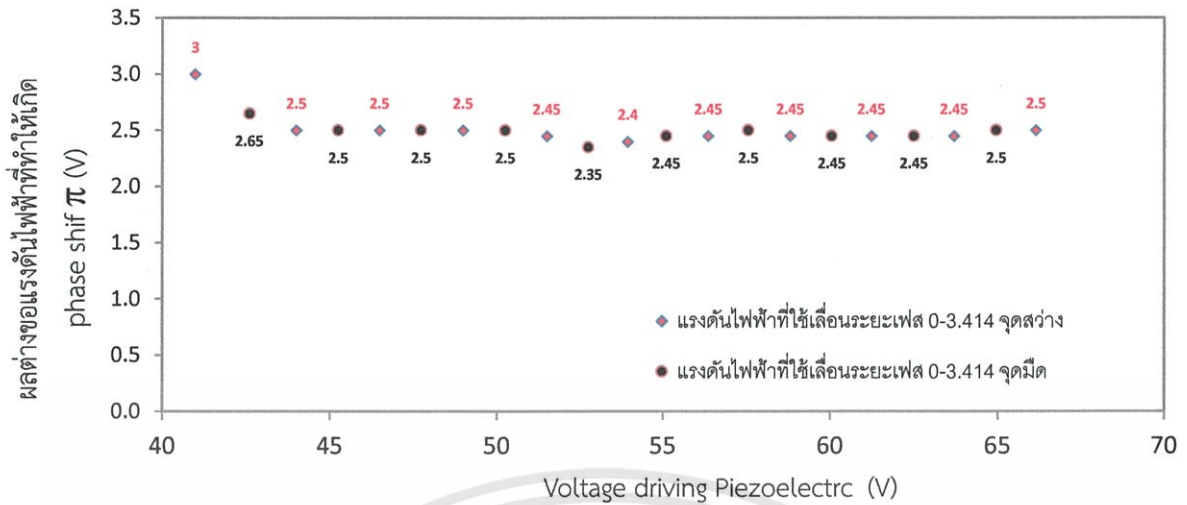


ภาพที่ 4. 12 ความเข้มแสงที่พิกเซลหนึ่งบนรีจิสเตอร์ทรานสดิวเซอร์ที่เปลี่ยนตามแรงดันไฟฟ้าของเพียโซ

ภาพที่ 4.13 และภาพที่ 4.14 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพียโซอิเล็กทริกที่เลื่อนระยะเฟสจาก 0 ถึง 2π ซึ่งพบว่าการจ่ายแรงดันไฟฟ้าช่วง 20 ถึง 60 V เพียโซอิเล็กทริกใช้แรงดันไฟฟ้าในการเลื่อนระยะเฟสจาก 0 ถึง 2π ไม่คงที่ จึงได้ทำการทดลองที่ค่าแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 40 ถึง 70 V เพียโซอิเล็กทริกใช้แรงดันไฟฟ้าในการเลื่อนระยะเฟสจาก 0 ถึง 2π คงที่มากกว่า ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อยู่ในช่วง 55 ถึง 70 V ในการควบคุมระยะกระจัดให้แก่เพียโซอิเล็กทริก

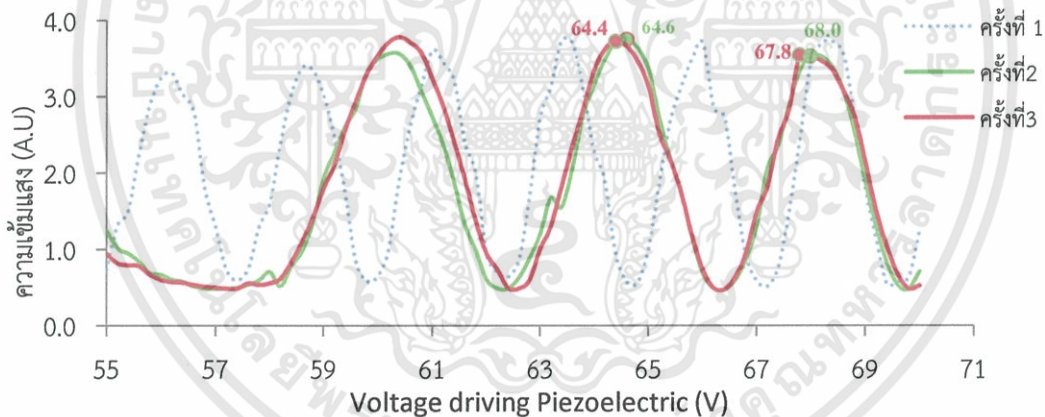


ภาพที่ 4. 13 แรงดันไฟฟ้าที่เลื่อนระยะเฟสจาก 0 ถึง 2π เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 20 ถึง 60 V



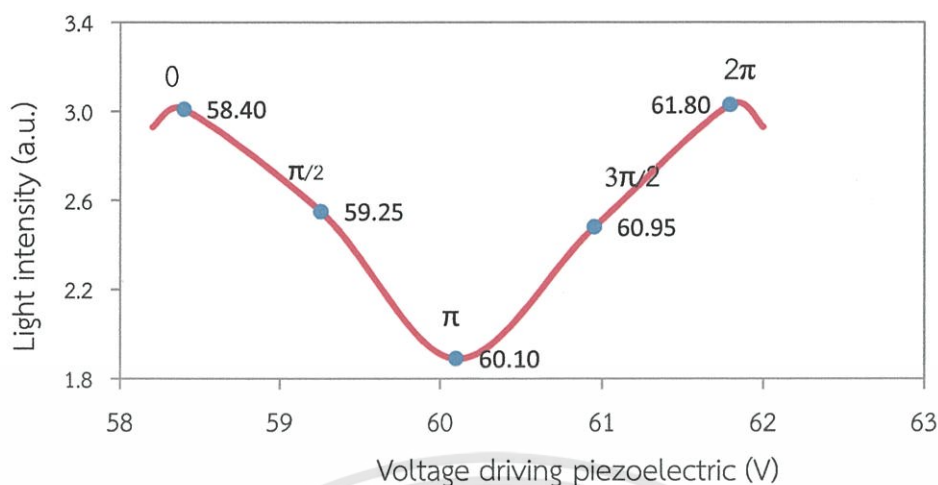
ภาพที่ 4. 14 แรงดันไฟฟ้าที่เลื่อนระยะเฟสจาก 0 ถึง 2π เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 40 ถึง 70 V

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองจ่ายค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง 55 ถึง 70 V หลายครั้ง พบว่าในครั้งแรกที่ใช้ งานเพียโซอิเล็กทริก ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เฟสเลื่อนระยะไปจาก 0 ถึง 2π มีค่าน้อยและไม่คงที่ แต่หลังจาก ที่เพียโซอิเล็กทริกมีการขยายไปแล้วอย่างน้อยหนึ่งครั้ง ค่าแรงดันที่ใช้เลื่อนเฟสจาก 0 ถึง 2π นั้นจะมากขึ้น และค่อนข้างคงที่ดังภาพที่ 4.15 ดังนั้นผู้วิจัยจะเริ่มทำการทดลองเลื่อนระยะการจัดของเพียโซอิเล็กทริกให้ ได้ตามที่ต้องการ หลังจากเพียโซอิเล็กทริกมีการขยายไปแล้วอย่างน้อยหนึ่งรอบ



ภาพที่ 4. 15 แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับ Piezoelectric ที่มีผลต่อการขับเคลื่อน

การเลื่อนตำแหน่งของพื้นผิวอ้างอิงในไมโครสแกนอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เพื่อวัดความเรียบของพื้นผิวใน งานวิจัยนี้ จะแบ่งเป็น 5 ระยะคือ 0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$ และ 2π ตามระเบียบวิธี Hariharan ที่ได้ศึกษามาก่อน หน้านี้ ผลการทดลองพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้มีค่าประมาณ 3.4 V ดังนั้นจะทำการส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ออกเป็น 5 ระยะ ๆ ละ 0.85 V ทำให้เฟสเลื่อนไปตามลำดับดังภาพที่ 4. 16 จากนั้นจะมีการบันทึกภาพ อินเตอร์เฟอโรแกรมเพื่อวิเคราะห์หาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับความเรียบของพื้นผิวต่อไป



ภาพที่ 4. 16 แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับ Piezoelectric ที่ใช้เลื่อนระยะเฟสจาก 0 ถึง 2π

สำหรับหัวข้อถัดไปเป็นผลการประเมินค่าโครงสร้างจากพื้นผิวที่มีความเรียบทราบค่าด้วยกัน 2 แผ่น คือ Optical flat ที่มีความเรียบเป็น $\lambda/4$ และ $\lambda/10$ และจาก Microscope slide 2 ชั้น ที่ไม่ทราบค่าโครงสร้างของพื้นผิว คือ ชั้น A และ B ซึ่ง Microscope slide ทั้ง 2 ชั้น นี้ผลิตจากคนละบริษัท โดยใช้ optical flat ความเรียบ $\lambda/20$ เป็นพื้นผิวอ้างอิง

4.5 ค่าโครงสร้างพื้นผิวของ Optical flat $\lambda/4$ และ $\lambda/10$

วิธีการแทรกสอดที่เกิดจากการแทรกสอดกันของแสงสองลำในอินเตอร์เฟอโรแกรม หรืออินเตอร์เฟโรแกรมจะปรากฏอยู่บนฉากรับภาพ เมื่อมีการเลื่อนระยะกระจกอ้างอิงด้วยซอร์ฟแวร์ควบคุมเพียโซอิเล็กทริก วิธีการแทรกสอดจะค่อยๆเลื่อนไปตามระยะกระจัดที่เปลี่ยนแปลง อินเตอร์เฟอโรแกรมทั้ง 5 ภาพจะมีระยะผลต่างเฟสต่างกัน 90 องศา หรือ $\pi/2$ เรเดียน ในแต่ละเฟรมได้มีการคำนวณหาค่าความผิดพลาดในการเลื่อนเฟสที่เกิดขึ้นโดยแสดงผลในรูปของกราฟฮิสโตแกรม และอินเตอร์เฟอโรแกรมที่บันทึกจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการทางคณิตศาสตร์ เพื่อวิเคราะห์และจำลองพื้นผิวพร้อมทั้งแสดงค่าพารามิเตอร์ความหยาบผิว

การบันทึกภาพแทรกสอดที่เกิดขึ้นเมื่อมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้แก่เพียโซอิเล็กทริก 1 ครั้งจะทำการบันทึกภาพแทรกสอด 1 ภาพเป็นอินเตอร์เฟอโรแกรมลำดับที่ 1 ทำเช่นนี้จนถึงอินเตอร์เฟอโรแกรมลำดับที่ 5 ในแต่ละพื้นผิวจะทำการบันทึกอินเตอร์เฟอโรแกรมทั้งหมด 3 ชุด ในแต่ละชุดจะถูกวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดในการเลื่อนเฟส จากนั้นจึงประมวลผลภาพตามโปรแกรมวิเคราะห์ความเรียบของพื้นผิวซึ่งได้แก่ค่าเฟสจากระเบียบวิธี Hariharan การปรับแก้ข้อมูลเฟสด้วยการมอดูโล 2π และการทำ Unwrapping phase ข้อมูลเฟสที่ทำการคืนรูปเสร็จเรียบร้อยแล้วจะนำมาหาค่าความขรุขระ RMS (Rrms) ค่าความขรุขระเฉลี่ย (Ra) และค่าความสูงของพื้นผิว หรือ Peak-to-Valley (PV) โดยแผนภาพอินเตอร์เฟอโรแกรมถูกบันทึกด้วยกล้องถ่ายภาพรุ่น Canon EOS 450D ซึ่งมีกรตั้งค่าการใช้งานดังตารางที่ 4.4

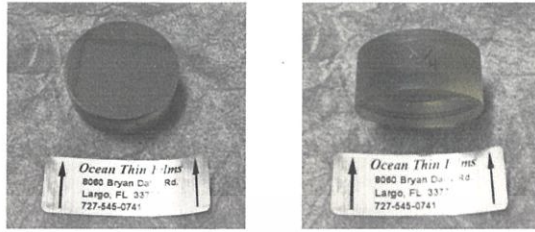
ตารางที่ 4.4 ค่าการใช้งานกล้อง Canon EOS 450D สำหรับบันทึกอินเตอร์เฟอโรแกรม

Camera Parameters	Setting Value
Shutter Speed	1/20 second
ISO Value	ISO100
Focal Length	8.0 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.1 ผลการวัดความเรียบของพื้นผิว Optical flat $\lambda/4$

Optical flat $\lambda/4$ ถูกใช้เป็นกระจกทดสอบในระบบไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ โดยมี Optical flat $\lambda/20$ เป็นพื้นผิวอ้างอิง

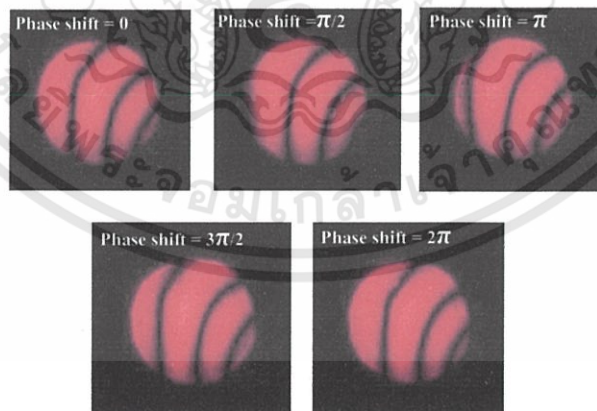


ภาพที่ 4. 17 กระจกทดสอบความเรียบ $\lambda/4$ ยี่ห้อ Ocean Thin films
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.6 mm

ผลการบันทึกอินเตอร์เฟอแกรมของ Optical flat $\lambda/4$ จากไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ ได้ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง หรือก็คือทำการบันทึกอินเตอร์เฟอแกรมทั้งหมด 3 ชุดแสดงดังภาพที่ 4.18 - ภาพที่ 4.20

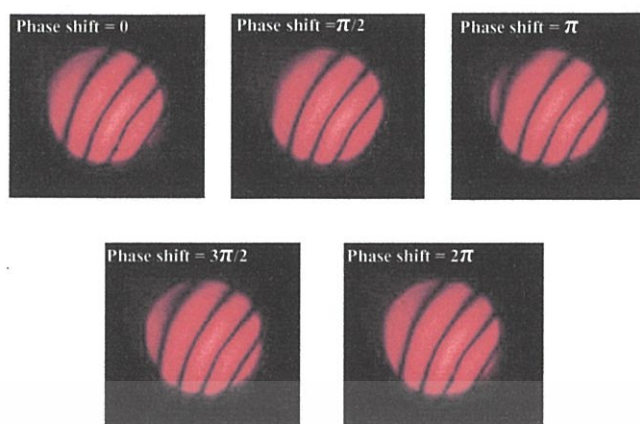


ภาพที่ 4. 18 อินเตอร์เฟอแกรมของ Optical flat $\lambda/4$ ชุดที่ 1



ภาพที่ 4. 19 อินเตอร์เฟอแกรมของ Optical flat $\lambda/4$ ชุดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

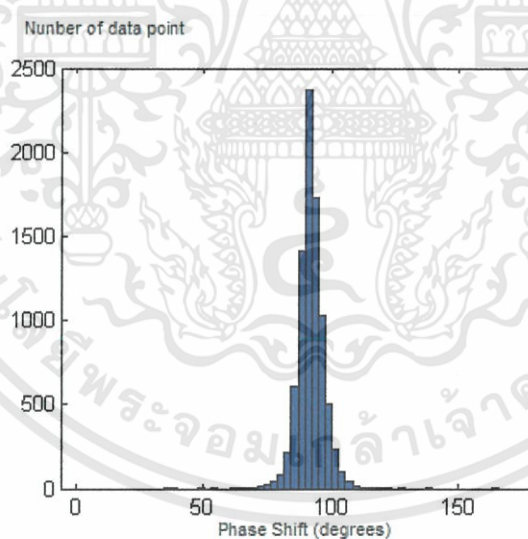


ภาพที่ 4. 20 อินเทอร์ฟีรแกรมของ Optical flat $\lambda/4$ ชุดที่ 3

ตารางที่ 4.5 ความผิดพลาดในการเลื่อนเฟส ในขณะที่ทำการวัดค่าโครงสร้างของ Optical flat $\lambda/4$

