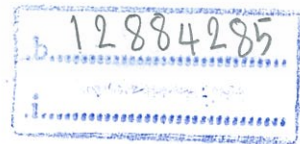


การปรับปรุงระบบการวัดความเรียบผิวโดยอาศัย
หลักการแทรกสอดแบบการกวาดแนวตั้ง
IMPROVEMENT OF SURFACE ROUGHNESS
MEASUREMENT SYSTEM BASED ON VERTICAL
SCANNING INTERFEROMETR



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การปรับปรุงระบบการวัดความเรียบผิวโดยอาศัย
หลักการแทรกสอดแบบการกวาดแนวตั้ง
IMPROVEMENT OF SURFACE ROUGHNESS
MEASUREMENT SYSTEM BASED ON VERTICAL
SCANNING INTERFEROMETR



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 149489
รับ เดือน ปี ๗ ๘ อ.ศ. 2561

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
.. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการปีการศึกษา 2559 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IMPROVEMENT OF SURFACE ROUGHNESS
MEASUREMENT SYSTEM BASED ON VERTICAL
SCANNING INTERFEROMETRY



SUPAKRIT CHANGTAM

ITSARIYA NISSAI

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ACADEMIC YEAR 2016
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การปรับปรุงระบบการวัดความเรียบผิว โดยอาศัยหลักการแทรกสอดแบบ
การกวาดแนวตั้ง
Improvement of Vertical Scanning Interferometry for Surface
Profile Measurement

ชื่อนักศึกษา นายศุภกฤต ช่างทำ รหัสนักศึกษา 56051221
 นางสาวอิสริยา นิสสัย รหัสนักศึกษา 56051252






ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2559

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
อ.สุรชาติ กมลดีลก ประธานกรรมการ	
ดร.พิศาล สุขวิสูตร กรรมการ	
ดร.ภาณุพล ไชลอนกระโทก กรรมการ	
รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การปรับปรุงระบบการวัดความเรียบผิวโดยอาศัยหลักการแทรกสอดแบบการกวาดแนวตั้ง	
ชื่อนักศึกษา	นายศุภกฤต ช่างทำ	รหัสนักศึกษา 56051221
	นางสาวอิสริยา นิสสัย	รหัสนักศึกษา 56051252
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	
ปีการศึกษา	2559	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.วรวุฒิ เถาลัดดา	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาความเรียบพื้นผิวและโครงสร้างสามมิติของวัสดุ โดยใช้การกวาดในแนวตั้งและหลักการแทรกสอดของแสง วิธีการตรวจสอบดังกล่าวไม่มีการสัมผัสกับพื้นผิววัสดุทำให้สามารถใช้ในการตรวจสอบวัสดุที่ไม่ต้องการทำลายพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งในโครงการพิเศษได้ใช้หลักการแทรกสอดของแสงแบบไม่เคลือบ โดยให้ไดโอดเปล่งแสงความเข้มสูงสีฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดแสง เมื่อวัสดุที่ต้องการตรวจสอบถูกขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริกในระดับนาโนเมตร ทำให้เกิดภาพริ้วการแทรกสอดและถูกบันทึกด้วยกล้อง CCD ภาพริ้วการแทรกสอดที่บันทึกได้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Matlab และแสดงผลในรูปของโครงสร้างสามมิติ

คำสำคัญ : ความเรียบพื้นผิว , การแทรกสอดของแสงแบบการกวาดในแนวตั้ง , การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย

Title	Improvement of Vertical Scanning Interferometry for Surface Profile Measurement	
Students	Mr Supakrit Changtam	Student ID 56051221
	Miss Itsariya Nissai	Student ID 56051252
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)	
Department	Physics	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2016	
Advisor	Assoc.Prof.Dr. Warawoot Thowladda	
Co-Advisor	Dr. S Tipawan Khlayboonme	

Abstract

This special project is a study of surface roughness and 3D surface profile of materials on blue LED vertical scanning interferometry (VSI). This method of inspection is non-contact and non-destructive, so it can be used to check for surface that is sensitive to the touch. The special project uses the principle of interference of Michelson's Interferometer by providing high-intensity blue light emitting diode as a light source. When the object is driven by a Piezo Control at the nanometer level, the resulting fringe pattern is recorded on a CCD camera. The recorded interfering image were analyzed by Matlab program and displayed in three-dimension.

Keywords : Surface Roughness, Vertical Scanning Interferometry (VSI), Non-Destructive Testing

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ซึ่งได้รับการสนับสนุนและความอนุเคราะห์จาก รศ.ดร. วราวุฒิ เถาถัดดา อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำและชี้แนะแนวทางและวิธีการแก้ไขปัญหาต่างๆ และ ดร. ศ ทิพวรรณ คล้ายบุญมี อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่คอยให้คำปรึกษาต่างๆที่สามารถทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยได้อย่างราบรื่น ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่คอยอบรมสั่งสอนพร้อมทั้งให้ความรู้ความสามารถที่สามารถนำไปใช้ในอนาคตได้

ขอขอบคุณ คุณวีระพงษ์ วิริยประสิทธิ์ชัย ที่คอยช่วยเหลือ ชี้แนะแนวทางและคำปรึกษาในการเขียนโปรแกรม LabVIEW

ขอขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ทุกคนใน Surface Physics and Laser Research Laboratory ที่คอยช่วยเหลือให้โครงการพิเศษเล่มนี้ผ่านลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณพ่อคุณแม่และครอบครัว ที่คอยให้ความสนับสนุนและส่งเสริมในการศึกษาตลอด 4 ปีที่ผ่านมา อีกทั้งยังคอยให้กำลังใจและเป็นที่ยึดเหนี่ยวที่ปรึกษาที่ดีเสมอ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณทุกคนที่ไม่ได้กล่าวถึงที่ทำให้พวกเราประสบความสำเร็จในโครงการพิเศษเล่มนี้ อีกทั้งยังมอบประสบการณ์และการใช้ชีวิตเพื่อนำไปใช้ต่อในอนาคตได้

ศุภกฤต ช่างทำ
อิสริยา นิสสัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ความหมายของพื้นผิว	3
2.1.1 ความหมายของความหมายพื้นผิว	3
2.1.2 ประเภทการวัดความหยาบผิวเฉลี่ย (Average parameter)	3
2.1.3 ประเภทการวัดความหยาบผิวโดยขนาด (Amplitude parameter)	5
2.2 ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์	7
2.2.1 หลักการพื้นฐานของไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ด้วย He-Ne เลเซอร์	7
2.2.2 ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ด้วย LED สีฟ้า	7
2.2.3 แนวทางเดินแสงของไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์	8
2.3 Vertical scanning interferometry (VSI)	8
2.4 เชียร์เพลต อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Shear Plate Interferometer)	9
2.4.1 หลักการทำงานพื้นฐานของเชียร์เพลต	9
2.5 เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect)	11
2.6 สเตรนเกจ (strain gauge)	11
2.6.1 หลักการพื้นฐานของสเตรนเกจ (Strain gage)	11
2.6.2 การใช้สเตรนเกจวัดความเครียดของวัตถุ	12
2.6.3 การใช้งานสเตรนเกจ	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	14
3.1 ระบบการสร้างภาพรีการแทรกสอดด้วยกระจก	14
3.1.1 ระบบการจัดแสงเพื่อสร้างลำแสงขนานด้วยแหล่งกำเนิดแสง He-Ne Lase	14
3.1.2 การจัดระบบแสง Michelson Interferometry (MI) ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED	17
3.2 ส่วนควบคุมของการเคลื่อนที่กระจกอ้างอิง	19
3.2.1 เพียโซอิเล็กทริกและสเตรนเกจ	19
3.2.2 การเชื่อมต่อ Piezo Driver T-Cube (KPZ101) กับ Strain Gauge Reader T-Cube (TSG001)	20
3.3 การเชื่อมต่อ LABVIEW กับ CCD Camera, Piezo Control (KPZ101) และ Strain Gauge Reader (TSG001)	21
3.4 การวิเคราะห์ภาพ	22
3.4.1 การใช้โปรแกรม Matlab วิเคราะห์ภาพรีการแทรกสอด	23
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	24
4.1 ผลจากการจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง He-Ne Laser	24
4.2 ผลจากการจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED (Light emitting diode)	24
4.3 การใช้โปรแกรม Matlab วิเคราะห์ความเรียบพื้นผิวของตัวอย่าง (VSI Analyze Simulation)	25
4.3.1 ผลการวิเคราะห์ภาพเมื่อเพียโซขยับไปเป็นระยะ 50 nm	25
4.3.2 ผลการวิเคราะห์ภาพเมื่อเพียโซขยับไปเป็นระยะ 100 nm	27
4.3.3 ผลการวิเคราะห์ภาพเมื่อเพียโซขยับไปเป็นระยะ 150 nm	28
4.4 ผลการทดลองจากการจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED (Light emitting diode) กับกระจก ที่มีระดับพื้นผิวตรงกลางสูงกว่าระดับพื้นผิวด้านข้าง	30
4.4.1 การใช้โปรแกรม Matlab วิเคราะห์ความเรียบพื้นผิวของตัวอย่าง (VSI Analyze Simulation)	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.5 ผลการทดลองจากการจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED (Light emitting diode) กับกระจก ที่มีระดับพื้นผิวด้านขวาสูงกว่าด้านซ้าย	32
4.5.1 การใช้โปรแกรม Matlab วิเคราะห์ความเรียบพื้นผิวของตัวอย่าง (VSI Analyze Simulation)	33
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	34
5.1 สรุปผล	34
5.1.1 การจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วย He –Ne Laser	34
5.1.2 การจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วย Blue LED	34
5.1.3 การใช้ซอฟต์แวร์ ATP เพื่อควบคุม Piezo Control	34
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	35
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ระยะเวลาดำเนินงาน	1
4.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ภาพรีเวิร์กการแทรกสอดเมื่อเพียโซขยายไปเป็นระยะ 50 nm	26
4.3 ระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ภาพรีเวิร์กการแทรกสอดเมื่อเพียโซขยายไปเป็นระยะ 100 nm	28
4.4 ระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ภาพรีเวิร์กการแทรกสอดเมื่อเพียโซขยายไปเป็นระยะ 150 nm	29
4.5 เงื่อนไขสำหรับการปลูกฟิล์มบางอะลูมิเนียม	30
4.6 เงื่อนไขสำหรับการปลูกฟิล์มบางอะลูมิเนียม	32



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความหยาบพื้นผิวเฉลี่ยเลขคณิต	4
2.2 ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง	5
2.3 ความหยาบผิวเฉลี่ยปริมาณ	5
2.4 ความหยาบผิวเฉลี่ยรูปร่าง	6
2.5 ความหยาบผิวขนาดโดยรวม	6
2.6 ความหยาบผิวขนาดหลุมลึกสุด	7
2.7 ความหยาบผิวขนาดยอดสูงสุด	7
2.8 ความหยาบผิวขนาดโดยเฉลี่ย	8
2.9 ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์	8
2.10 พิจารณาแนวทางเดินแสงทั้งหมด	8
2.11 ภาพจำลองการวางรั้วการแทรกสอดในแนวตั้งเพื่อวิเคราะห์ภาพ	9
2.12 Shear Plate SI254 ของบริษัท THORLAB	9
2.13 Shear Plate Interferometry	9
2.14 ลักษณะของลำแสงบนเซียร์เพลตที่ลำแสงขนาน	10
2.15 ลักษณะของลำแสงบนเซียร์เพลตที่ลำแสงไม่ขนาน	10
2.16 เพียโซอิเล็กทริกเปลี่ยนแรงกดไฟฟ้าเป็นพลังงานไฟฟ้า	11
2.17 Wheatstone bridge	13
3.1 การจัดแสงเพื่อสร้างลำแสงขนาน ด้วยแหล่งกำเนิดแสง He-Ne Laser	14
3.2 การจัดระบบแสง Michelson interferometer ด้วยแหล่งกำเนิดแสง He-Ne Laser	15
3.3 การใช้เซียร์เพลตตรวจสอบลำแสงขนาน	16
3.4 การจัดแสงเพื่อสร้างลำแสงขนาน ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED	17
3.5 การจัดระบบแสง Michelson interferometer ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED	18
3.6 การเชื่อมต่อ Piezo Driver T-Cube (KPZ101) กับ Strain Gauge Reader T-Cube (TSG001)	20
3.7 ผลึกเพียโซที่ซึบหรือหดกระจุกตัวอย่าง	20
3.8 block diagram โปรแกรมที่ใช้ควบคุม Piezo Driver	21
3.9 Front Panel โปรแกรมที่ใช้ควบคุม Piezo Driver	21
3.10 interferogram ของภาพ 1 ภาพที่ถูกเก็บบันทึกด้วยกล้อง CCD	22
3.11 โปรแกรม Matlab ที่ใช้ในการวิเคราะห์ภาพ	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ภาพรีวิวกการแทรกสอดเมื่อแหล่งกำเนิดแสงคือ He-Ne Laser	24
4.2 ภาพรีวิวกการแทรกสอดเมื่อแหล่งกำเนิดแสงคือ Blue LED	24
4.3 โปรแกรมวิเคราะห์ความเรียบพื้นผิว	25
4.4 ภาพ 3D Surface ที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Matlab	26
4.5 ภาพ 3D Surface ที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Matlab	27
4.6 ภาพ 3D Surface ที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Matlab	28
4.7 ภาพรีวิวกการแทรกสอดของผิวตัวอย่างทดสอบเป็นกระจกความเรียบสูง ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์ม โดยลักษณะพื้นผิวตรงกลางสูงกว่าพื้นผิวด้านข้าง	30
4.8 การวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรม Matlab แต่ละพิกเซลของภาพที่บันทึกได้ทั้งหมด	31
4.9 แสดงภาพ 2D ของภาพที่วิเคราะห์	31
4.10 แสดงภาพ 3D ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่มีตรงกลางสูงกว่าบริเวณด้านข้าง	32
4.11 ภาพรีวิวกการแทรกสอดของผิวตัวอย่างทดสอบเป็นกระจกความเรียบสูง ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มโดยลักษณะพื้นผิวด้านขวาสูงกว่าพื้นผิวด้านซ้าย	33
4.12 การวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรม Matlab แต่ละพิกเซลของภาพที่บันทึกได้ทั้งหมด	33
4.13 แสดงภาพ 2D ของภาพที่วิเคราะห์	34
4.14 แสดงภาพ 3D ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่มีตรงกลางสูงกว่าบริเวณด้านข้าง	34

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการใช้งานชิ้นงานส่วนหลายๆอย่างนั้น ลักษณะของพื้นผิวของชิ้นงานมีความสำคัญต่อการใช้งานเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้นในการผลิตเราจำเป็นต้องมีการกำหนด กรรมวิธีการผลิต ความหยาบของพื้นผิวที่ต้องการ และลักษณะของพื้นผิวที่ต้องการอื่นๆเข้าไปด้วย เพื่อให้ชิ้นงานสามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ ซึ่งลักษณะของพื้นผิววัสดุแต่ละชนิดมีความเรียบของพื้นผิวที่แตกต่างกัน บางชนิดไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า จึงทำให้การตรวจสอบความเรียบของวัสดุมีความจำเป็นต่อการตัดสินใจในการเลือกใช้วัสดุ เพื่อให้เกิดประโยชน์และประสิทธิภาพสูงสุด