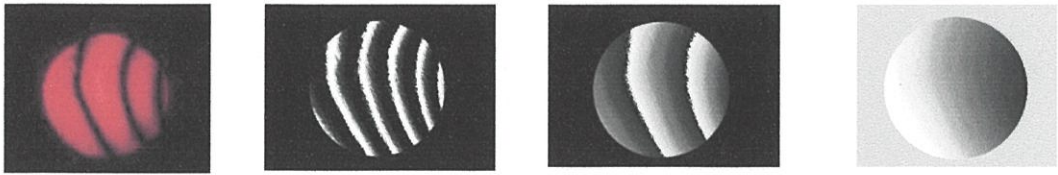
Interferograms	จำนวนจุดข้อมูล (Pixels)	Shifted phase (°)	S.D	Uncertainty
ชุดที่ 1	8,454	92.10	5.19	± 0.06
ชุดที่ 2	8,226	92.02	5.22	± 0.06
ชุดที่ 3	8,490	92.10	5.35	± 0.06
เฉลี่ย	8,390	92.07	5.25	± 0.06

ค่าความผิดพลาดในการเลื่อนเฟสของ Optical flat $\lambda/4$ แสดงดังภาพที่ 4.21



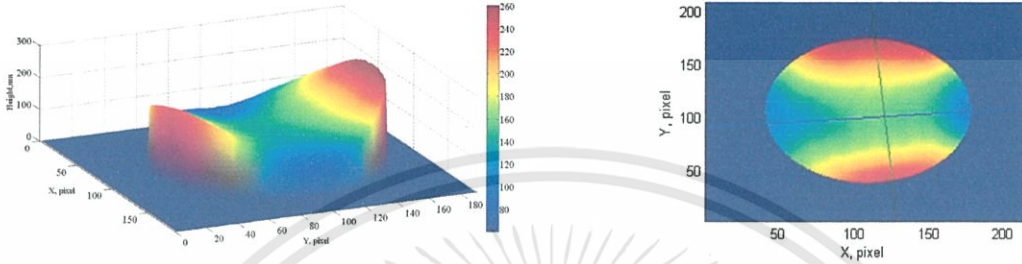
ภาพที่ 4. 21 การกระจายข้อมูลเฟสที่ถูกเลื่อนไปในขณะที่ทำการวัดพื้นผิวของ Optical flat $\lambda/4$

การประมวลผลอินเทอร์ฟีรแกรมชุดที่ 1 ของ Optical flat $\lambda/4$ ด้วยโปรแกรมตามระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ความเรียบของพื้นผิว แสดงดัง Error! Reference source not found. และผลการวิเคราะห์โครงสร้างสามมิติของพื้นผิวแสดงดังภาพที่ 4.23



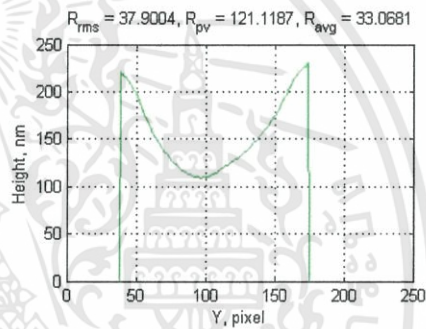
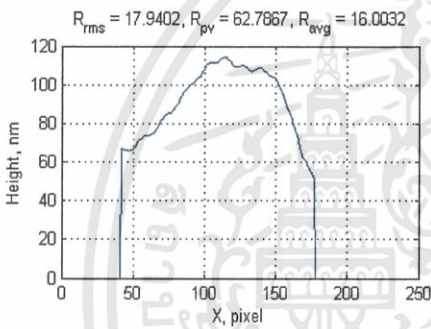
(a) อินเตอร์เฟอแกรม (b) ข้อมูลเฟส (c) เฟสมอดูลุโล 2π (d) Unwrapped Phase

ภาพที่ 4. 22 ผลการประมวล Interferograms ชุดที่ 1 ของ Optical flat $\lambda/4$



(a) 3D Surface Profile

(b) Evaluation of 2D roughness

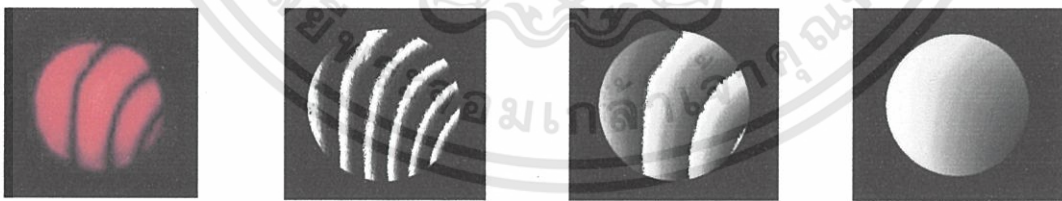


(c) Surface roughness จากเส้นลากตามแกน x

(d) Surface roughness จากเส้นลากแกน y

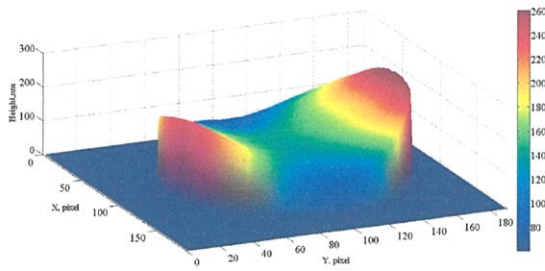
ภาพที่ 4. 23 ผลการประเมินความเรียบพื้นผิว Optical flat $\lambda/4$ โดยใช้ Interferograms ชุดที่ 1

การประมวลผลอินเตอร์เฟอแกรมชุดที่ 2 ของ Optical flat $\lambda/4$ แสดงดังภาพที่ 4.24 และผลการวิเคราะห์โครงสร้างสามมิติของพื้นผิวแสดงดังภาพที่ 4.25

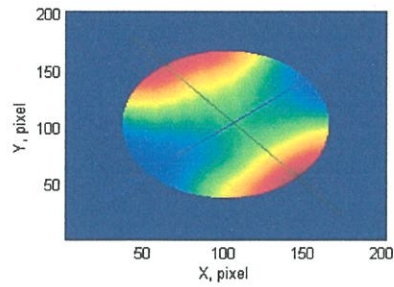


(a) อินเตอร์เฟอแกรม (b) ข้อมูลเฟส (c) เฟสมอดูลุโล 2π (d) Unwrapped Phase

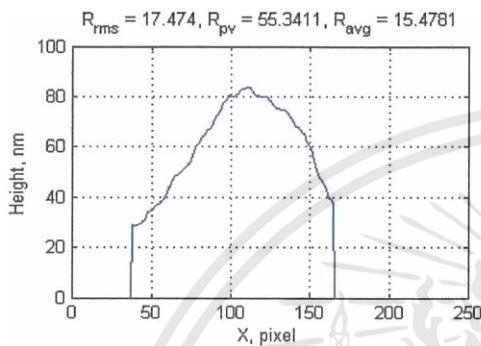
ภาพที่ 4. 24 ผลการประมวล Interferograms ชุดที่ 2 ของ Optical flat $\lambda/4$



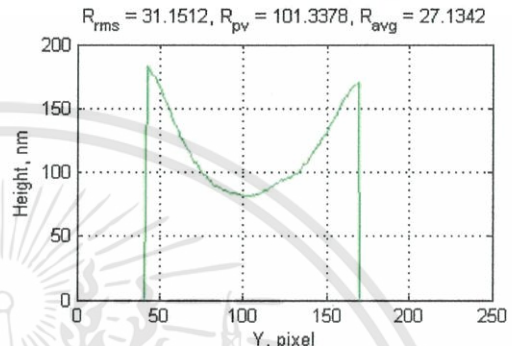
(a) 3D Surface Profile



(b) Evaluation of 2D roughness

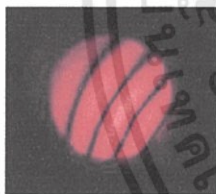


(c) Surface roughness จากเส้นลากตามแกน x



(d) Surface roughness จากเส้นลากแกน y

ภาพที่ 4. 25 ผลการประเมินความเรียบพื้นผิว Optical flat $\lambda/4$ โดยใช้ Interferograms ชุดที่ 2 การประมวลผลอินเทอร์ฟิรแกรมชุดที่ 3 ของ Optical flat $\lambda/4$ แสดงดังภาพที่ 4.26 และผลการวิเคราะห์โครงสร้างสามมิติของพื้นผิวแสดงดังภาพที่ 4.27



(a) อินเทอร์ฟิรแกรม



(b) ข้อมูลเฟส

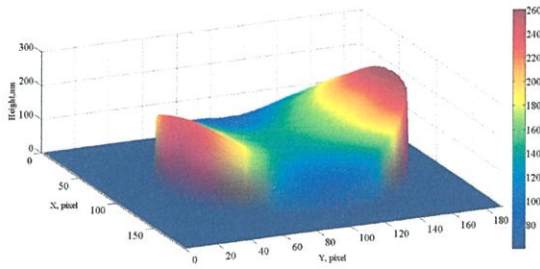


(c) เฟสมอดูล 2π

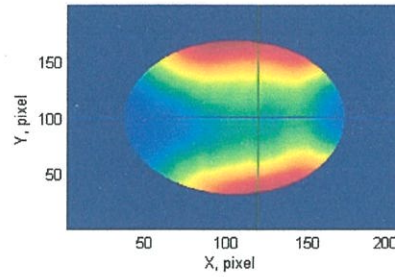


(d) Unwrapped Phase

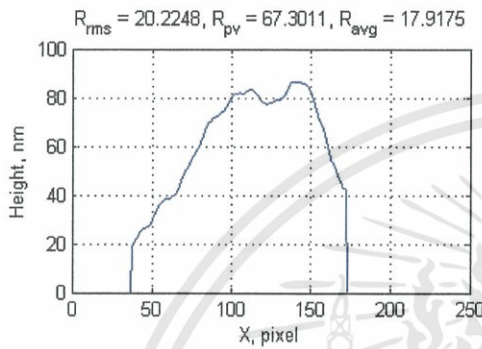
ภาพที่ 4. 26 ผลการประมวล Interferograms ชุดที่ 3 ของ Optical flat $\lambda/4$



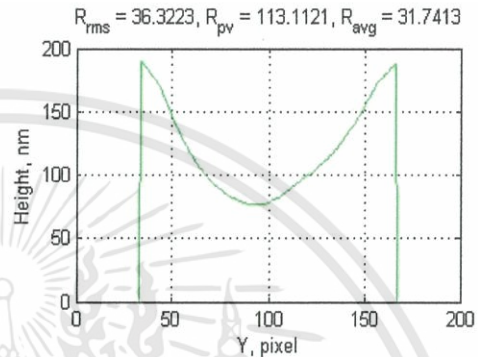
(a) 3D Surface Profile



(b) Evaluation of 2D roughness



(c) Surface roughness จากเส้นลากตามแกน x



(d) Surface roughness จากเส้นลากแกน y

ภาพที่ 4. 27 ผลการประเมินความเรียบพื้นผิว Optical flat $\lambda/4$ โดยใช้ Interferograms ชุดที่ 3 ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์ความหยาบผิวของ Optical flat $\lambda/4$ ตามแนวเส้นสัมผัส

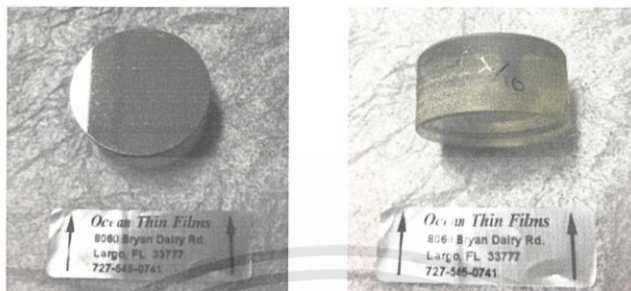
Interferograms	ตามแนวเส้นลากแกน x			ตามแนวเส้นลากแกน y		
	Rrms (nm)	Ra (nm)	PV (nm)	Rrms (nm)	Ra (nm)	PV (nm)
ชุดที่ 1	17.9	16.0	62.7	37.9	33.0	121.1
ชุดที่ 2	17.4	15.4	55.3	31.1	27.1	101.3
ชุดที่ 3	20.2	17.9	67.3	36.3	31.7	113.1

ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์ความหยาบผิวของ Optical flat $\lambda/4$ ทั้งพื้นผิว

Interferograms	Rrms (nm)	Ra (nm)	PV (nm)
ชุดที่ 1	43.5	34.9	231.6
ชุดที่ 2	44.4	35.5	238.8
ชุดที่ 3	43.6	33.5	241.1
เฉลี่ย	43.8	34.6	237.2
S.D	0.5	1.0	5.0
Uncertainty	± 0.3	± 0.6	± 2.9

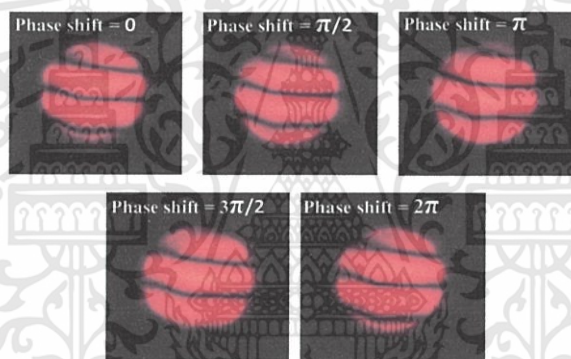
4.5.2 ผลการวัดความเรียบของพื้นผิว Optical flat $\lambda/10$

Optical flat $\lambda/10$ ถูกใช้เป็นกระจกทดสอบในระบบไมเคลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ โดยมี Optical flat $\lambda/20$ เป็นพื้นผิวอ้างอิง

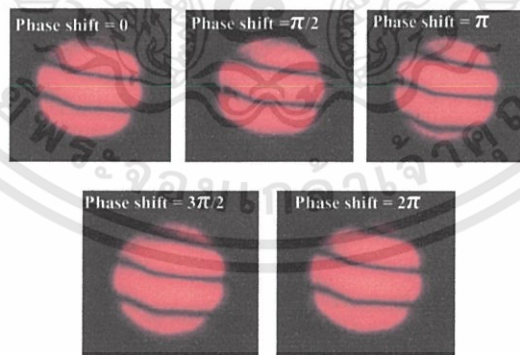


ภาพที่ 4. 28 Optical flat $\lambda/10$ ยี่ห้อ Ocean Thin films ขนาด $\text{Ø}25.6 \text{ mm}$

ผลการบันทึกอินเตอร์ฟีรแกรมของ Optical flat $\lambda/10$ จากไมเคลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์โดยทำการบันทึกอินเตอร์ฟีรแกรมทั้งหมด 3 ชุด แสดงดังภาพที่ 4.29 - ภาพที่ 4.31

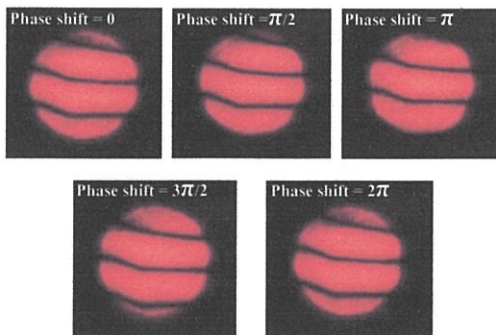


ภาพที่ 4. 29 อินเตอร์ฟีรแกรมของกระจกทดสอบความเรียบ $\lambda/10$ ชุดที่ 1



ภาพที่ 4. 30 อินเตอร์ฟีรแกรมของกระจกทดสอบความเรียบ $\lambda/10$ ชุดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