ในการวัดความเรียบของพื้นผิววัสดุ เนื่องจากวัสดุบางชนิดมีความเปราะบางและเกิดรอยขีดข่วนได้ง่าย การตรวจสอบแบบไม่ทำลายจึงมีความเหมาะสมสำหรับการวัดชิ้นงาน เพื่อให้ชิ้นงานที่ได้เกิดความเสียหายน้อยที่สุด เพราะชิ้นงานในแต่ละส่วนมีความสำคัญต่อโครงสร้างของการผลิตที่ได้ ออกแบบไว้ ซึ่งการตรวจสอบแบบไม่ทำลายสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การใช้คลื่นอัลตราโซนิก การวิเคราะห์ทางแสง

การตรวจสอบและวิเคราะห์ความเรียบของพื้นผิวโดยใช้แสง เป็นการตรวจสอบที่สามารถวัดความเรียบของพื้นผิววัสดุได้ในระดับนาโนเมตร และการตรวจสอบโดยใช้แสงเป็นการตรวจสอบวัสดุแบบไม่ทำลายจึงทำให้พื้นผิวของวัสดุไม่เกิดความเสียหายจากการตรวจสอบ นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบได้กับวัสดุหลากหลายชนิดและหลากหลายรูปร่าง ซึ่งในโครงการพิเศษนี้ได้เลือกใช้วิธีการจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วย LED (Light Emitting Diode) สีฟ้า ในการตรวจสอบความเรียบของพื้นผิวชิ้นงานเพื่อให้ชิ้นงานยังคงสภาพและเกิดการใช้งานที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการแทรกสอดของแสง
2. เพื่อนำหลักการแทรกสอดของแสงมาประยุกต์ใช้ในเครื่องมือวัด
3. เพื่อศึกษาระบบการวัดความเรียบของพื้นผิวโดยอาศัยหลักการแทรกสอดแบบการกวาดแนวตั้ง
4. เพื่อศึกษาการทำงานของระบบ Michelson Interferometry เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงจากเลเซอร์แสงสีแดงและหลอด LED สีฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาความเป็นมาของหลักการแทรกสอดของแสง
2. ติดตั้งระบบ Michelson Interferometry
3. การจัดลำแสงขนานโดยใช้ Michelson Interferometry
4. จัดเก็บรูปภาพของการแทรกสอดของแสงที่เกิดขึ้นในตัวอย่างแต่ละชนิด
5. เขียนโปรแกรม Matlab เพื่อทำการวิเคราะห์ความเรียบของวัสดุ
6. วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลองของระบบการวัดความเรียบของพื้นผิว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจในเรื่องการแทรกสอดของแสงและเครื่องมือวัดความเรียบของพื้นผิว
2. สามารถวิเคราะห์และจำลองโครงสร้างของพื้นผิววัตถุออกมาในรูปแบบ 3 มิติ
3. สามารถพัฒนาและปรับปรุงเครื่องมือวัดพื้นผิว
4. ระบบและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดไม่เกิดอันตรายต่อผู้ใช้งาน

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ระยะเวลาในการดำเนินงาน							
กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม	เมษายน
ศึกษาหลักการ							
ตรวจสอบความเรียบ							
ของพื้นผิว							
		ศึกษาหลักการ					
		Michelson					
		Interferometry					
			ทดลองตามทฤษฎี				
					ศึกษาและออกแบบ		
					โปรแกรมวิเคราะห์		
						สรุปผลการทดลอง	
						ปรับปรุงและแก้ไข	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความหยาบของพื้นผิว

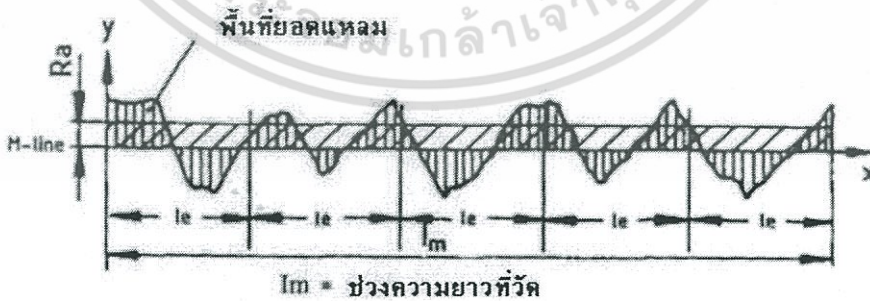
2.1.1 ความหมายของความหยาบผิว

ความหยาบผิวแปลมาจากคำว่า “Surface Roughness” ในภาษาอังกฤษ หมายถึงขนาดความขรุขระของผิว หากมีความขรุขระมากแสดงว่ามีความหยาบมาก หากมีความขรุขระน้อยก็แสดงว่ามีความหยาบน้อย ความขรุขระหรือความหยาบจะใช้กับผิวของวัสดุ แต่บางที่อาจใช้คำว่าความเรียบ (Flat) ซึ่งเป็นคำที่อาจทำให้สับสน เพราะความเรียบมักใช้กับแผ่นสแตนเลสแผ่นเรียบหมายถึงแผ่นไม่ค่อยเป็นคลื่น (wave) ด้วยเหตุนี้ในบทความนี้จะใช้คำว่าความหยาบผิวแทนคำว่า “Roughness” ในภาษาอังกฤษ

2.1.2 ประเภทการวัดความหยาบผิวเฉลี่ย (Average parameter)

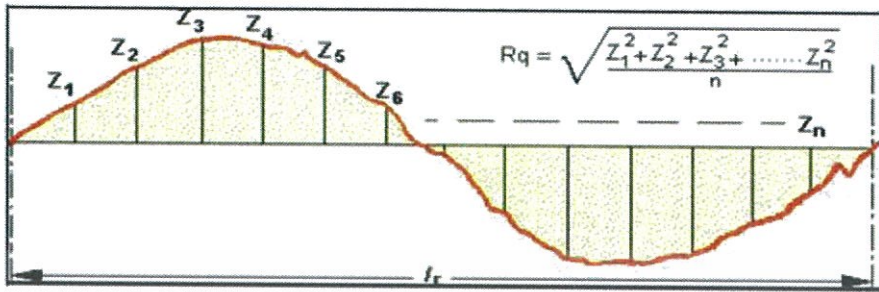
ประเภทการวัดความหยาบผิวเฉลี่ย (Average parameter) คืออาศัยการวัดแล้วคำนวณค่าความหยาบผิวออกมาเป็นค่าความหยาบผิวเฉลี่ยซึ่งจะทำให้เรารู้ระดับความหยาบโดยรวมแต่ไม่สามารถรู้ลักษณะความคลาด เคลื่อนสูงต่ำของความหยาบ วิธีการกลุ่มนี้ได้แก่ Ra Rku Rq และ Rsk

1. ความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (Roughness average: Ra) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวด้วยค่าเฉลี่ยทางเลขคณิตของผิวที่วัด ซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้กันมากที่สุด และหลายมาตรฐานมักอ้างอิงค่านี้ในการกำหนดมาตรฐานความหยาบผิว การหาค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิตได้จากการรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลาง (M-Line) กับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลางหารด้วยความยาวเฉลี่ย (Lm) โดยที่ค่าของ Ra มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร (μm)



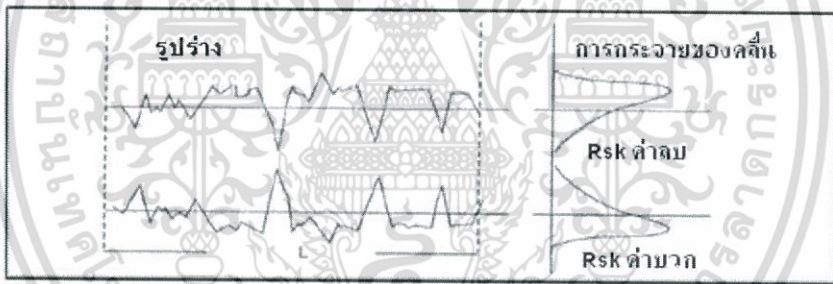
รูปที่ 2.1 ความหยาบพื้นผิวเฉลี่ยเลขคณิต

2. ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (Roughness root mean square : Rq) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวด้วยรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของผิวที่วัด