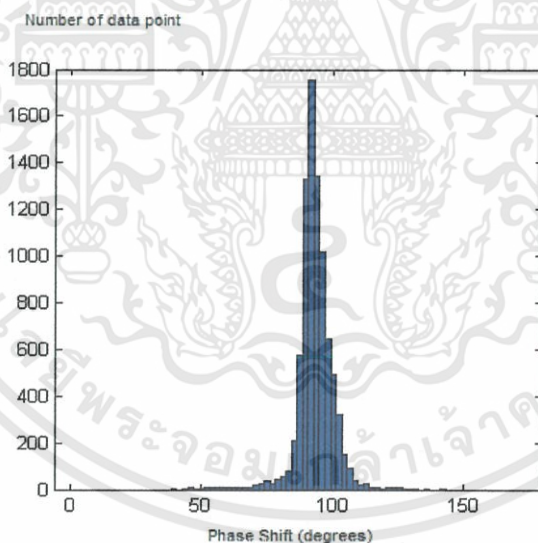


ภาพที่ 4. 31 อินเทอร์เฟอแกรมของกระจกทดสอบความเรียบ $\lambda/10$ ชุดที่ 3

ตารางที่ 4.8 ความผิดพลาดในการเลื่อนเฟส ในขณะที่ทำการวัดค่าโครงสร้างของ Optical flat $\lambda/10$

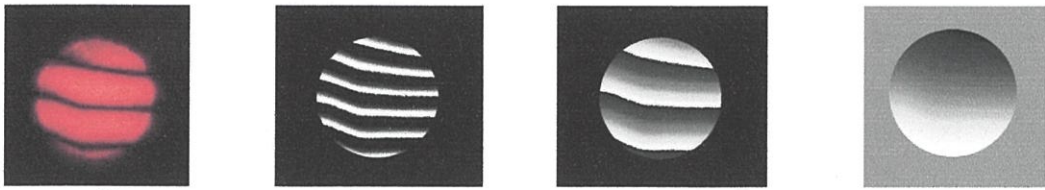
Interferograms	จำนวนจุดข้อมูล (Pixels)	Shifted Phase (°)	S.D	Uncertainty
ชุดที่ 1	8,318	86.65	4.31	± 0.05
ชุดที่ 2	8,468	93.41	7.12	± 0.08
ชุดที่ 3	8,372	84.98	6.18	± 0.07
เฉลี่ย	8,386	88.35	5.87	± 0.06

การกระจายข้อมูลของความผิดพลาดในการเลื่อนเฟสของ Optical flat $\lambda/10$ แสดงดังภาพที่ 4.32



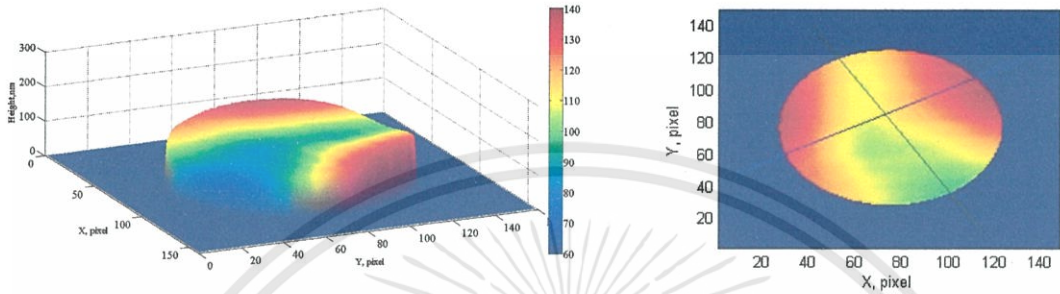
ภาพที่ 4. 32 การกระจายข้อมูลเฟสที่ถูกเลื่อนไปในขณะที่ทำการวัดพื้นผิวของ Optical flat $\lambda/10$

การประมวลผลอินเทอร์เฟอแกรมชุดที่ 1 ของ Optical flat $\lambda/10$ แสดงดังภาพที่ 4.33 และผลการวิเคราะห์โครงสร้างสามมิติของพื้นผิว แสดงดังภาพที่ 4.34



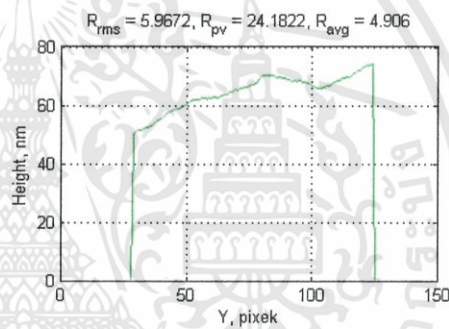
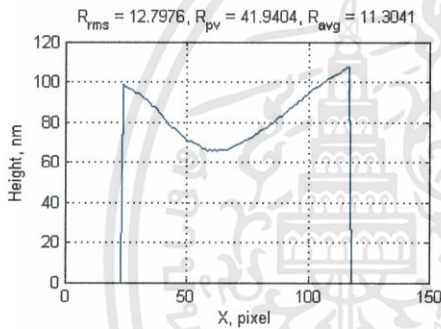
(a) อินเทอร์ฟีรแกรม (b) ข้อมูลเฟส (c) เฟสมอดูลุโ2π (d) Unwrapped Phase

ภาพที่ 4. 33 ผลการประมวล Interferograms ชุดที่ 1 ของ Optical flat $\lambda/10$



(a) 3D Surface Profile

(b) Evaluation of 2D roughness



(c) Surface roughness จากเส้นลากตามแกน x

(d) Surface roughness จากเส้นลากแกน y

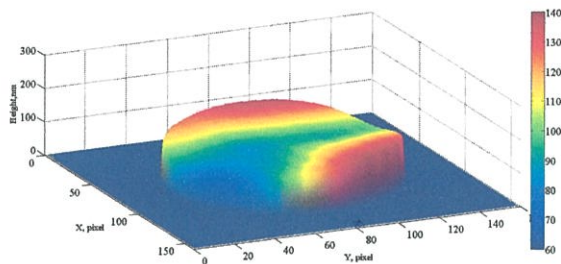
ภาพที่ 4. 34 ผลการประเมินความเรียบพื้นผิว Optical flat $\lambda/10$ โดยใช้ Interferograms ชุดที่ 1

การประมวลผลอินเทอร์ฟีรแกรมชุดที่ 2 ของ Optical flat $\lambda/10$ แสดงดังภาพที่ 4.35 และผลการวิเคราะห์โครงสร้างสามมิติของพื้นผิว แสดงดังภาพที่ 4.36

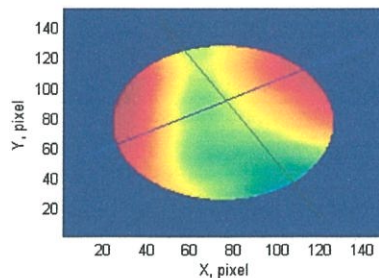


(a) อินเทอร์ฟีรแกรม (b) ข้อมูลเฟส (c) เฟสมอดูลุโ2π (d) Unwrapped Phase

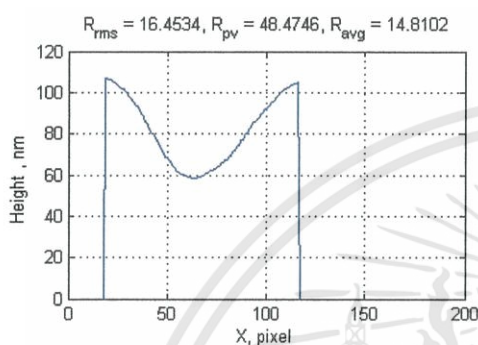
ภาพที่ 4. 35 ผลการประมวล Interferograms ชุดที่ 2 ของ Optical flat $\lambda/10$



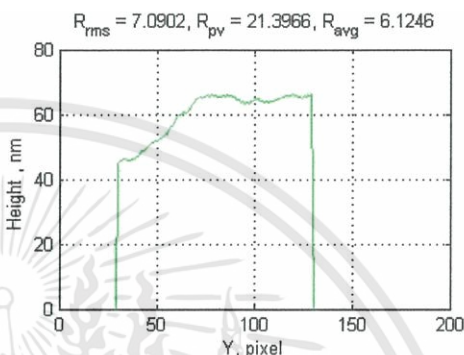
(a) 3D Surface Profile



(b) Evaluation of 2D roughness

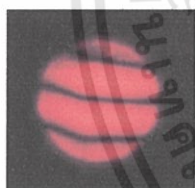


(c) Surface roughness จากเส้นลากตามแกน x



(d) Surface roughness จากเส้นลากแกน y

ภาพที่ 4. 36 ผลการประเมินความเรียบพื้นผิว Optical flat $\lambda/10$ โดยใช้ Interferograms ชุดที่ 2 การประมวลผลอินเตอร์เฟอแกรมชุดที่ 3 ของ Optical flat $\lambda/10$ แสดงดังภาพที่ 4.37 และผลการวิเคราะห์โครงสร้างสามมิติของพื้นผิว แสดงดังภาพที่ 4.38



(a) อินเตอร์เฟอแกรม



(b) ข้อมูลเฟส

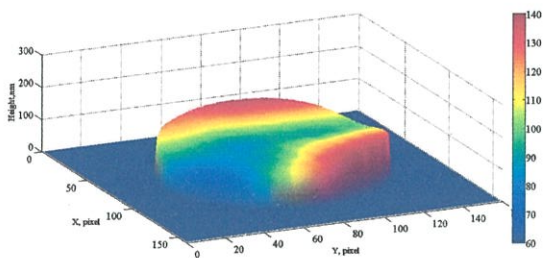


(c) เฟสมอดูลุโล 2π

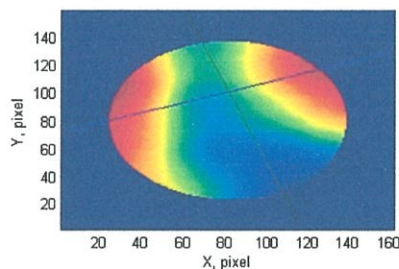


(d) Unwrapped Phase

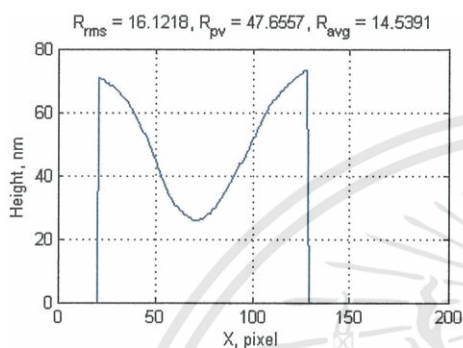
ภาพที่ 4. 37 ผลการประมวล Interferograms ชุดที่ 3 ของ Optical flat $\lambda/10$



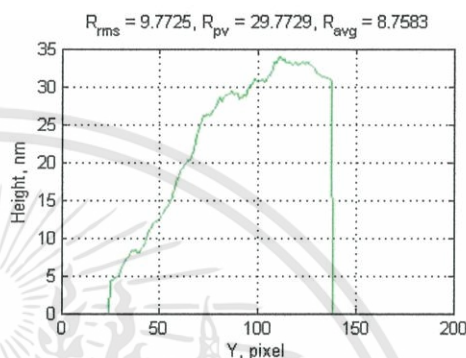
(a) 3D Surface Profile



(b) Evaluation of 2D roughness



(c) Surface roughness จากเส้นลากตามแกน x



(d) Surface roughness จากเส้นลากแกน y

ภาพที่ 4. 38 ผลการประเมินความเรียบพื้นผิว Optical flat $\lambda/10$ โดยใช้ Interferograms ชุดที่ 3 ตารางที่ 4.9 พารามิเตอร์ความหยาบผิวของ Optical flat $\lambda/10$ ตามแนวเส้นสัมผัส

Interferograms	ตามแนวเส้นลากแกน x			ตามแนวเส้นลากแกน y		
	Rrms (nm)	Ra (nm)	PV (nm)	Rrms (nm)	Ra (nm)	PV (nm)
ชุดที่ 1	12.7	11.3	41.9	5.9	4.9	24.1
ชุดที่ 2	16.4	14.8	48.4	7.0	6.1	21.3
ชุดที่ 3	16.1	14.5	47.6	9.7	8.7	29.7

ตารางที่ 4.10 พารามิเตอร์ความหยาบผิวของ Optical flat $\lambda/10$ ทั้งพื้นผิว

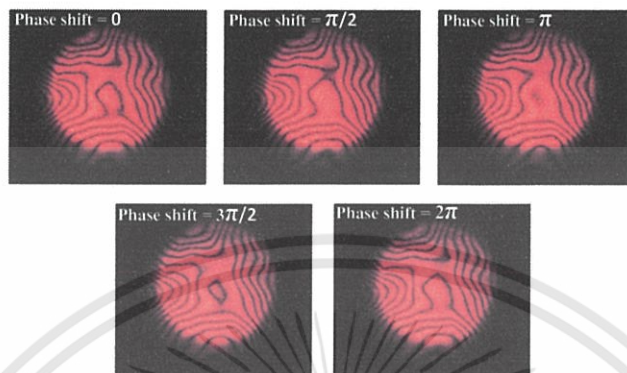
Interferograms	Rrms (nm)	Ra (nm)	PV (nm)
ชุดที่ 1	16.6	13.8	81.5
ชุดที่ 2	20.6	17.6	108.7
ชุดที่ 3	19.7	16.6	99.7
เฉลี่ย	19.0	16.0	96.6
S.D	2.1	2.0	13.9
Uncertainty	± 1.2	± 1.1	± 8.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

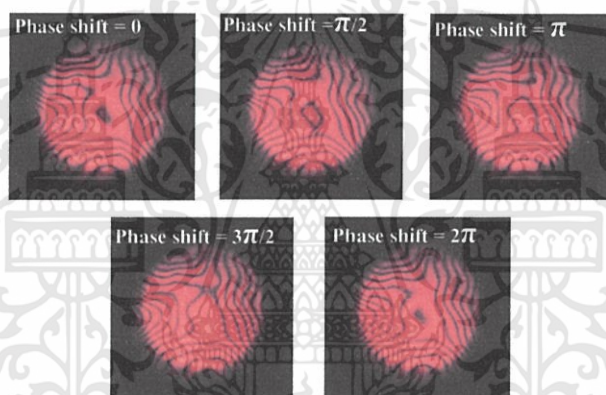
4.6 ผลการวัดความเรียบพื้นผิวของ Microscope Slide

4.6.1 อินเตอร์ฟีรแกรมของ Microscope Slide A

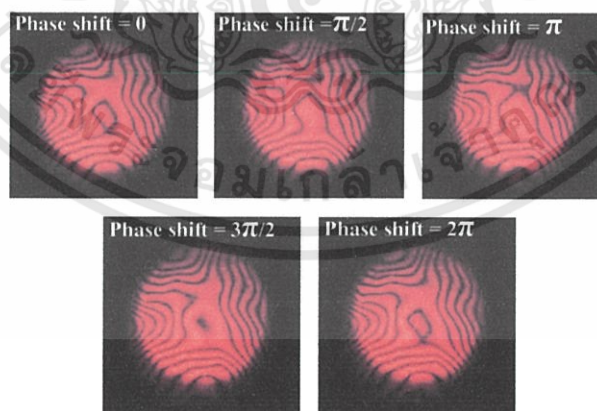
ผลการบันทึกอินเตอร์ฟีรแกรมของ Microscope Slide A ที่ใช้ Optical flat $\lambda/20$ เป็นพื้นผิวอ้างอิงจากไมเคลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์แสดงดังภาพที่ 4.39 - ภาพที่ 4.41



ภาพที่ 4. 39 อินเตอร์ฟีรแกรมของ Microscope Slide A จุดที่ 1



ภาพที่ 4. 40 อินเตอร์ฟีรแกรมของ Microscope Slide A จุดที่ 2



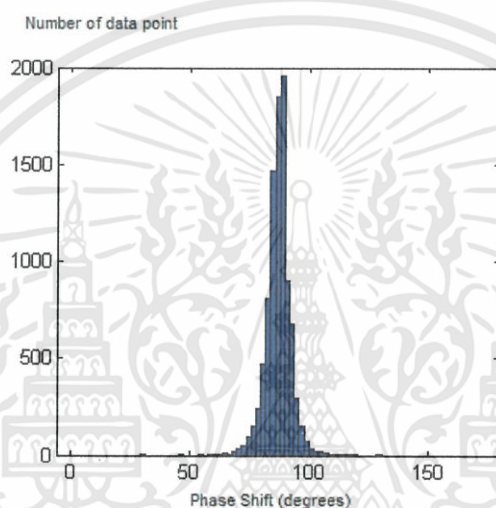
ภาพที่ 4. 41 อินเตอร์ฟีรแกรมของ Microscope Slide A จุดที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ความผิดพลาดในการเลื่อนเฟสของ Microscope Slide A

Interferograms	จำนวนจุดข้อมูล (Pixels)	Shifted Phase (°)	S.D	Uncertainty
ชุดที่ 1	8,154	82.51	7.91	±0.09
ชุดที่ 2	8,342	87.17	4.71	±0.05
ชุดที่ 3	8,340	87.56	2.65	±0.03
เฉลี่ย	8,278	85.75	5.09	±0.06

ค่าความผิดพลาดในการเลื่อนเฟสของ Microscope Slide A แสดงดังภาพที่ 4.42



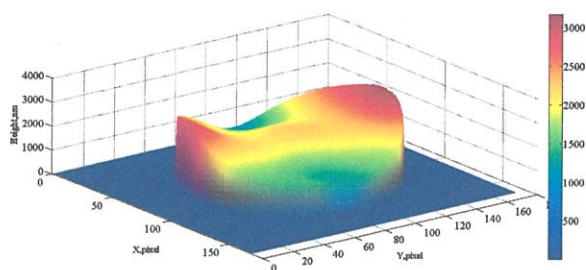
ภาพที่ 4.42 การกระจายข้อมูลเฟสที่ถูกเลื่อนไปในขณะที่ทำการวัดพื้นผิวของ Microscope Slide A

การประมวลผลอินเทอร์เฟอแกรมชุดที่ 1 ของ Microscope Slide A แสดงดังภาพที่ 4.43 และผลการวิเคราะห์โครงสร้างสามมิติของพื้นผิวแสดงดังภาพที่ 4.43

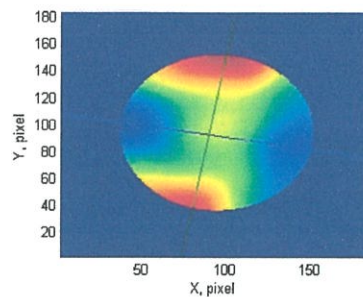


(a) อินเทอร์เฟอแกรม (b) ข้อมูลเฟส (c) เฟสมอดูลุโล 2π (d) Unwrapped Phase

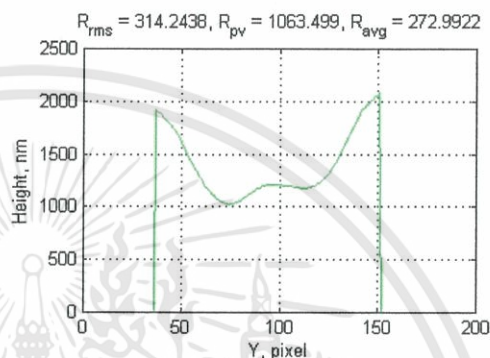
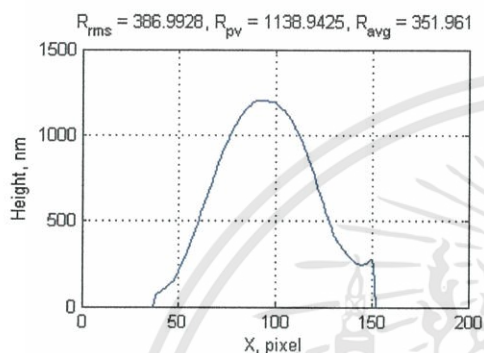
ภาพที่ 4.43 ผลการประมวล Interferograms ชุดที่ 1 ที่ได้จาก Microscope Slide A



(a) 3D Surface Profile



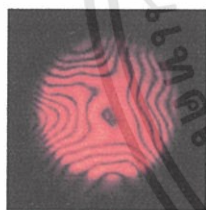
(b) Evaluation of 2D roughness



(c) Surface roughness จากเส้นลากตามแกน x

(d) Surface roughness จากเส้นลากแกน y

ภาพที่ 4. 44 ผลการประเมินความเรียบพื้นผิวของ Microscope Slide A โดยใช้ Interferograms ชุดที่ 1 การประมวลผลอินเทอร์เฟอแกรมชุดที่ 2 ของของ Microscope Slide A แสดงดังภาพที่ 4.45 และผลการวิเคราะห์โครงสร้างสามมิติของพื้นผิวแสดงดังภาพที่ 4.46



(a) อินเทอร์เฟอแกรม



(b) ข้อมูลเฟส

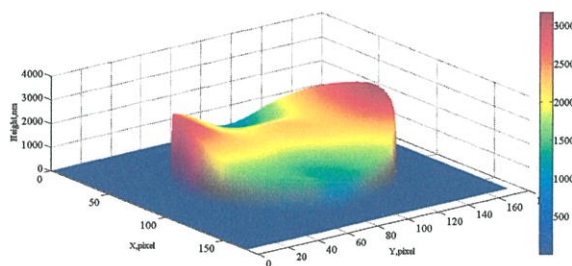


(c) เฟสมอดูลุโ2π

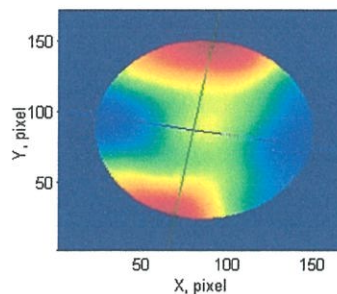


(d) Unwrapped Phase

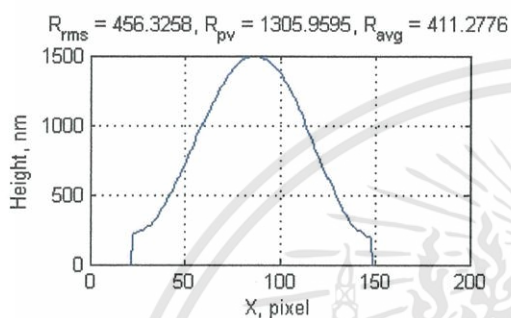
ภาพที่ 4. 45 ผลการประมวล Interferograms ชุดที่ 2 ที่ได้จาก Microscope Slide A



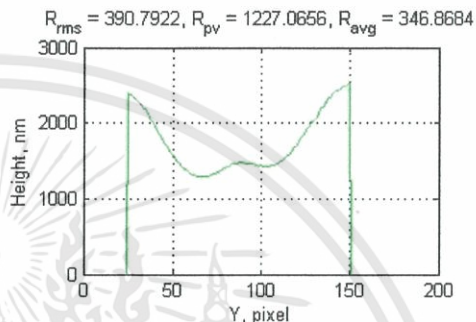
(a) 3D Surface Profile



(b) Evaluation of 2D roughness



(c) Surface roughness จากเส้นลากตามแกน x



(d) Surface roughness จากเส้นลากแกน y

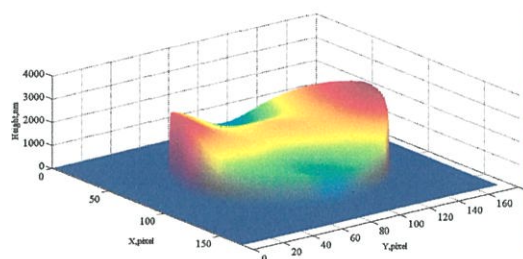
ภาพที่ 4. 46 ผลการประเมินความเรียบพื้นผิวของ Microscope Slide A โดยใช้ Interferograms ชุดที่ 2

การประมวลผลอินเตอร์เฟอแกรมชุดที่ 3 ของของ Microscope Slide A แสดงดังภาพที่ 4.47 และผลการวิเคราะห์โครงสร้างสามมิติของพื้นผิวแสดงดังภาพที่ 4.48

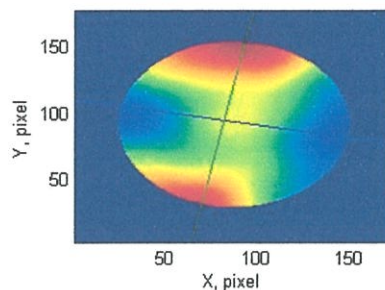


(a) อินเตอร์เฟอแกรม (b) ข้อมูลเฟส (c) เฟสมอดุโล 2π (d) Unwrapped Phase

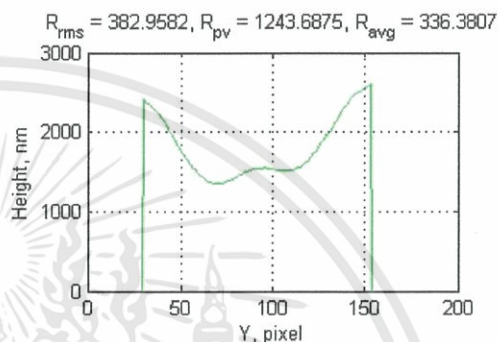
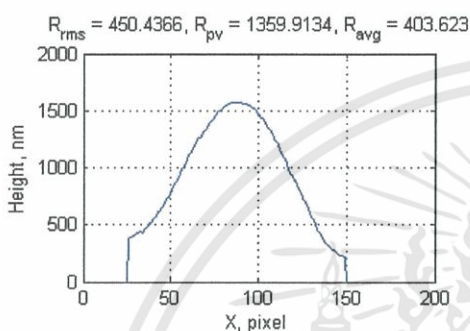
ภาพที่ 4. 47 ผลการประมวล Interferograms ชุดที่ 3 ที่ได้จาก Microscope Slide A



(a) 3D Surface Profile



(b) Evaluation of 2D roughness



(c) Surface roughness จากเส้นลากตามแกน x (d) Surface roughness จากเส้นลากแกน y
 ภาพที่ 4. 48 ผลการประเมินความเรียบพื้นผิวของ Microscope Slide A โดยใช้ Interferograms ชุดที่ 3
 ตารางที่ 4.12 พารามิเตอร์ความหยาบผิวของ Microscope Slide A ตามแนวเส้นสัมผัส

Interferograms	ตามแนวเส้นลากแกน x			ตามแนวเส้นลากแกน y		
	Rrms (nm)	Ra (nm)	PV (nm)	Rrms nm)	Ra (nm)	PV (nm)
ชุดที่ 1	386.9	351.9	1,138.9	314.2	272.9	1,063.4
ชุดที่ 2	456.3	411.2	1,305.9	390.7	346.8	1,227.0
ชุดที่ 3	450.4	403.6	1,359.9	382.9	336.3	1,243.6

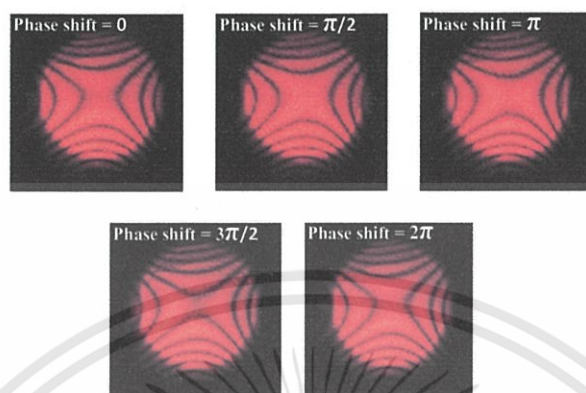
ตารางที่ 4.13 พารามิเตอร์ความหยาบผิวของ Microscope Slide A ทั้งพื้นผิว

Interferograms	Rrms (μm)	Ra (μm)	PV (μm)
ชุดที่ 1	0.5857	0.462	2.6697
ชุดที่ 2	0.5632	0.441	2.5435
ชุดที่ 3	0.5645	0.4433	2.5517
เฉลี่ย	0.5711	0.4488	2.5883
S.D	0.0126	0.0115	0.0706
Uncertainty	± 0.0073	± 0.0066	± 0.0408

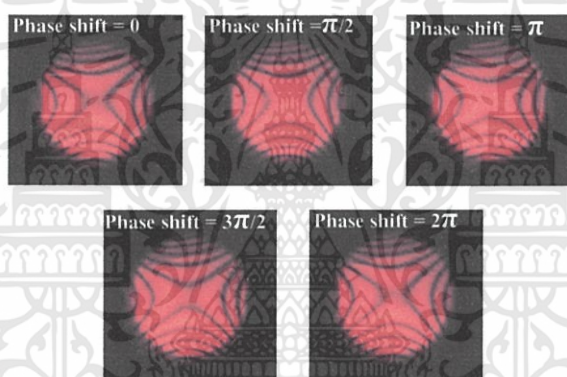
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2 ภาพถ่ายรีการแทรกสอดของแสงของ Microscope Slide B

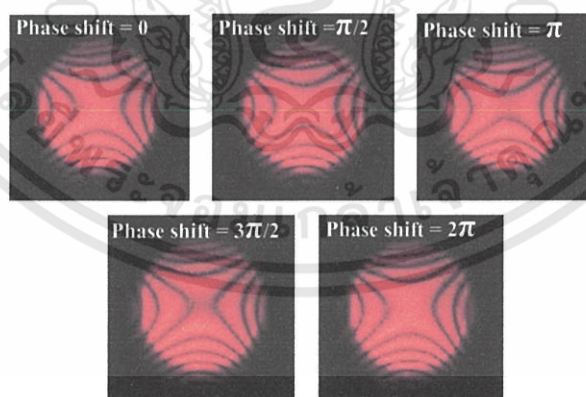
ผลการบันทึกอินเตอร์เฟอแกรมของ Microscope Slide B ที่ใช้ Optical flat $\lambda/20$ เป็นพื้นผิวอ้างอิง จากไมเคลสันอินเตอร์เฟอมิเตอร์แสดงดังภาพที่ 4.49 - ภาพที่ 4.51



ภาพที่ 4. 49 อินเตอร์เฟอแกรมของ Microscope Slide B ชุดที่ 1



ภาพที่ 4. 50 อินเตอร์เฟอแกรมของ Microscope Slide B ชุดที่ 2



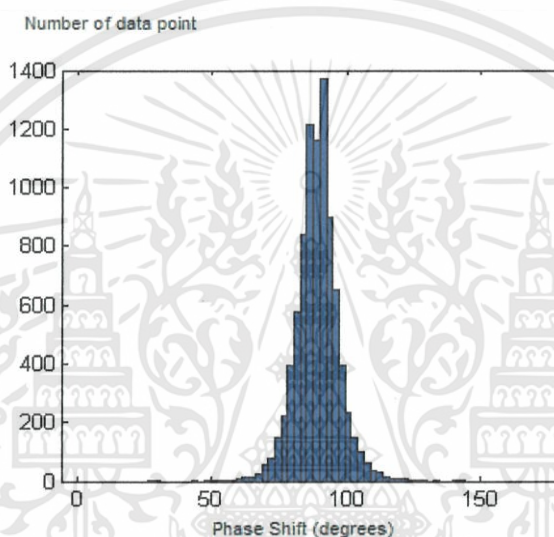
ภาพที่ 4. 51 อินเตอร์เฟอแกรมของ Microscope Slide B ชุดที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

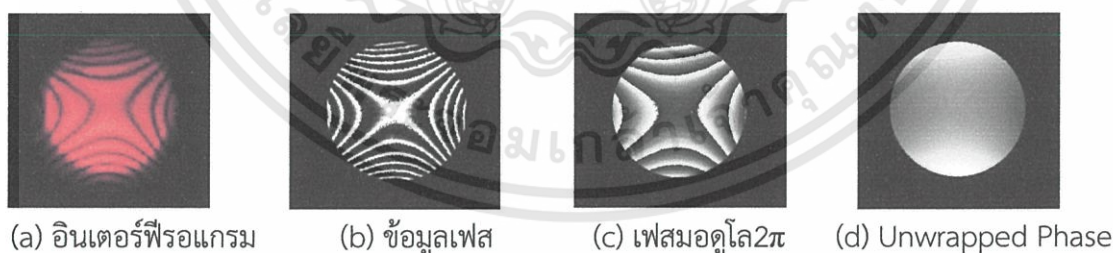
ตารางที่ 4.14 ความผิดพลาดในการเลื่อนเฟสจากอินเตอร์เฟอแกรมของ Microscope Slide B