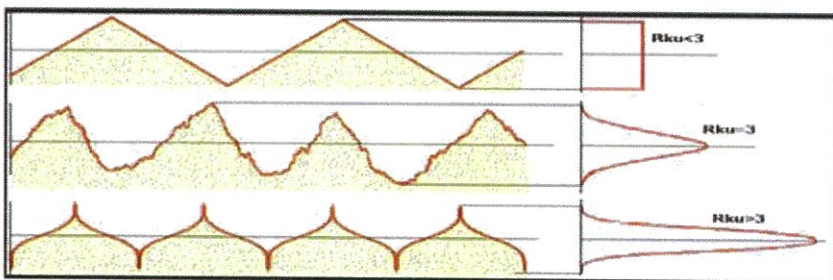
รูปที่ 2.2 ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง

3. ความหยาบผิวเฉลี่ยปริมาณ (Roughness skewness : Rsk) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวโดยการวัดปริมาณของยอดและหลุม โดยปริมาณของยอดให้เป็นค่าบวก ส่วนปริมาณของหลุมให้เป็นค่าลบ หากค่าใดมีมากก็แสดงให้เห็นถึงการมียอดหรือหลุมมากนั่นเอง



รูปที่ 2.3 ความหยาบผิวเฉลี่ยปริมาณ

4. ความหยาบผิวเฉลี่ยรูปร่าง (Roughness kurtosis : Rku) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวโดยแสดงให้เห็นถึงลักษณะรูปร่างของยอดผิว ว่ามีลักษณะยอดโค้ง ยอดแหลม หรือยอดเรียบ



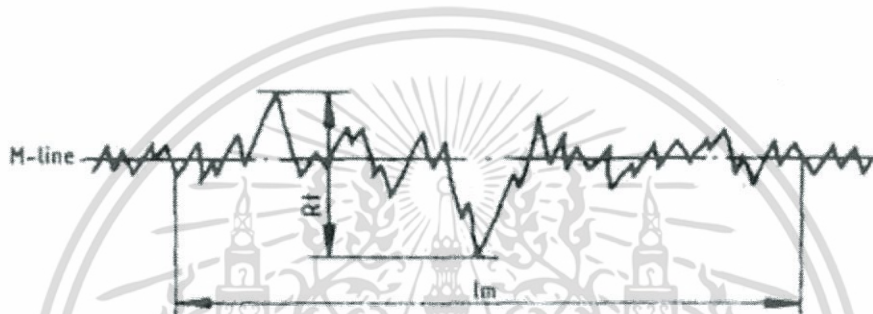
รูปที่ 2.4 ความหยาบผิวเฉลี่ยรูปร่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ประเภทการวัดความหยาบผิวโดยขนาด (Amplitude parameter)

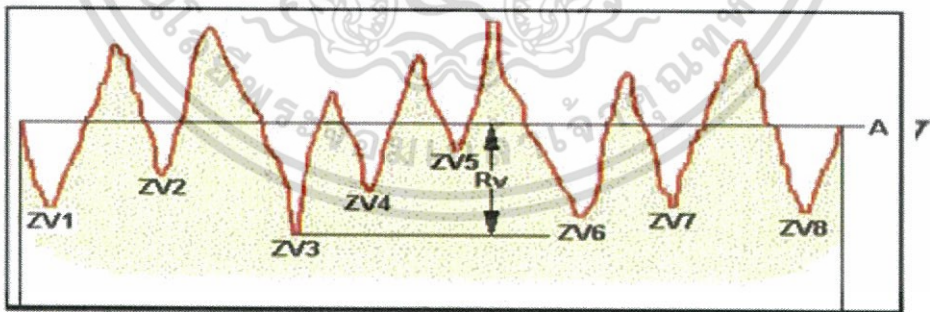
ประเภทการวัดความหยาบผิวโดยขนาด (Amplitude parameter) คือ อาศัยการวัดหาค่าสูงต่ำของขนาดความหยาบของพื้นผิว ซึ่งจะทำให้เรารู้รูปลักษณะของความหยาบได้ชัดเจนกว่าวิธีการกลุ่มนี้ได้แก่ R_p R_t R_v และ R_z

1. ความหยาบผิวขนาดโดยรวม (Roughness total height : R_t , R_y) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวโดยวัดขนาดความห่างระหว่างยอดสูงสุดถึงหลุมลึกสุดของผิว ค่านี้มีประโยชน์มากตรงที่หากเราต้องการขัดผิวเพื่อขจัดความขรุขระออกให้หมด เราจะรู้ได้ว่าจะต้องขัดผิวลงไปลึกกี่ไมครอน



รูปที่ 2.5 ความหยาบผิวขนาดโดยรวม

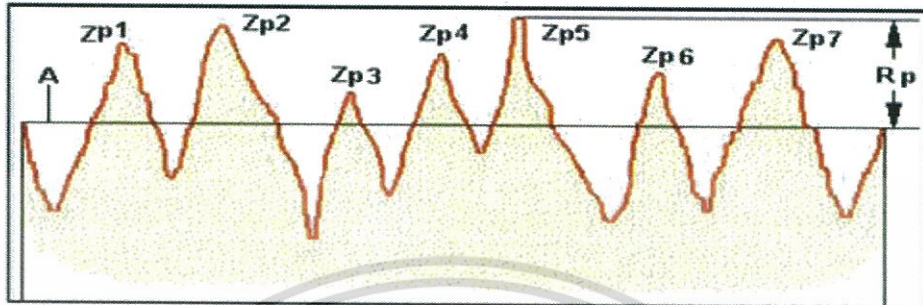
2. ความหยาบผิวขนาดหลุมลึกสุด (Roughness valley : R_v) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวโดยวัดขนาดความลึกของหลุม โดยแสดงความลึกหลุมที่มีขนาดลึกที่สุด



รูปที่ 2.6 ความหยาบผิวขนาดหลุมลึกสุด

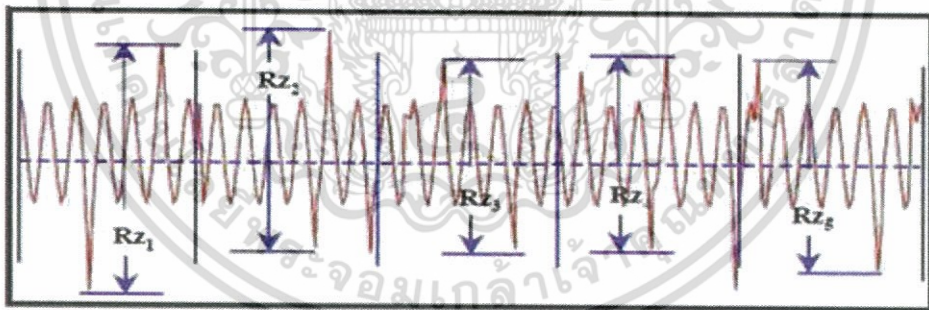
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ความหยาบผิวขนาดยอดสูงสุด (Roughness Peak : Rp) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวโดยวัดขนาดความสูงของยอด โดยแสดงความสูงของยอดที่มีขนาดสูงที่สุด



รูปที่ 2.7 ความหยาบผิวขนาดยอดสูงสุด

4. ความหยาบผิวขนาดโดยเฉลี่ย (Roughness Ten-point mean : Rz) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวโดยวัดขนาดความสูงของยอดกับความลึกของหลุม โดยแสดงขนาดเฉลี่ยของระยะระหว่างความสูงของยอดกับความลึกของหลุม ทั้งหมด 5 ชุด การวัดทดสอบเป็นช่วงเท่า ๆ กัน 5 ช่วง แล้วนำค่าที่ได้มารวมกันหารด้วย 5 โดยที่ค่าของ Rz มีหน่วยเป็นไมโครเมตร[1]