Interferograms	จำนวนจุดข้อมูล (Pixels)	Shifted Phase (°)	S.D	Uncertainty
ชุดที่ 1	8,729	89.02	7.82	±0.08
ชุดที่ 2	8,722	91.15	3.55	±0.04
ชุดที่ 3	8,854	88.77	5.78	±0.06
เฉลี่ย	8,768	89.65	5.72	±0.06

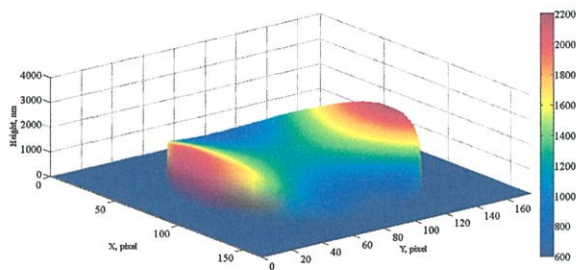
ค่าความผิดพลาดในการเลื่อนเฟสของ Microscope Slide A แสดงดังภาพที่ 4.52



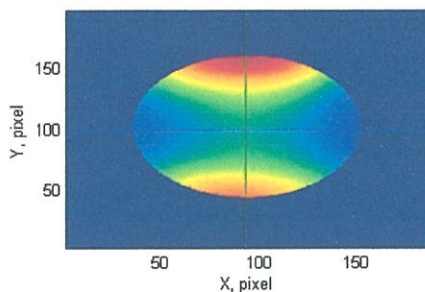
ภาพที่ 4. 52 การกระจายข้อมูลเฟสที่ถูกเลื่อนไปในขณะที่ทำการวัดพื้นผิวของ Microscope Slide B การประมวลผลอินเตอร์เฟอแกรมชุดที่ 1 ของ Microscope Slide B แสดงดังภาพที่ 4.53 และผลการวิเคราะห์โครงสร้างสามมิติของพื้นผิว แสดงดังภาพที่ 4.54



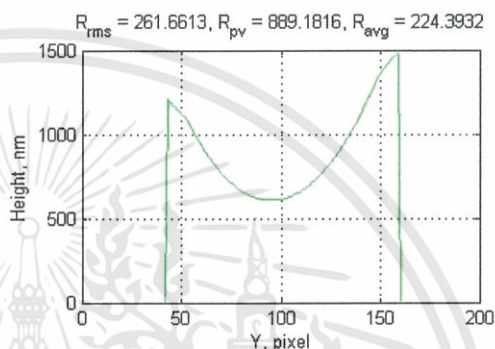
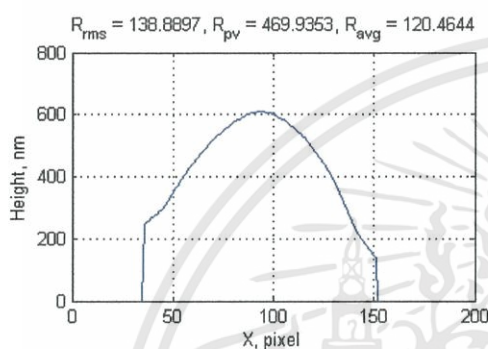
ภาพที่ 4. 53 ผลการประมวล Interferograms ชุดที่ 1 ที่ได้จาก Microscope Slide B



(a) 3D Surface Profile



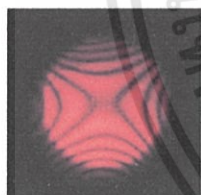
(b) Evaluation of 2D roughness



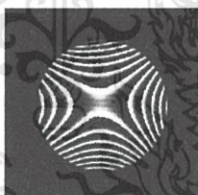
(c) Surface roughness จากเส้นลากตามแกน x

(d) Surface roughness จากเส้นลากแกน y

ภาพที่ 4. 54 ผลการประเมินความเรียบพื้นผิวของ Microscope Slide B โดยใช้ Interferograms ชุดที่ 1 การประมวลผลอินเทอร์ฟีรोगรามชุดที่ 2 ของของ Microscope Slide B แสดงดังภาพที่ 4.55 และผลการ วิเคราะห์โครงสร้างสามมิติของพื้นผิว แสดงดังภาพที่ 4.56



(a) อินเทอร์ฟีรोगราม



(b) ข้อมูลเฟส

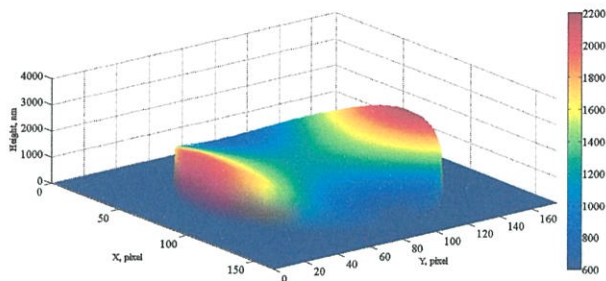


(c) เฟสมอดูลุโ2π

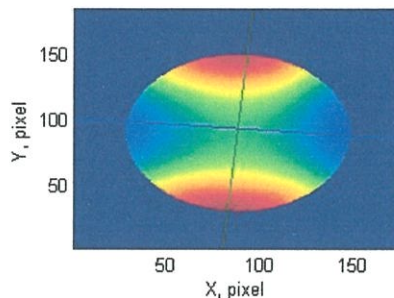


(d) Unwrapped Phase

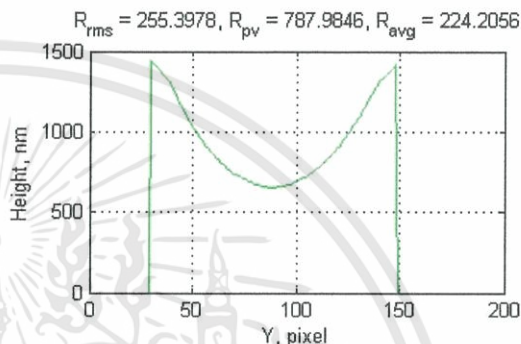
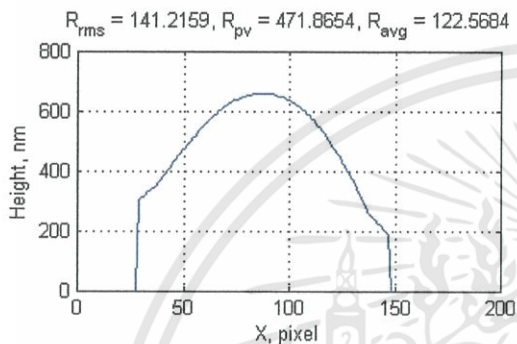
ภาพที่ 4. 55 ผลการประมวล Interferograms ชุดที่ 2 ที่ได้จาก Microscope Slide B



(a) 3D Surface Profile



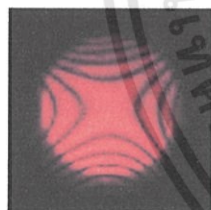
(b) Evaluation of 2D roughness



(c) Surface roughness จากเส้นลากตามแกน x

(d) Surface roughness จากเส้นลากแกน y

ภาพที่ 4. 56 ผลการประเมินความเรียบพื้นผิวของ Microscope Slide B โดยใช้ Interferograms ชุดที่ 2 การประมวลผลอินเตอร์ฟีรแกรมชุดที่ 3 ของของ Microscope Slide B แสดงดังภาพที่ 4.57 และผลการวิเคราะห์โครงสร้างสามมิติของพื้นผิว แสดงดังภาพที่ 4.58



(a) อินเตอร์ฟีรแกรม



(b) ข้อมูลเฟส

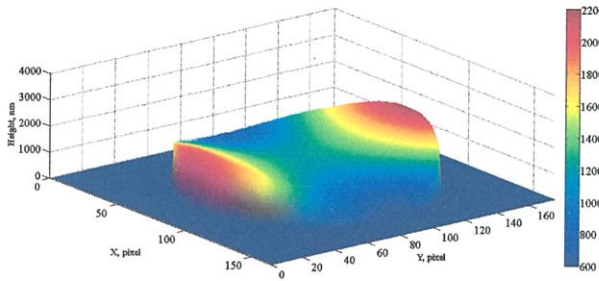


(c) เฟสมอดูลุโ2π

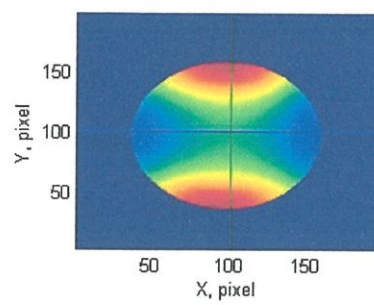


(d) Unwrapped Phase

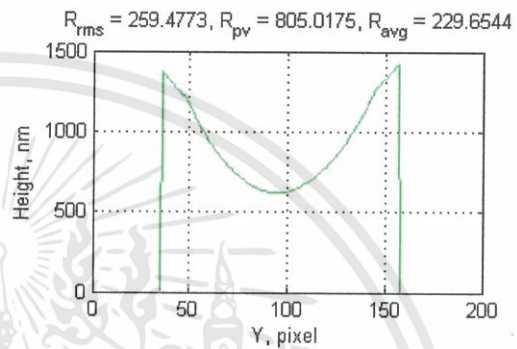
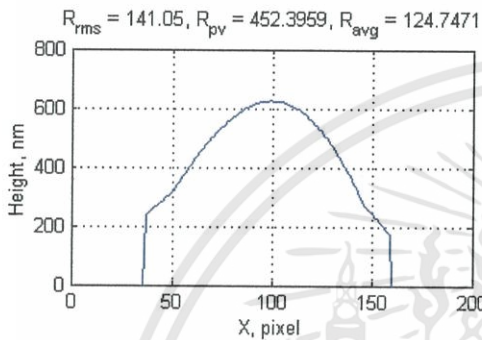
ภาพที่ 4. 57 ผลการประมวล Interferograms ชุดที่ 3 ที่ได้จาก Microscope Slide B



(a) 3D Surface Profile



(b) Evaluation of 2D roughness



(c) Surface roughness จากเส้นลากตามแกน x

(d) Surface roughness จากเส้นลากแกน y

ภาพที่ 4. 58 ผลการประเมินความเรียบพื้นผิวของ Microscope Slide B โดยใช้ Interferograms ชุดที่ 3

ตารางที่ 4.15 พารามิเตอร์ความหยาบผิวของ Microscope Slide B ตามแนวเส้นสัมผัส

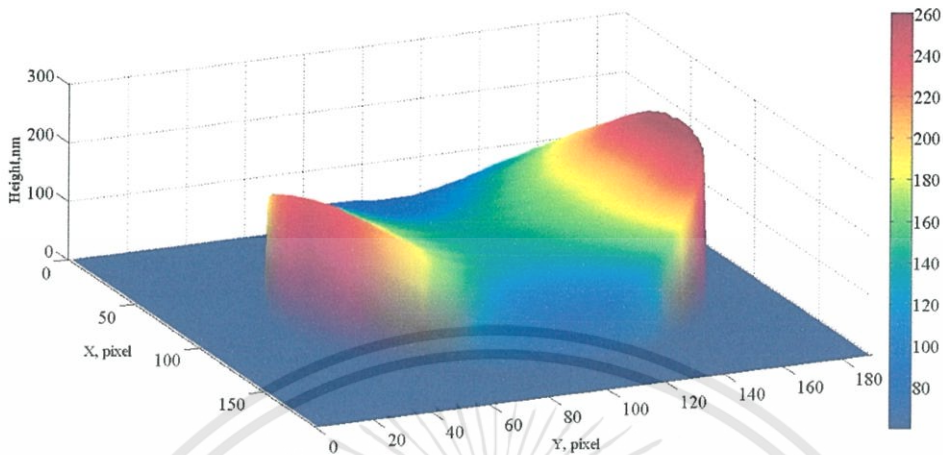
Interferograms	ตามแนวเส้นลากแกน x			ตามแนวเส้นลากแกน y		
	Rrms (nm)	Ra (nm)	PV (nm)	Rrms (nm)	Ra (nm)	PV (nm)
ชุดที่ 1	138.8	120.4	469.9	261.6	224.3	889.2
ชุดที่ 2	141.2	122.5	471.8	255.3	224.2	787.9
ชุดที่ 3	141.0	124.7	452.3	259.4	229.6	805.0

ตารางที่ 4.16 พารามิเตอร์ความหยาบผิวของ Microscope Slide B ทั้งพื้นผิว

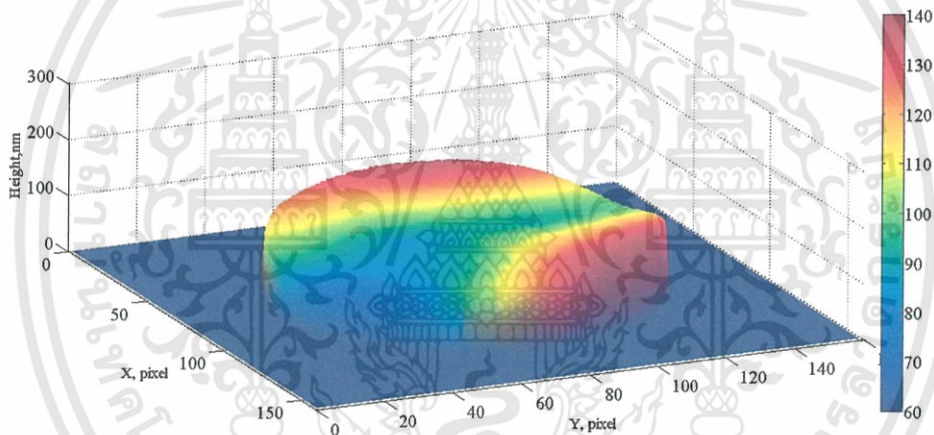
Interferograms	Rrms (nm)	Ra (nm)	PV (nm)
ชุดที่ 1	300.0	236.4	1,618.3
ชุดที่ 2	304.1	242.1	1,536.5
ชุดที่ 3	320.6	255.8	1,60.8
เฉลี่ย	308.2	244.8	1,587.6
S.D	10.9	10.0	44.6
ความไม่แน่นอน	±6.3	±5.8	±25.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

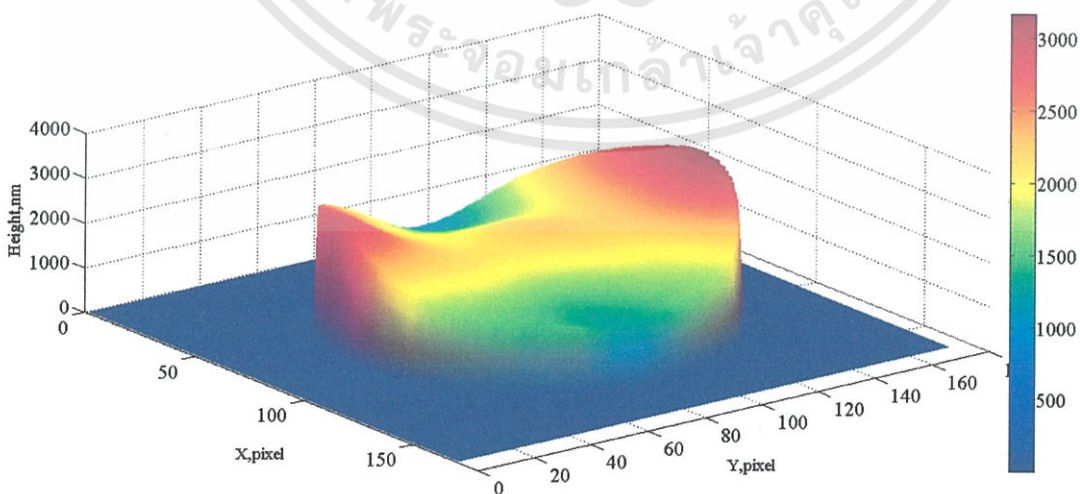
ผลการจำลองโครงสร้างพื้นผิวของ Optical flat $\lambda/4$ Optical flat $\lambda/4$ Microscope Slide A และ Microscope Slide B แสดงดังภาพที่ 4.59 - ภาพที่ 4.62