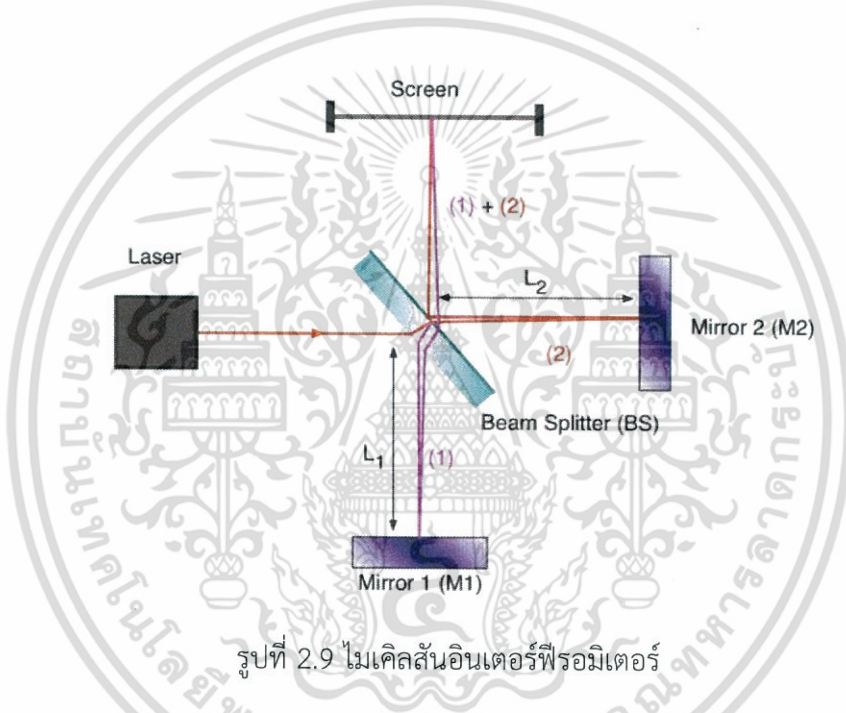
รูปที่ 2.8 ความหยาบผิวขนาดโดยเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

2.2.1 หลักการพื้นฐานของไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ด้วย He-Ne เลเซอร์

ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ เป็นรูปแบบการแทรกสอดเกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดแสง โคฮีเรนต์เดียวกัน ลำแสงจะถูกแยกออกเป็นแสงสองขบวนโดยตัวแยกแสง (Beam Splitter : BS) โดยปกติ ลำแสงลำที่ 1 จะสะท้อน (Reflected : R) ตัวแยกแสงและไปตกกระทบ Mirror 1 (M1) จากนั้นจะสะท้อนกระจกกลับมายังตัวแยกแสง และส่งผ่านละแสงไปยังฉากรับแสง (Screen) และลำแสงอีกลำหนึ่งจะส่งผ่าน (Transmitted : T) โดยตัวแยกแสงไปยัง Mirror 2 (M2) และสะท้อน กระจกกลับมายังตัวแยกแสง จากนั้นจะสะท้อนตัวแยกแสงไปยังฉากรับแสง ทำให้ได้ลำแสง 2 ลำมา แทรกสอดกันและเกิดภาพริ้วการแทรกสอดบนฉากรับภาพ



รูปที่ 2.9 ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

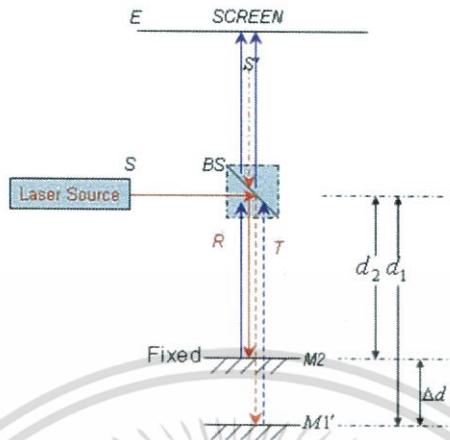
การเกิดภาพริ้วการแทรกสอดนั้น ระยะห่างระหว่างกระจก M1 ถึงตัวแยกแสง และ ระยะห่างระหว่างกระจก M2 ถึงตัวแยกแสง ทั้ง 2 ค่าต้องมีค่าห่างกันไม่เกินความยาวโคฮีเรนต์ของ แหล่งกำเนิด ซึ่งในกรณีเลเซอร์นั้นเป็นแหล่งกำเนิดที่มีความยาวโคฮีเรนต์มาก ดังนั้นหากกระจกทั้ง 2 ห่างจากตัวแยกแสงเป็นระยะที่ไม่เท่ากันก็ยังสามารถเกิดภาพริ้วการแทรกสอดได้

2.2.2 ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ด้วย LED สีฟ้า

ในกรณีของการใช้แหล่งกำเนิดเป็น LED (Light Emitting Diode) สีฟ้า นั้น ความยาว โคฮีเรนต์ของแหล่งกำเนิดมีค่าน้อยมากคือประมาณ 20 ไมโครเมตร ดังนั้นการจะทำให้เกิดภาพริ้ว การแทรกสอดได้กระจกทั้ง 2 จะต้องมียุทธห่างจากตัวแยกแสงต่างกันไม่เกิน 20 ไมโครเมตร ดังนั้น ชนิดของแหล่งกำเนิดมีผลต่อความละเอียดในการปรับระยะกระจก และยังส่งผลต่อการเกิดภาพริ้ว การแทรกสอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 แนวทางเดินแสงของไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์



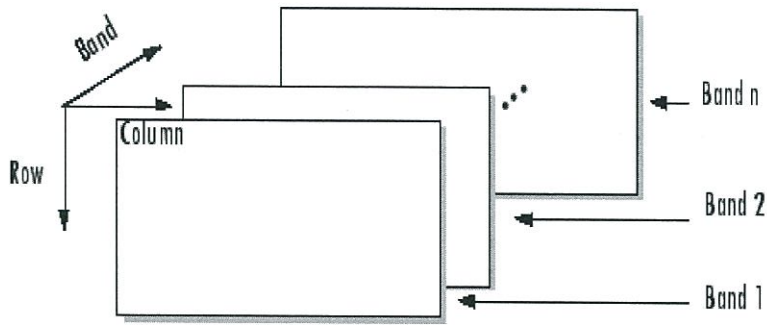
รูปที่ 2.10 พิจารณาแนวทางเดินแสงทั้งหมด

รูปที่ 2.10 แสดงแนวทางเดินแสงทั้งหมด เพื่อพิจารณาความต่างของทางเดินแสง การวางตำแหน่งของกระจก $M1'$ คือการนำมาเปรียบเทียบกับการวางของกระจก $M2$ จะเห็นได้ว่ามีระยะที่แตกต่างกันระยะของกระจก $M1$ ถึงตัวแยกแสงคือ d_1 และระยะของกระจก $M2$ ถึงตัวแยกแสงคือ d_2 จะได้ผลต่างของทางเดินแสงคือ Δd ซึ่งผลต่างทางเดินแสงจะเป็นตัวกำหนดว่าริ้วการแทรกสอดจะเกิดหรือไม่ เพราะการที่ริ้วการแทรกสอดจะเกิดได้ ผลต่างทางเดินแสงจะต้องมีค่าไม่เกิดความยาวโคฮีเรนซ์ของแสง[2]

2.3 Vertical scanning interferometry (VSI)

การวิเคราะห์ภาพริ้วการแทรกสอดเพื่อสร้างภาพโครงร่างพื้นผิววัตถุนั้นมีหลายวิธี แต่วิธี Vertical scanning Interferometry นั้นสามารถวิเคราะห์ได้ง่ายและไม่มีข้อจำกัดว่าพื้นผิว การวิเคราะห์ด้วย Vertical scanning Interferometry เป็นการวิเคราะห์ภาพริ้วการแทรกสอดของแสงแบบกวาดแนวตั้งบนภาพริ้วการแทรกสอด

โดยที่วิธีการวิเคราะห์คือวิเคราะห์ที่ตำแหน่งพิกเซลเดียวกันของทุกภาพ แล้วพิจารณาหาตำแหน่งที่ภาพริ้วการแทรกสอดนั้นมีความเข้มสูงสุด จากนั้นทำการหาตำแหน่งที่ริ้วมีความเข้มสูงสุดในทุกๆพิกเซล[3]



รูปที่ 2.11 ภาพจำลองการวางริ้วการแทรกสอดในแนวตั้งเพื่อวิเคราะห์ภาพ

2.4 เชียร์เพลต อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ (Shear Plate Interferometer)

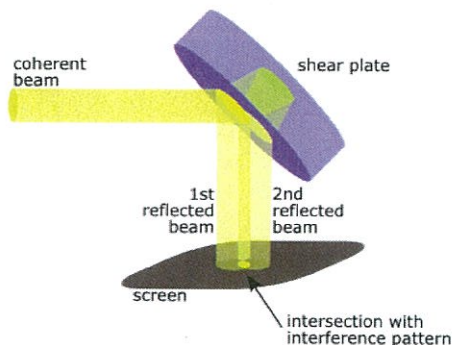
เชียร์เพลต (Shear Plate) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบความขนานของลำแสง (Collimation of light)



รูปที่ 2.12 Shear Plate SI254 ของบริษัท THORLAB

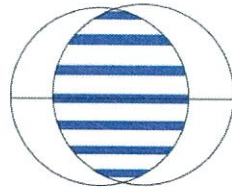
2.4.1 หลักการทำงานพื้นฐานของเชียร์เพลต

เมื่อระนาบของคลื่นตกกระทบบนที่มุม 45 องศา จะเกิดการสะท้อนสองครั้งที่แผ่นเพลต (Plate) ที่มีขอบเขตความหนาจำกัดจะทำให้ลำแสงที่สะท้อนจะถูกแยกออกทางด้านข้าง เชียร์เพลต ถูกสร้างให้มีการสะท้อนแสงที่พื้นผิวด้านหน้า และด้านหลังนั้น มีเส้นทางเดินแสงแตกต่างกันตามลำดับ ส่งผลให้ตรงบริเวณที่มีการซ้อนทับกันของลำแสงขนานนั้นเกิดเป็นริ้วแทรกสอดเส้นตรง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.13 Shear Plate Interferometry ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ริ้วที่เกิดขึ้นนั้นจะมีระยะห่างเท่าๆกัน ขนานตามแนวแกนแสงในซีเรียริงอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ โดยทิศทางของริ้วจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อลำแสงนั้นไม่ได้ขนานกันอย่างสมบูรณ์



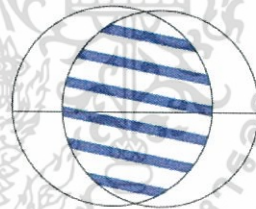
collimated
beam

รูปที่ 2.14 ลักษณะของลำแสงบนซีเรียริงเฟลตที่ลำแสงขนาน

จะเห็นได้ว่าลักษณะของลำแสงบนซีเรียริงเฟลตนั้น มีหลายรูปแบบแต่การที่ลำแสงขนานนั้นจะทำให้ได้ลักษณะลำแสงบนซีเรียริงเฟลตดังรูป collimated beam ส่วนลำแสงที่ไม่ขนานนั้นจะได้ดังรูป diverging beam และ converging beam



diverging
beam



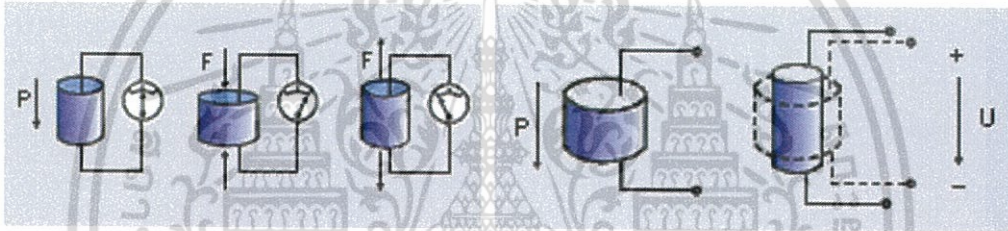
converging
beam

รูปที่ 2.15 ลักษณะของลำแสงบนซีเรียริงเฟลตที่ลำแสงไม่ขนาน

การแก้ไขลำแสงที่ไม่ขนานนั้นอาจทำได้โดยการจัดระบบแสงให้มีความถูกต้อง เช่น การปรับลำเลเซอร์ให้ขนาน การปรับมุมและความสูงของกระจกให้เหมาะสมรวมถึงการปรับระยะเลนส์ซึ่งเป็นระบบจัดแสงขนานให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องด้วย[3]

2.5 เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect)

เพียโซอิเล็กทริกคือระบบเทคโนโลยีที่สร้างและสะสมพลังงานจากแรงกระทบลงบนแผ่นวัสดุ โดยจะเปลี่ยนพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เพียโซอิเล็กทริกสามารถตรวจวัดแรงกลต่างๆ เช่น แรงดัน ความเร่ง การสั่น แรงเครียด หรือแรงกระทำอื่นๆ ที่เกิดกับวัตถุ แล้วเปลี่ยนพลังงานกลต่างๆ เหล่านี้ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ในทางกลับกัน เมื่อให้พลังงานไฟฟ้าแก่วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นเพียโซอิเล็กทริก วัสดุนั้นก็จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้เช่นกัน วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นเพียโซอิเล็กทริกมีหลายชนิด เช่น คริสตัล เซรามิก โพลีเมอร์ ซึ่งมีการนำไปใช้ในงานทั้งทางด้านวิศวกรรมชีวเวช เช่น ไมโครโฟนวัดคลื่นเสียงของหัวใจ ตัวรับสัญญาณของเครื่องอัลตราซาวด์ เครื่องตรวจวัดทางชีวภาพบนผลึกควอตซ์ (Quartz Crystal Microbalance - QCM) ที่มีการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดสารชีวโมเลกุลจำนวนมาก หรือตัวตรวจวัดแรง เป็นต้น และที่กำลังมีแนวโน้มมากยิ่งขึ้นคือการใช้เพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานกล[4]



รูปที่ 2.16 เพียโซอิเล็กทริกเปลี่ยนแรงกดไฟฟ้าเป็นพลังงานไฟฟ้า

2.6 สเตรนเกจ (strain gauge)

สเตรนเกจ (strain gauge) คือเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดแรงดึงเครียด (Strain) ของวัสดุ ส่วนใหญ่สเตรนเกจ จะทำจากเส้นลวดโลหะขนาดเล็กขดเป็นรูปร่างต่างๆอยู่บนแผ่นฉนวน นอกจากนี้ยังมีสเตรนเกจแบบอุปกรณ์กึ่งตัวนำด้วย ซึ่งมีความไวสูงกว่าและขนาดเล็กกว่าแบบลวดโลหะ แต่ก็มีราคาแพงกว่าเช่นกัน สเตรนเกจ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือแบบยึดติด (Bonded Strain Gage) และแบบไม่ยึดติด (Unbonded Strain Gage) ซึ่งสเตรนเกจ ทั้งสองชนิดจะมีลักษณะของโครงสร้างและการทำงานที่คล้ายกันคือ ทำด้วยเส้นลวดเล็กๆ ขดไปขดมาและนำไปติดกับวัตถุที่ต้องการตรวจวัดความเครียด

2.6.1 หลักการพื้นฐานของสเตรนเกจ (Strain gage)

ใช้หลักการของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าภายในเส้นลวด เพื่อการตรวจวัดความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นจากแรงที่มากกระทำบนเส้นลวดนี้ สเตรนเกจ มีการใช้งานในการตรวจวัดได้อย่างกว้างขวาง เช่น การวัดน้ำหนัก ความดัน แรงเชิงกล หรือการเคลื่อนที่ (Displacement)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสเตรนเกจถูกดึงให้ยืดออก ความยาวของเส้นลวดจะเพิ่มขึ้นในขณะที่พื้นที่หน้าตัดจะลดลง ผลก็คือความต้านทานของเส้นลวดจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากความต้านทานโลหะตัวนำจะแปรค่าโดยตรงตามความยาวและแปรค่าผกผันกับพื้นที่หน้าตัด ดังนั้นจึงเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ได้ว่า