ภาพที่ 4. 59 ผลการจำลองโครงสร้างสามมิติของพื้นผิว Optical flat $\lambda/4$

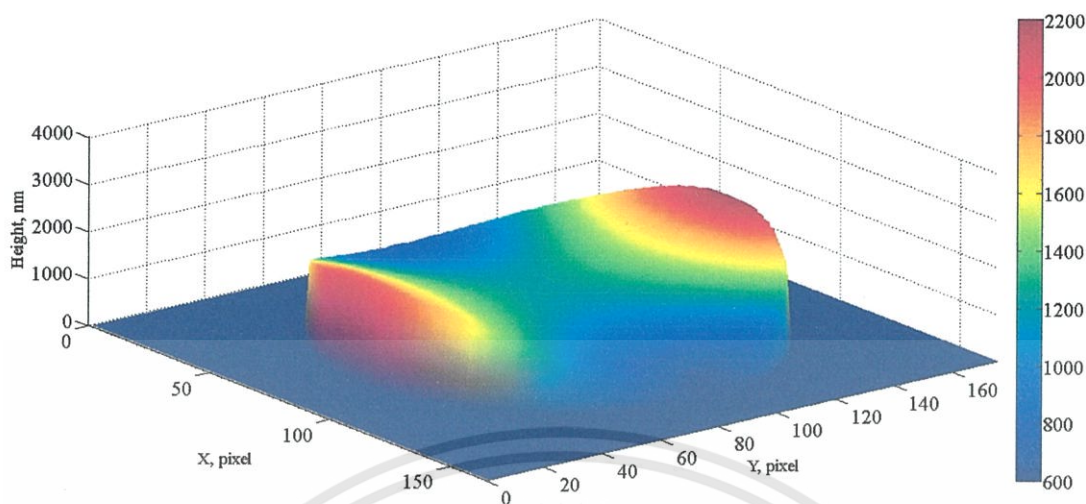


ภาพที่ 4. 60 ผลการจำลองโครงสร้างสามมิติของพื้นผิว Optical flat $\lambda/10$



ภาพที่ 4. 61 ผลการจำลองโครงสร้างสามมิติของพื้นผิว Microscope Slide A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4. 62 ผลการจำลองโครงสร้างสามมิติของพื้นผิว Microscope Slide B

4.7 ผลการวัดความเรียบของพื้นผิวด้วย Phase-shift interferometer

ในการวัดความเรียบของพื้นผิวด้วยเทคนิคการแทรกสอดทางแสงร่วมกับการเลื่อนไปของเฟสทางแสง นั้นเป็นวิเคราะห์จากอินเทอร์เฟอแกรมที่ได้จากหลักการแทรกสอดกันของแสงในอินเทอร์เฟอริมิเตอร์แบบ เลื่อนเฟสทั้งหมด 5 ภาพ ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ความเรียบของพื้นผิวที่ได้มีการพัฒนาขึ้น โดยปัญหาที่ เกิดขึ้นสามารถแบ่งได้ดังนี้คือ

1. การเลื่อนเฟสโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปควบคุมระยะกระจัดของเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจาก คุณสมบัติฮิสเทอรีซิสของเพียโซอิเล็กทริกทำให้การควบคุมเป็นไปได้ยาก ในการใช้เพียโซอิเล็กทริก เลื่อนระยะผลต่างเฟสในอินเทอร์เฟอริมิเตอร์จะต้องทำการทดลองซ้ำหลายครั้งและนำอินเทอร์เฟอ กรัมที่บันทึกได้มาคำนวณเพื่อหาค่าความผิดพลาดในการเลื่อนเฟสประกอบในการวิเคราะห์ ความเรียบของพื้นผิวด้วย
2. ไมเคลสันอินเทอร์เฟอริมิเตอร์ได้ติดตั้งอุปกรณ์ขยายลำแสงเพื่อสร้างลำสงขนานเพิ่มเข้าไปเพื่อให้รั้ว แทรกสอดเป็นเส้นตรงขนานกัน ซึ่งหากไม่มีการจัดการให้ลำแสงมีความขนานกันอย่างสมบูรณ์มาก พอก็ส่งผลต่อการวิเคราะห์แผนภาพอินเทอร์เฟอริมิเตอร์ได้
3. การบันทึกภาพอินเทอร์เฟอริมิเตอร์ส่งผลต่อตำแหน่งของภาพที่จำเป็นจะต้องเรียงลำดับต่อกัน ทั้งหมด 5 ภาพ ในขณะที่รั้วแทรกสอดเปลี่ยนแปลงไป ตำแหน่งของภาพจะต้องอยู่ที่เดิมเสมอ หากกล้องถ่ายภาพมีการสั่นสะเทือนหรือเลื่อนไปจากตำแหน่งของอินเทอร์เฟอริมิเตอร์ลำดับ ก่อนหน้าจะส่งผลกระทบต่อภาพประเมินภาพอินเทอร์เฟอริมิเตอร์อย่างมาก วิธีการที่ดีที่สุดในการ บันทึกภาพอินเทอร์เฟอริมิเตอร์ก็คือการตั้งกล้องถ่ายภาพ กดชัตเตอร์ด้วยรีโมทคอนโทรล หรือตั้ง เวลาในการกดชัตเตอร์และทำการถ่ายภาพอินเทอร์เฟอริมิเตอร์ทั้ง 5 ลำดับอย่างต่อเนื่องให้เสร็จ เรียบร้อยก่อนมีการปรับเปลี่ยนอื่น ๆ
4. โปรแกรมวิเคราะห์ความเรียบของพื้นผิวและจำลองโครงสร้างสามมิติของพื้นผิวที่ได้พัฒนาขึ้นก่อน นำภาพเข้าสู่การประมวลผลจะมีการจัดการกับรูปภาพอินเทอร์เฟอริมิเตอร์ให้รูปภาพมีความสมบูรณ์ และแก้ไขผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวนต่าง ๆ และการประมวลผลตามระเบียบวิธีทาง คณิตศาสตร์ตามเทคนิคอินเทอร์เฟอริมิเตอร์แบบเลื่อนเฟสทำให้โปรแกรมประกอบไปด้วยสคริปต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟล์หลายสคริปต์ บางสคริปต์ไม่ได้รวมอยู่ในโปรแกรมหลัก main.m และ main2.m เช่นการเรียกดูภาพเส้นสัมผัสที่ลากผ่านพื้นผิว หรือการเรียกดูกราฟฮิสโตแกรมของการเลือนเฟส จึงอาจก่อให้เกิดความยุ่งยากในการทำงาน

5. การประเมินผลความสูงของพื้นผิวด้วยการคำนวณค่าทางสถิติต่าง ๆ ที่บ่งบอกความเรียบของพื้นผิวได้แก่ ค่า PV ค่า Ra และค่า RMS ถึงแม้การพิจารณาค่า PV นั้นจะทำให้ทราบค่าความสูงต่ำของพื้นผิว แต่ไม่สามารถบ่งบอกอะไรได้เกี่ยวกับลักษณะของพื้นผิวทั้งหมดได้ เนื่องจากค่า PV ถูกคำนวณมาจากข้อมูลเพียงสองจุดที่สูงที่สุดและต่ำที่สุด จากจำนวนข้อมูลหลายพันจุดจึงไม่น่าเชื่อถือมากเพียงพอ ข้อมูลทางสถิติที่สามารถบ่งบอกถึงลักษณะที่แท้จริงของพื้นผิวได้ดีกว่านั้นก็คือค่า Ra และค่า RMS ซึ่งจะบ่งบอกถึงความขรุขระของพื้นผิวและเป็นค่าที่คำนวณมาจากข้อมูลของพื้นผิวทุกจุดจึงมีความน่าเชื่อถือมากกว่า



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในวิจัยนี้ใช้วิธีจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้แก่เพียโซอิเล็กทริกในระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบ 5 ระยะคือ $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ และ 2π เพื่อเลื่อนระยะเฟส ระหว่างทำการทดลองพบว่าอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริกนั้นตอบสนองได้ดีในช่วงแรงดันไฟฟ้า 50 ถึง 70 V ใช้แรงดันไฟฟ้าในการเลื่อนระยะผลต่างเฟสเชิงแสง 0 ถึง 2π ประมาณ 3.4 V จึงได้ทำการแบ่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าตำแหน่งละ 0.85 V ทั้งหมด 5 ตำแหน่งตามระเบียบวิธีของ Hariharan บันทึกภาพอินเตอร์เฟอแกรมโดยภาพที่ 1 และภาพที่ 5 อินเตอร์เฟอแกรมจะมีลักษณะเหมือนกันทุกประการ โดยการทำทดลองบันทึกอินเตอร์เฟอแกรมทั้งหมด 4 พื้นผิว พื้นผิวละ 3 ชุด จากการคำนวณหาค่าความผิดพลาดในการเลื่อนเฟสในแต่ละพื้นผิวพบว่า Optical flat $\lambda/4$, Optical flat $\lambda/10$, Microscope Slide A และ Microscope Slide B มีค่าความผิดพลาดในการเลื่อนเฟสจาก 90° เฉลี่ย $2.07^\circ, 1.65^\circ, 4.25^\circ$ และ 0.35° ตามลำดับ

จากการศึกษาภาพรีวแทรกสอดจากระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ของพื้นผิวตัวอย่างทั้ง 4 ตัวอย่างพบว่ารีวแทรกสอดสามารถบ่งบอกถึงโครงสร้างพื้นผิวที่ผิดปกติได้ดังนี้ รีวแทรกสอดของ Optical flat $\lambda/4$ มีความโค้งเว้ามากกว่า Optical flat $\lambda/10$ เมื่อทดสอบกับกระจกเรียบอ้างอิงความเรียบสูง $\lambda/20$ เมื่อนำภาพถ่ายรีวแทรกสอดไปสร้างโครงสร้างสามมิติ และวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติต่าง ๆ พบว่า Optical flat $\lambda/4$ มีค่า RMS ค่า Ra และค่า PV เฉลี่ยเท่ากับ 43.8 ± 0.3 nm, 34.6 ± 0.6 nm และ 237.2 ± 2.9 nm ตามลำดับ ส่วน Optical flat $\lambda/10$ มีค่า RMS ค่า Ra และค่า PV เฉลี่ยเท่ากับ 19.0 ± 1.2 nm, 16.0 ± 1.1 nm และ 96.6 ± 8.0 nm ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์แล้ว ข้อมูลโครงสร้างสามมิติที่ได้นั้นมีลักษณะที่เหมือนกันคือ Optical flat ที่มีความเรียบ $\lambda/4$ จะมีความโค้งและขรุขระมากกว่า Optical flat $\lambda/10$ แต่ข้อมูลเชิงสถิติที่มีความแตกต่างกัน เนื่องจากเครื่องมือเชิงพาณิชย์ทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากเส้นสัมผัสที่ลากผ่านพื้นผิวเท่านั้น ซึ่งไม่ใช่จุดสูงสุดหรือต่ำสุด แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลความเรียบทั่วทั้งพื้นผิวและแบ่งออกเป็นข้อมูลตามเส้นสัมผัสในแนวตั้งและแนวนอนที่ลากผ่านพื้นผิวบริเวณที่เป็นจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุด

รีวแทรกสอดของ Microscope Slide เคลือบอะลูมิเนียมด้วยวิธี RF Magnetron Sputtering A และ B พบว่า Microscope Slide A นั้นมีรีวแทรกสอดที่โค้งเว้าและนูนขึ้น สังเกตเห็นรอยนูนหลายแห่งจากรีวแทรกสอดต่างจาก Microscope Slide B ที่มีรูปผิวโค้งเว้าแต่ว่าสมมาตรกันไม่มีรอยนูนเกิดขึ้น เมื่อนำภาพถ่ายรีวแทรกสอดไปสร้างโครงสร้างสามมิติก็พบว่า Microscope Slide A มีความโค้งเว้า บิดเบี้ยว และขรุขระมากกว่า Microscope Slide B เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติต่าง ๆ พบว่า Microscope Slide A มีค่า RMS ค่า Ra และค่า PV เฉลี่ยเท่ากับ 571.1 ± 7.3 nm, 0.4488 ± 0.00606 nm และ 2588.3 ± 40.8 nm ตามลำดับ ส่วน Microscope Slide B มีค่า RMS ค่า Ra และค่า PV เท่ากับ 308.2 ± 6.3 nm, 244.8 ± 5.8 nm และ 1587.6 ± 25.7 nm ตามลำดับ

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างของพื้นผิว Microscope Slide A และ B สามารถบ่งบอกได้ถึงคุณภาพของพื้นผิวทั้งสองและสามารถเปรียบเทียบคุณภาพเพื่อการเลือกใช้งานได้ตามต้องการ ถึงแม้ว่าการวิเคราะห์ข้อมูลโครงสร้างสามมิติและข้อมูลทางสถิติต่าง ๆ ของพื้นผิวยังมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นอยู่ ซึ่งความคลาดเคลื่อนเหล่านี้อาจจะเกิดได้จากหลายปัจจัย เช่น สัญญาณรบกวนจากภายนอก การจัดระบบแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนานที่ยังไม่สมบูรณ์มากพอ รวมไปถึงข้อจำกัดของอุปกรณ์เลียนเฟส ในงานวิจัยนี้สามารถตรวจวัดความเรียบจากการสร้างโครงร่างของพื้นผิวได้เบื้องต้น ซึ่งผู้วิจัยเห็นว่าต้องพัฒนาการจัดระบบวัดเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น อีกทั้งโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างโครงร่างของพื้นผิวยังมีความยืดหยุ่นไม่มากพอที่จะนำไปใช้งานได้โดยง่ายจึงอาจจะต้องมีการพัฒนาเพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ดียิ่งขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

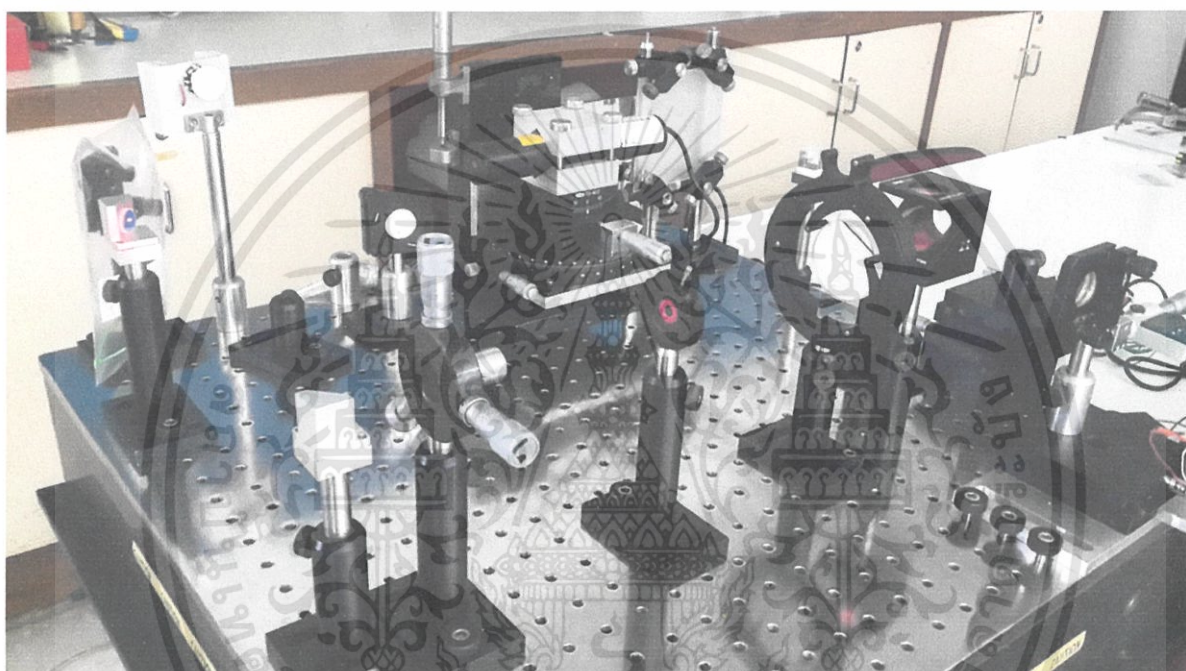
ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้พบข้อจำกัดและปัญหาในการทดลองหลายประการ เช่นข้อจำกัดในการควบคุมระยะกระจัดของเพียโซอิเล็กทริกเพื่อเลียนระยะเฟส ความไม่ขนานของลำแสงที่สมบูรณ์มากพอในอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ทำให้ผลการวิจัยมีความผิดพลาด โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อวิเคราะห์ความเรียบของพื้นผิวและจำลองโครงร่างสามมิติของพื้นผิวยังค่อนข้างยุ่งยากในการใช้งาน และยังไม่ได้มีการพัฒนาให้สามารถแสดงข้อมูลที่เกี่ยวกับพื้นผิวได้อย่างครอบคลุมมากพอ เป็นต้น