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

- เมื่อ R = ความต้านทานของสเตรนเกจ หน่วย โอห์ม
 ρ = ค่าความต้านทานคงที่ของตัวโลหะ หน่วย โอห์มเมตร
 l = ความยาวของเส้นลวด หน่วย เมตร
 A = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ หน่วยตารางเมตร

2.6.2 การใช้สเตรนเกจวัดความเครียดของวัตถุ

การใช้สเตรนเกจ ในการตรวจวัดความเครียดวัตถุนั้น เราจะพิจารณาถึงปริมาณทางกายภาพสองสิ่งคือ ค่าความต้านทานของเกจ (Gage Resistance) ที่เปลี่ยนแปลงและค่าของความยาวที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรสองตัวนี้จะแสดงเป็นอัตราส่วนที่เรียกว่า “เกจ แฟกเตอร์” (Gage Factor) ดังสมการทางคณิตศาสตร์ต่อไปนี้

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L}$$

- เมื่อ K = เกจ แฟกเตอร์
 R = ความต้านทานเริ่มต้น หน่วยโอห์ม
 ΔR = ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง หน่วยโอห์ม
 L = ความยาวเริ่มต้น หน่วยเมตร (m)
 ΔL = ความยาวที่เปลี่ยนแปลง หน่วยเมตร (m)

ในเทอมของ $\Delta L/L$ เราสามารถกำหนดเป็นหน่วยของความเครียด (Unit Strain) ใช้อักษรแทนด้วย G ดังนั้นจึงเขียนเป็นสมการได้ใหม่คือ

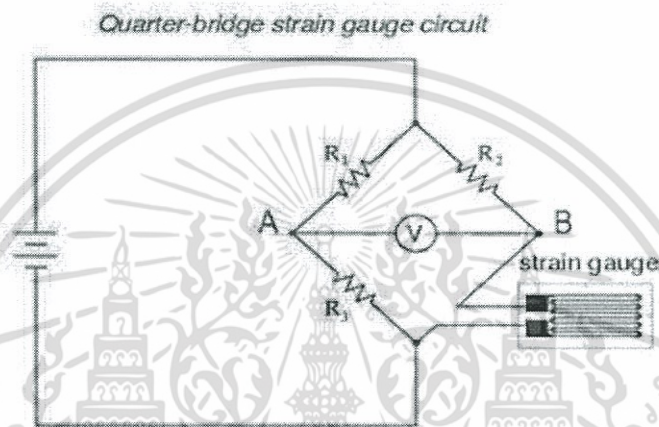
$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L}$$

จากการค้นพบของฮุก (Hooke) เกี่ยวกับวัตถุหลายๆ ชนิดที่ขนาดจำกัด ซึ่งจะมีอัตราส่วนคงที่ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) อยู่ ซึ่งความเค้น (Stress) จะนิยามได้ว่าเป็นแรงภายในต่อหน่วยพื้นที่ค่าคงที่ ค่าคงที่ของสัดส่วนระหว่างความเค้นและเอกสาร์นี้เป็นเอกสาร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเครียดตามกฎของฮุก (Hooke's law) นี้เรียกว่า “ดัชนีการยืดหดของวัสดุ” (Modulus of Elasticity of The Material) หรืออาจจะเรียกว่า “ยังโมดูลัส” (Young's Modulus)

2.6.3 การใช้งานสเตรนเกจ

การใช้งานของสเตรนเกจ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ให้ความเที่ยงตรงในการวัดความยืดหรือหดตัวของวัสดุได้เป็นอย่างดี เช่น การวัดความเครียดในคานเสาของงานด้านโยธา โดยเราจะนำเอาสเตรนเกจ ไปแปะติดกับคานหรือเสาที่ต้องการวัด และต่องานเข้าร่วมกับวงจรบริดจ์ ใช้วัดค่าความต้านทานในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อวัดหาค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป[5]



รูปที่ 2.17 Wheatstone bridge

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 Investigation of a dual-layer structure using vertical scanning interferometry

ซึ่งนำเสนอวิธีการที่ขึ้นอยู่กับการใช้แสงสีขาวด้วยอินเตอร์เฟอริเตอร์แบบกวาดแนวตั้ง เพื่อตรวจสอบโครงสร้างแบบสองชั้น การจัดแสงจะขึ้นอยู่กับปรับเปลี่ยนไมเคิลสันที่มีด้านกระจกอ้างอิงและวัตถุ เมื่อแสงตกกระทบและสะท้อนกับกระจกสองบาน ที่เป็นด้านกระจกอ้างอิงและวัตถุ จะทำให้เกิดการแทรกสอดของแสง ผลปรากฏว่าวิธีที่นำเสนอมีศักยภาพที่ดีในการตรวจสอบโครงสร้างของวัตถุที่มีขนาดเล็ก

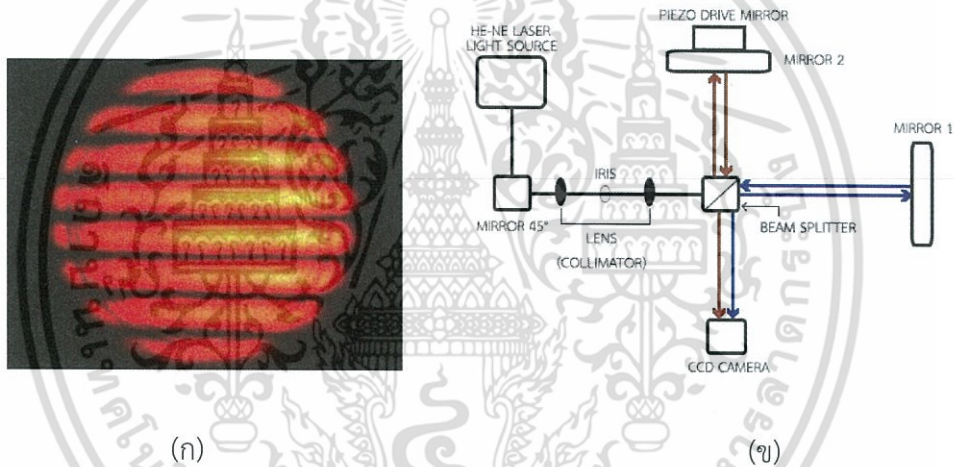
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ระบบการสร้างภาพรีจิวการแทรกสอดด้วยกระจก

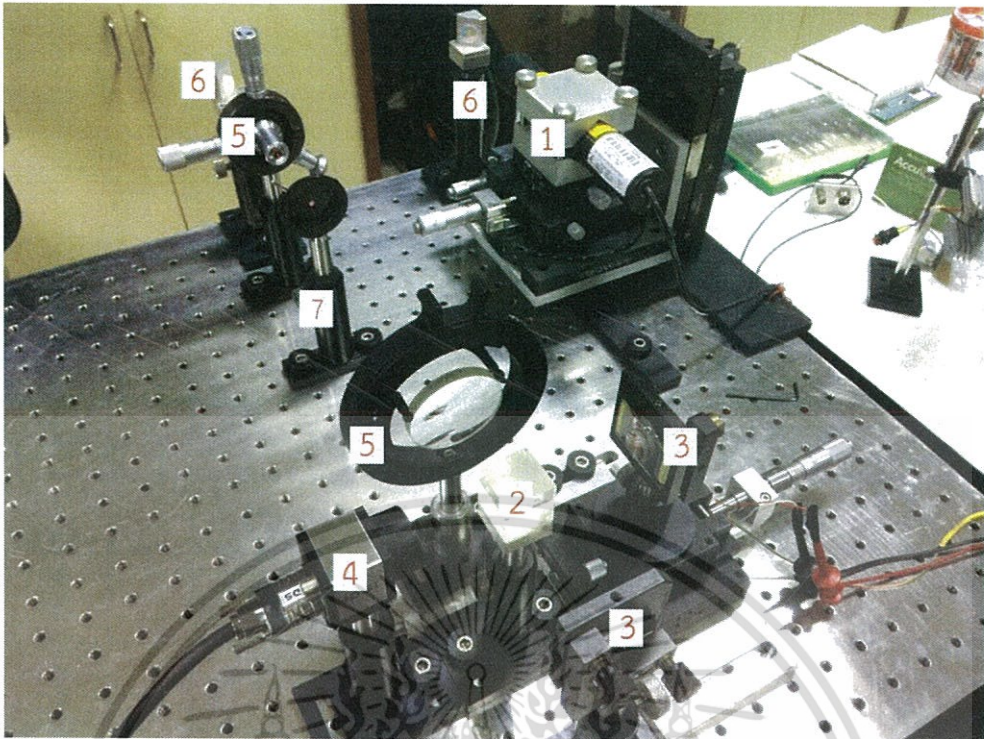
3.1.1 ระบบการจัดแสงเพื่อสร้างลำแสงขนานด้วยแหล่งกำเนิดแสง He-Ne Laser