สำหรับงานวิจัยที่จะดำเนินต่อไปในอนาคตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องมือวัดและลดความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นคือ การเลือกใช้วิธีวัดและเทคนิคอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบเลียนเฟสที่เสี่ยงต่อสัญญาณรบกวนน้อยที่สุด จะต้องใช้เวลาในการทำการทดลองให้สั้นที่สุด รวมไปถึงการออกแบบโปรแกรมให้สามารถประมวลผลพื้นผิวได้อย่างครบถ้วนสำเร็จรูปมากขึ้นภายในคำสั่งเดียว สามารถประมวลผลภาพได้โดยที่ภาพถ่ายแต่ละภาพไม่จำเป็นต้องมีขอบภาพอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน และสามารถปรับเปลี่ยนการแสดงผลได้หลายๆแบบ เช่นสามารถแสดงข้อมูลการเลียนเฟสได้ทันทีโดยไม่ต้องเรียกคำสั่งใหม่ หรือเรียกหน้าจอแสดงผลใหม่ สามารถเลือกแสดงข้อมูลการคำนวณได้หลายค่ามากขึ้นเพื่อให้ง่ายและสะดวกต่อผู้นำไปใช้งาน เป็นต้น

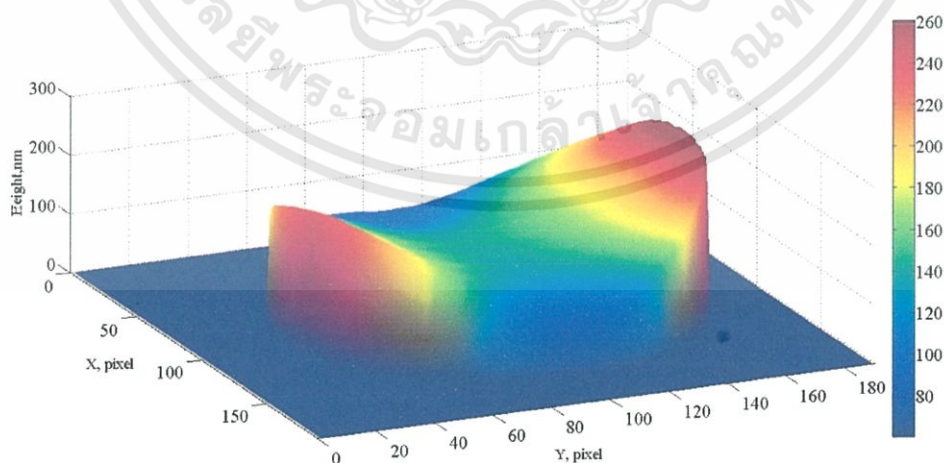
บทที่ 6

สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

จากแหล่งเงินทุนของการดำเนินงานภายใต้โครงการวิจัยนี้ทำให้ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาระบบการวัดความเรียบพื้นผิวด้วยอินเตอร์เฟอริมิเตอร์แบบไมเคิลสัน ระบบมีลักษณะตามภาพถ่ายดังภาพที่ 6.1 พร้อมด้วยโปรแกรมประเมินค่าโครงสร้างพื้นผิวที่สามารถสร้างค่าโครงสร้างของ Optical flat ที่มีความเรียบ $\lambda/10$ และ $\lambda/4$ ได้ดังภาพที่ 6.2 และ 6.3 ตามลำดับ รวมทั้งยังได้ทำการประเมินค่าโครงสร้างพื้นผิวของ Microscope slide ที่มาจากผู้ผลิต 2 แห่งด้วยกัน แสดงดังภาพที่ 6.4 และ 6.5

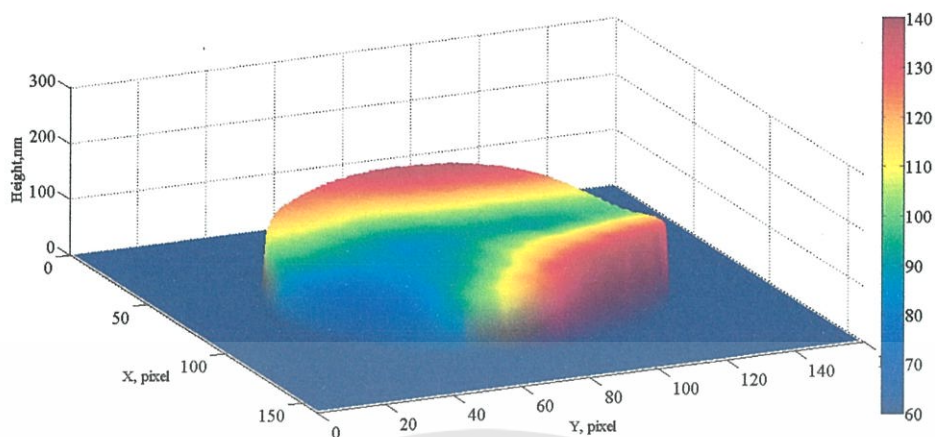


ภาพที่ 6.1 ภาพถ่ายของระบบ Michelson Interferometer ที่ใช้กับงานวิจัยนี้

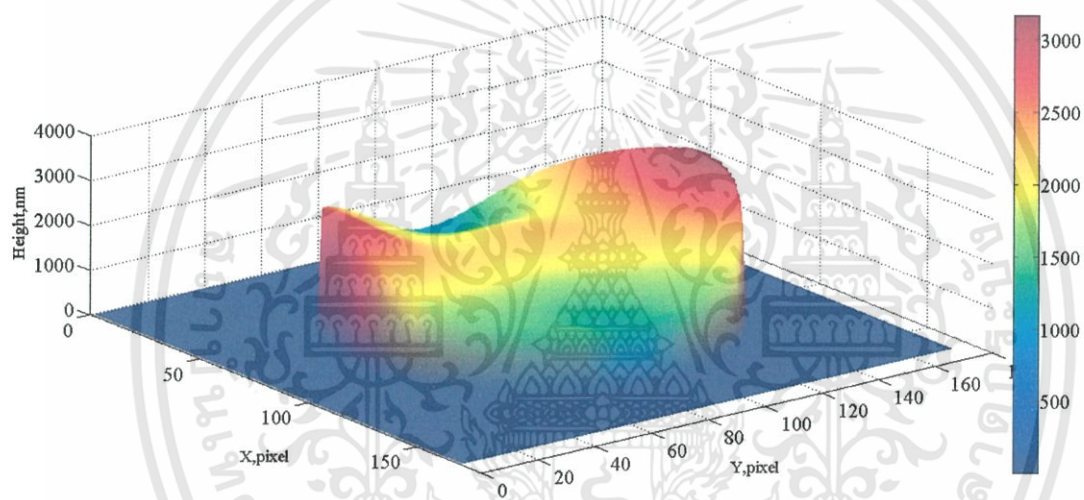


ภาพที่ 6.2 โครงสร้างสามมิติของพื้นผิว Optical flat $\lambda/4$

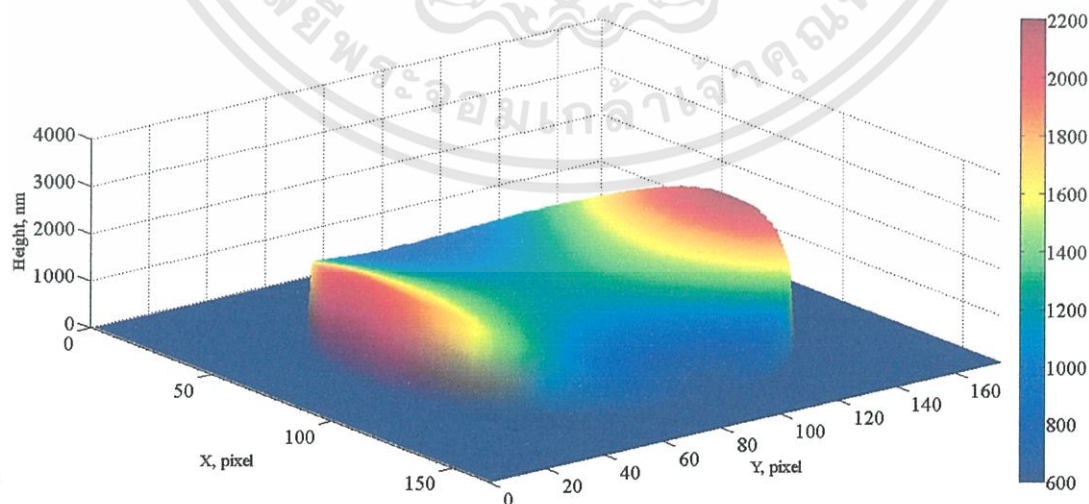
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 6.3 โครงร่างสามมิติของพื้นผิว Optical flat $\lambda/10$



ภาพที่ 6.4 โครงร่างสามมิติของพื้นผิว Microscope Slide A



ภาพที่ 6.5 โครงร่างสามมิติของพื้นผิว Microscope Slide B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Yoshino Y., Inoue K., Takeuchi M., Makino T., Katayama Y., and Hata T. "Effect of substratesurface morphology and interface microstructure in ZnO thin films formed on various substrates." *vacuum.*, 2000 pp. 403-410.
- [2] Artieda A., Barbieri M., Sandu C. S., and Muralt P. "Effect of substrate roughness on c-orientedAlN thin films." *J. Appl Phys.*, 2009 pp.024504.
- [3] Harish C. Barshilia., Krishna Mohan1 D., Selvakumar N. and Rajam K.S. "Effect of substrate roughness on the apparent surface free energy of sputter deposited superhydrophobic polytetrafluoroethylene thin films." *Appl. Phys. Lett.* vol. 95, 2009 pp. 033116
- [4] Timoshevskii V., Youqi K., Hong G., and GallThe D. "Influence of surface roughness on electrical conductance of thin Cu films: An ab initio studyJ." *Appl. Phys.*, vol.103. 2008 pp. 113705
- [5] Saeed Olyae, Samaneh Hamed, and Milind Kr Sharma (Ed.) "Nano-metrology based on the Laser Interferometers" *Advances in Measurement Systems.*, 2010 Chapter 13 pp. 315-342
- [6] A. G. Olszak,J. Schmit, M. G. Heaton "Interferometry : Technology and Applications" Veeco Metrology Group. 2001
- [7] Michael Bass, Editor. "HANDBOOK OF OPTICS" 2nd ED, Measurements, and Properties Deviations of Aspheric Surfaces, McGraw-Hill, Inc 1995
- [8] Yoshizawa Toru, Editor "Handbok of Optical Metrology: Principles and Application" 2009
- [9] Hariharan P. "Basics of interferometry" 2nd ED. United States of America : British Library. 2007
- [10] Salah H. R. Ali "Advanced Nanomeasuring Techniques for Surface Characterization" *International Scholarly Research Network ISRN Optics Volume 2012, Article ID 859353, 23 pages*
- [11] T. V. Vorburger & H.-G. Rhee & T. B. Renegar & J.-F. Song & A. Zheng "Comparison of optical and stylus methods for measurement of surface texture" *Int J Adv Manuf Technol* (2007) 3:110–118
- [12] Chin Y. Poon, Bharat Bhushan " Comparison of surface roughness measurements by stylus profiler, AFM and non-contact optical profiler" *Wear* 190 (1995) 76-88.
- [13] Bharat Bhushan "Surface Roughness Analysis and Measurement Techniques" © 2001 by CRC Press LLC
- [14] Optical Shop Testing, Charpther 15 Surface Profilers, Multiple Wavelength,and White Light IntereferometryThird Edition Edited by Daniel Malacara, Copyright # 2007 John Wiley & Sons, Inc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] Song JF, Vorburger TV (1991) Stylus profiling at high resolution and low force. *Appl Opt* 30:42–50
- [16] H. Bubert and H. Jenett “Surface and Thin film Analysis
- [17] C. Bai (2000). *Scanning tunneling microscopy and its applications*. New York: Springer Verlag.
- [18] [Online]. Available : <http://leung.uwaterloo.ca/MNS/102/Lectures%202007/SSNT-4-Surface%20Structure%20Determination%20Techniques%20II.htm>
- [19] Schmit, J. (1993). "Spatial and temporal phase-measurement techniques: a comparison of major error sources in one dimension". *Proceedings of SPIE* 1755. pp. 202–201
- [20] Larkin, K.G. (1996). "Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry". *Journal of the Optical Society of America* 13 (4): 832–843.
- [21] Harasaki, A.; Schmit, J.; Wyant, J. C. (2000). "Improved vertical-scanning interferometry". *Applied Optics* 39 (13): 2107–2115.
- [22] [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Phase_Shifting_and_Vertical_Scanning_Interferometry_Animation.gif
- [23] Franklin D. Jones "How precision gage-blocks are made" in *Machinery*, Vol. 26, April, 1920, The Industrial Press, New York, p. 706, fig. 21 & 22 on Google Books
- [24] James C. Wyant: *White Light Interferometry*, Optical Sciences Center, University of Arizona, Tucson, AZ 85721
- [25] James G. Fujimoto, Erich P. Ippen, Franz X. Kärtner “Optical and Quantum Electronics 21” Research Laboratory of Electronics (RLE) at the Massachusetts Institute of Technology (MIT) 1989 pp.253-282
- [26] [Online]. Available: http://fp.optics.arizona.edu/jcwyant/Optics513/ChapterNotes/Chapter05/05-4-Vertical_Scanning.pptx.pdf
- [27] J. David Briers “Optical testing : a review and tutorial for optical engineers” *Optics and Lasers in Engineering*, 32(2), 1999, pp. 111-138
- [28] Daniel Malacara, et al., “*Interferogram Analysis for Optical Testing*” 2nd ED. Taylor & Francis Group, LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group. 2005
- [29] Raymond A., Serway and Robert J. Beichner “*Physics for scientists and Engineers with Modern Physics*” 5th ED. CA, Thomson Higher Education. 2008
- [30] Kjell J. Gasvik “*Optical Metrology*” 3rd ED. Chichester, John Wiley & Sons Ltd. 2002
- [31] ดร. ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี “เอกสารประกอบ วิชา ปฏิบัติการเครื่องมือวัด 1 – การทดลองเรื่อง Michelson Interferometer for Displacement Measurement” ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [32] J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White, and D. J. Brangaccio, *Digital Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses*, November 1974 / Vol. 13, No. 11 / *APPLIED OPTICS* 2693

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

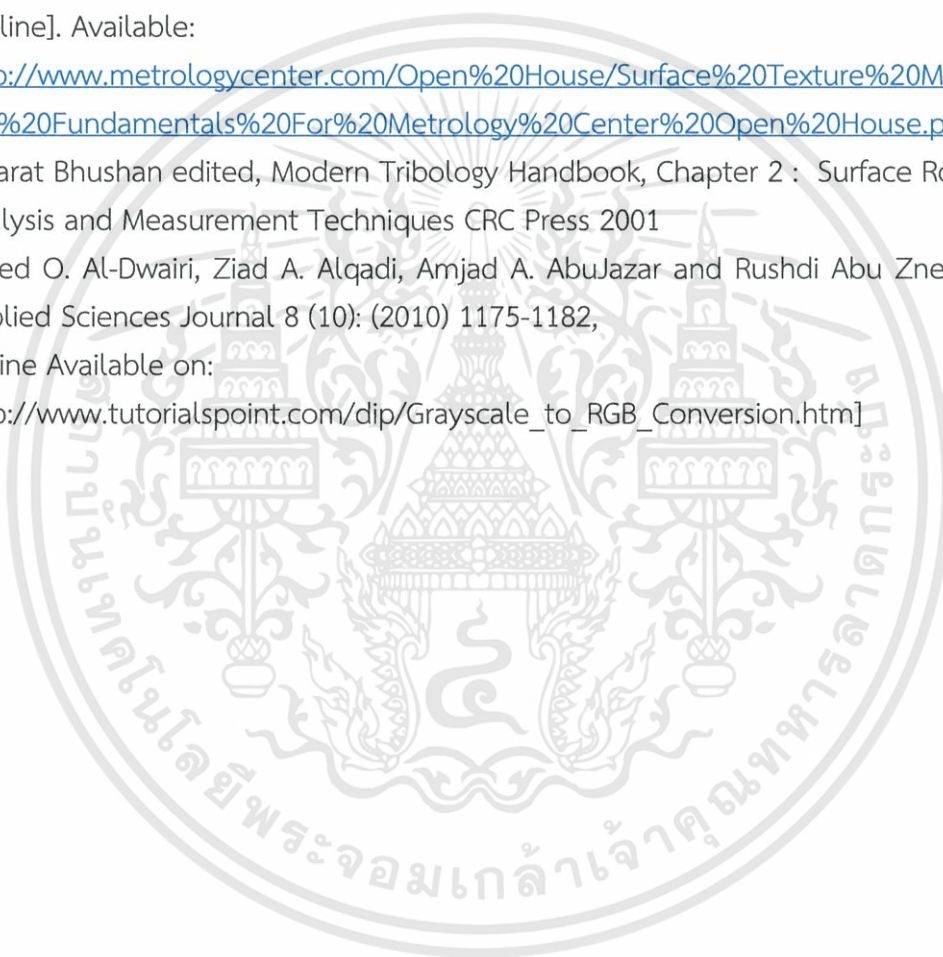
- [33] ดร. ศ.ทิวรรณ คล้ายบุญมี “เอกสารประกอบ วิชา การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย” ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [34] James C. Wyant “Phase Shifting Interferometry.” [Online] Available: http://fp.optics.arizona.edu/jcwyant/Short_Courses/SPIE-7-30-2000/Session%209.pdf. 2002.
- [35] [Online]. Available: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=2970
- [36] Laser Beam-Delivery Optics and Accessories, SPM 09SPM. “Shear-Plate Collimation Testers” [Online] Available: <http://www.astro.caltech.edu/~lah/ay105/pdf/SPM.pdf>
- [37] J. Wilson J. Hawkes “Laser Principles and Applications” London, Prentice Hall, 1987
- [38] William T. Silfvast “Laser Fundamental” 2nd ED., New York, Cambridge University Press, 1996
- [39] M. Servin, “Analysis and synthesis of phase shifting algorithms based on linear systems theory”, Optics and Lasers in Engineering, 50 (2012) 1009–1014
- [39] Wilson J. Hawkes “Optoelectronics An introduction” 2nd ED. Pentice Hall Europe, 1988
- [40] Newport “Optics: How to Build a Beam Expander” [Online]. Available: http://assets.newport.com/webDocuments-EN/images/How_to_build_a_beam_expander_5.PDF
- [41] “Beam Expanders” [Online]. Available: <http://www.edmundoptics.com/technical-resources-center/lasers/beam-expanders/>
- [42] MELLIS GRIOT “Lens Selection” [Online] Available: http://fp.optics.arizona.edu/opti471B/Reading/Lab3/MG_GBO_BE_Lenses.pdf
- [43] <https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/optics/what-are-beamsplitters/>
- [44] Hari Singh Nalwa “Handbook of Thin Film Materials: Ferroelectric and dielectric thin films, Volume 3” Academic Press, 2002
- [45] Ahmad Safari and E.Koray Akdogan “Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications” New Jersey, Springer, 2008
- [46] Supasarote Muensit. “Piezoelectric coefficients of gallium arsenide, gallium nitride and aluminium nitride” Ph. D. Thesis of Macquarie University: Sydney, 1998
- [47] Manbachi A. and Cobbold R.S.C “Development and application of piezoelectric materials for ultrasound generation and detection” 2011 pp. 187-169
- [48] Siu Wing OR “Overview of Smart Materials Technology” [Online] Available: http://resources.edb.gov.hk/physics/articleE/smartmaterials/SmartMaterials_e.htm . 2003
- [49] “PIEZOELECTRICITY” [Online]. Available: <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectricity.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [50] <http://www.directindustry.com/prod/piezosystem-jena/piezoelectric-actuators-14251-273659.html>
- [51] “Piezoelectric Bending actuators (MOTORS)” PIEZO SYSTEMS, INC. [Online] Available: <http://www.piezo.com/prodbm0nav.html#quick>
- [52] http://www.konicaminolta.com/about/research/core_technology/picture/antiblur.html
- [53] M Servin, JC Estrada and JA Quiroga. “The general theory of phase-shifting algorithms” *Opt. Express* 2009; 17: 21867–81
- [54] J. G. Proakis, D. G. Manolakis “Digital signal processing” 4th ED. Prentice Hall, 2007
- [55] Ferrel G. Stremler “Introduction to communications systems” 3rd ED. Addison-Wesley; 1990
- [56] David E Robinson and Graeme T Reid (Editors), “Interferogram Analysis Digital Fringe Pattern Measurement Technique” Arizona, IOP Publishing, 1993
- [57] Daniel Malacara, et al (Editors), “Optical Shop Testing” 2nd ED., New Jersey, Wiley-Interscience A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2007
- [58] Malacara D., Servín M., Malacara Z., “Interferogram analysis for optical testing” 2nd ED. Taylor & Francis Group, 2005
- [58] Daniel Malacara, et al (Editors), “Optical Shop Testing” 2nd ED., New Jersey, Wiley-Interscience A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2007 pp.574-576
- [59] P. Hariharan, B.F. Oreb, and T. Eiju, "Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm," *Appl. Opt.* 26(13), 2504-2506 (1987).
- [60] Daniel Malacara, et al (Editors), “Optical Shop Testing” 2nd ED., New Jersey, Wiley-Interscience A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2007 pp.579
- [61] James C. Wyant “Phase Shifting Interferometry.” [Online] Available: <http://fp.optics.arizona.edu/jcwyant/Optics513/ChapterNotes/Chapter05/Notes/Phase%20Shifting%20Interferometry.nb.pdf>. 201138
- [62] Michael Peck, “Interferometry mathematics, algorithms, and data” 2010, pp.16-18
- [63] Daniel Malacara, et al (Editors), “Optical Shop Testing” 2nd ED., New Jersey, Wiley-Interscience A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2007 pp.624
- [64] David E Robinson and Graeme T Reid (Editors), “Interferogram Analysis Digital Fringe Pattern Measurement Technique” Arizona, IOP Publishing, 1993 pp.115
- [65] Daniel Malacara, et al (Editors), “Optical Shop Testing” 2nd ED., New Jersey, Wiley-Interscience A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2007 pp.596-599
- [66] Georgios P. Petropoulos, Constantinos N. Pandazaras, J. Paulo Davim Chapter 2 - Surface Texture Characterization and Evaluation Related to Machining in “Surface Integrity in Machining” Springer-Verlag London Limited , London (2010) pp 37-66
- [67] Richard Leach, Leigh Brown, Xiangqian Jiang, Roy Blunt, Mike Conroy, Darian Mauger, A NATIONAL MEASUREMENT GOOD PRACTICE GUIDE No.108 Guide for the Measurement

of Smooth Surface Topography using Coherence Scanning Interferometry, Crown copyright 2008

- [68] [Online]. Available:
<http://www.inspectionengineering.com/Images/SurfaceFinishExplain.pdf>
- [69] [Online]. Available:
http://www.gaugeshop.com/_images/roughness/parameterguide%20rev4.pdf
- [70] [Online]. Available:
<http://www.renishaw.com/cmmsupport/knowledgebase/en/surface-finish-measurement—22135>
- [71] [Online]. Available:
<http://www.metrologycenter.com/Open%20House/Surface%20Texture%20Measurement%20Fundamentals%20For%20Metrology%20Center%20Open%20House.pdf>
- [72] Bharat Bhushan edited, Modern Tribology Handbook, Chapter 2 : Surface Roughness Analysis and Measurement Techniques CRC Press 2001
- [73] Majed O. Al-Dwairi, Ziad A. Alqadi, Amjad A. AbuJazar and Rushdi Abu Zneit, World Applied Sciences Journal 8 (10): (2010) 1175-1182,
- [74] Online Available on:
http://www.tutorialspoint.com/dip/Grayscale_to_RGB_Conversion.htm





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หัวหน้าโครงการวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาว ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Miss S. Tipawan Khlayboonme
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3-1011-00042-23-1
ที่อยู่ 21/138 ถ.สารีบุตร-ทับยาว แขวงทับยาว เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ ระดับ 6
4. หน่วยงานที่สังกัด ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ที่อยู่ เลขที่ 3 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กทม. 10520
โทรศัพท์ 02-326-4111 ต่อ 6197
โทรศัพท์มือถือ 081-269-2134
โทรสาร 02-326-4413
E-mail s.tipawan.kh@kmitl.ac.th

5. ประวัติการศึกษา

ปี	ระดับ	วุฒิ	สถาบัน	ประเทศ
2540	ปริญญาตรี	วท.บ (ฟิสิกส์ประยุกต์-โซลิตสเตท	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	ไทย
2544	ปริญญาโท	อิลีกทรอนิกส์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	ไทย
2556	ปริญญาเอก	วท.ม (ฟิสิกส์ประยุกต์) ปร.ด (ฟิสิกส์ประยุกต์)	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	ไทย

6. ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ/หรือที่ผ่านมา ทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย

6.1 การพัฒนาเทคนิคโพกัสล่าไอออนเพื่อประยุกต์ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลับแซนวิช” Phase 1A

- ตำแหน่ง ผู้ช่วยนักวิจัย
แหล่งทุนสนับสนุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ปี พ.ศ. 2541-2544
งบประมาณ 5,104,960.00 บาท

6.2 การพัฒนาเทคนิคโพกัสล่าไอออนเพื่อประยุกต์ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลับแซนวิช” Phase 1B

- ตำแหน่ง ผู้ช่วยนักวิจัย
แหล่งทุนสนับสนุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ปี พ.ศ. 2544-2546
งบประมาณ 2,701,496.00 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6.3 การพัฒนาเทคนิคโพกัสล่าไอออนเพื่อประยุกต์ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลีบแซนวิช” Phase 2
 ตำแหน่ง ผู้ร่วมวิจัย
 แหล่งทุนสนับสนุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ปี พ.ศ. 2546-2548
 งบประมาณ 3,815,350.00 บาท
- 6.4 การพัฒนาอุปกรณ์ชุด Secondary Ion Mass Spectroscopy และการใช้งาน
 ตำแหน่ง ผู้ร่วมวิจัย
 แหล่งทุนสนับสนุน ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ปี พ.ศ. 2546-2548
 งบประมาณ 4,069,109.00 บาท
- 6.5 การพัฒนาแหล่งกำเนิดไอออนแบบรวมล่าไอออนและระบบโพกัสเพื่อการประยุกต์ใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลีบแซนวิช”
 ตำแหน่ง ผู้ร่วมวิจัย
 แหล่งทุนสนับสนุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ปี พ.ศ. 2548-2550
 งบประมาณ 9,986,000.00 บาท
- 6.6 การสังเคราะห์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่มีโครงสร้างระดับนาโนด้วยเทคนิค Ultrasonic Spray Pyrolysis เพื่อประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับตัวเก็บประจุยิ่งยวด
 ตำแหน่ง หัวหน้าโครงการ
 แหล่งทุนสนับสนุน งบเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ปีงบประมาณ 2558
 งบประมาณ 200,000.00 บาท
- 6.7 การปลูกและวัดสมบัติฟิล์มบางเพียโซอิเล็กทริกอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เตรียมด้วยวิธีแอททีฟอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงบนฐานรองรับพลาสติก PET
 ตำแหน่ง หัวหน้าโครงการ
 แหล่งทุนสนับสนุน งบเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ปีงบประมาณ 2558
 งบประมาณ 50,000.00 บาท
- 6.8 การออกแบบและสร้างชุดเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งสำหรับสังเคราะห์เส้นใยนาโน
 ตำแหน่ง หัวหน้าโครงการ
 แหล่งทุนสนับสนุน งบเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ปีงบประมาณ 2559
 งบประมาณ 50,000.00 บาท
- 6.9 การออกแบบและสร้างชุดเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งสำหรับสังเคราะห์เส้นใยนาโน
 ตำแหน่ง หัวหน้าโครงการ
 แหล่งทุนสนับสนุน งบเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ปีงบประมาณ 2559
 งบประมาณ 50,000.00 บาท
- 6.10 การสังเคราะห์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์เจือด้วยทองแดงโดยกระบวนการอัลตราโซนิกแอโรโซลไพโรไลซิส
 ตำแหน่ง หัวหน้าโครงการ
 แหล่งทุนสนับสนุน งบเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ปีงบประมาณ 2560
 งบประมาณ 160,000.00 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6.10 การพัฒนาระบบเคลือบแบบจุ่มซ้ำเคลือบด้วยความแม่นยำสูงสำหรับการสร้างชั้นฟิล์มบางนาโน
- | | |
|------------------|--|
| ตำแหน่ง | หัวหน้าโครงการ |
| แหล่งทุนสนับสนุน | งบเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ปีงบประมาณ 2559 |
| งบประมาณ | 140,000.00 บาท |
- 6.12 การพัฒนาระบบการเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิคการสเปตเตอร์ด้วยลำไอออน
- | | |
|------------------|-------------------------------------|
| ตำแหน่ง | หัวหน้าโครงการ |
| แหล่งทุนสนับสนุน | งบประมาณแผ่นดิน วช. ปีงบประมาณ 2560 |
| งบประมาณ | 491,500.00 บาท |

ผลงานตีพิมพ์

1. S.Tipawan Khlayboonme, Pitiporn Thanomngam and Warawoot Thowladda, Effect of SnCl₄ Concentration on Transparent and Conducting Undoped Tin Oxide Thin Films Key Engineering Materials, Vol. 690, 246-251 (2015).
2. S.Tipawan Khlayboonme and Warawoot Thowladda, Comparative Study of Non-Annealing and Annealing on Properties of ITO Deposited by RF Magnetron Sputtering, Key Engineering Materials Vol. 659, 615-619 (2015).
3. S. Suriyasirikune, S.T. Khlayboonme, W. Thowladda, Phase-Shifting Interferometry for Surface Roughness Measurement on Glass Substrates, to be published in Advanced Materials Research
4. S.T. Khlayboonme and W. Thowladda, Plasma Impedance Tuning Effect on Nanostructure of Diamond Films , Applied Mechanics and Materials Vol. 394, 32-37 (2013)
5. S.T. Khlayboonme and W. Thowladda, Nanocrystalline Diamond Films Deposited by Two-step Approach from CH₄/H₂ Microwave Plasma: The Influence of Reactor Pressure, Applied Mechanics and Materials Vol. 339, 657-664 (2013)
6. S.Tipawan Khlayboonme, Wichan Wicharn Techitdheera and Warawoot Thowladda, Effect of Two-step Deposition Process on Morphology and Optical Properties of Nanostructured Diamond Films, Advanced Materials Research Vol. 651, 148-153 (2013)
7. Piti Sinnuntasen, S.Tipawan Khlayboonme, and Warawoot Thowladda, Effect of low-pressure DC plasma cleaning on leadframe surface: contact angle, wire pull and stitch pull strength studies, Proceeding of The 7th Annual Conference of The Thai Physics Society, SIAM PHYSICS CONGRESS 2012.
8. Piti Sinnuntasen, S.Tipawan Khlayboonme, and Warawoot Thowladda, Effect of low-pressure DC plasma cleaning on leadframe surface, 1st Mae Fah Luang University International Conference 2012.

รางวัลที่เคยได้รับ: Best Poster Award in the 8th International Conference on Materials Science and Technology for the presentation in Surface Engineering and Heat Treatment Session entitled Comparative Study of Non-Annealing and Annealing on the Properties of ITO Deposited by RF Magnetron Sputtering



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้