การจัดระบบแสงเพื่อให้เป็นลำแสงขนานนี้ เป็นขั้นตอนในการทำให้ลำแสงที่ปลายทางนั้นมีขนาดของลำแสงสม่ำเสมอ ไม่ว่าจะตรวจสอบลำแสงที่ระยะห่างจากเลนส์ตัวสุดท้ายของระบบไปเท่าใด ลำแสงก็ยังคงจะมีขนาดเท่าเดิม สาเหตุที่ใช้แหล่งกำเนิดเป็นแสงเลเซอร์ในการตรวจวัดความเป็นลำแสงขนานเนื่องจากมีความเข้มสูง และสามารถเกิดรีจิวการแทรกสอดได้ง่าย



รูปที่ 3.1 การจัดแสงเพื่อสร้างลำแสงขนาน ด้วยแหล่งกำเนิดแสง He-Ne Laser

(ก) ภาพรีจิวการแทรกสอด (ข) Block diagram การจัดระบบแสง



รูปที่ 3.2 การจัดระบบแสง Michelson interferometer ด้วยแหล่งกำเนิดแสง He-Ne Laser

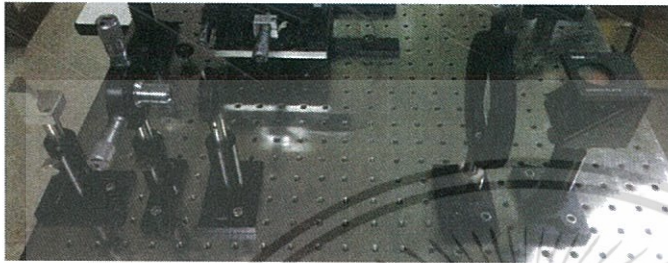
อุปกรณ์ของระบบ Michelson Interferometer ประกอบด้วย

1. แหล่งกำเนิดแสง (Light source) : แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ชนิด He-Ne Laser
2. กระจกแยกแสง (Beam Splitter) : เป็นกระจกที่สามารถแยกลำแสงออกเป็น 2 ส่วน โดยแสงสามารถทะลุผ่านได้ 50% และจะสะท้อนกลับ 50%
3. กระจกความเรียบสูง 2 บาน (M1, M2) : ทำหน้าที่ในการสะท้อนแสงและเกิดการแทรกสอด
4. ฉากรับแสง (screen) : อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับรับภาพริ้วของการแทรกสอดที่เกิดขึ้นในระบบ
5. เลนส์นูนแกมระนาบ (Collimator) : ความยาวโฟกัส 10mm, 250mm
6. กระจกสะท้อนมุม 45 องศา
7. ไอริส 1 อัน
8. เชียร์เพลท : ใช้ตรวจสอบการเป็นลำแสงขนาน

เมื่อจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.2 จะทำให้แสงเป็นลำแสงขนาน โดยวางแหล่งกำเนิดแสง He-Ne Laser ในแนวระนาบ จากนั้นนำเลนส์แกมระนาบทั้งสองอันกับกระจกแยกแสง (BS) มาวางไว้ข้างหน้าแหล่งกำเนิดแสง โดยวางเลนส์อันที่มีความยาวโฟกัส 10 mm ไว้ด้านหน้าของเลนส์ที่มีความยาวโฟกัส 250 mm โดยที่เลนส์ 2 อันนี้ต้องมีระยะห่างกัน 260 mm ไอริส (Iris) จะวางอยู่ระหว่างเลนส์ทั้งสองอัน แล้วต่อกับกระจกแยกแสง (BS) โดยจัดลำแสงให้เข้าที่กึ่งกลางของเลนส์นูนแกมระนาบและไอริส โดยที่ไอริสสามารถขยายลำแสงให้บานออกหรือเล็กลงได้ เราสามารถตรวจสอบได้

ว่าลำแสงที่ผ่านเลนส์ที่มีความยาวโฟกัส 260 nm เป็นลำแสงขนานโดยการนำเชียร์เพลทวางไว้หลังเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลนส์ที่มีความยาวโฟกัส 260 nm ดังรูปที่ 3.3 เมื่อลำแสงที่ได้เป็นลำแสงขนานนำกระจกแยกแสงมาวางโดยให้ลำแสงผ่านกึ่งกลางกระจก จากนั้นนำกระจกความเรียบสูง 2 บานมาวาง ให้กระจกบานที่ 1 เป็นกระจกอ้างอิงและกระจกบานที่ 2 เป็นกระจกของตัวอย่างที่ต้องการวัดความเรียบพื้นผิว วางกระจกอ้างอิงในระนาบเดียวกันแหล่งกำเนิดแสงและตัวแยกแสง วางกระจกตัวอย่างตั้งฉากกับแหล่งกำเนิดแสงและกระจกแยกแสง แล้วนำฉากรับแสงวางตรงข้ามกับกระจกตัวอย่าง



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 การใช้ชีร์เพลตตรวจสอบลำแสงขนาน

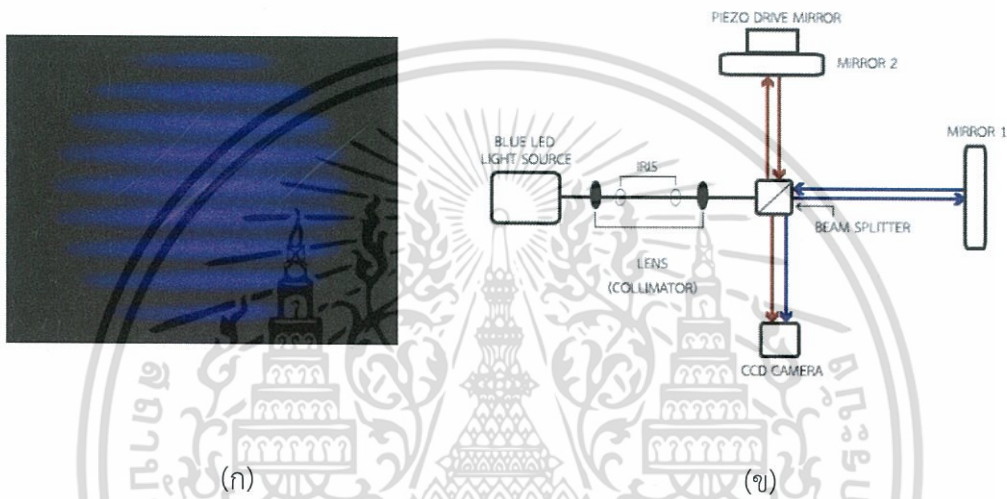
(ก) การวางชีร์เพลตเพื่อใช้ตรวจสอบ

(ข) ภาพริ้วของลำแสงขนาน

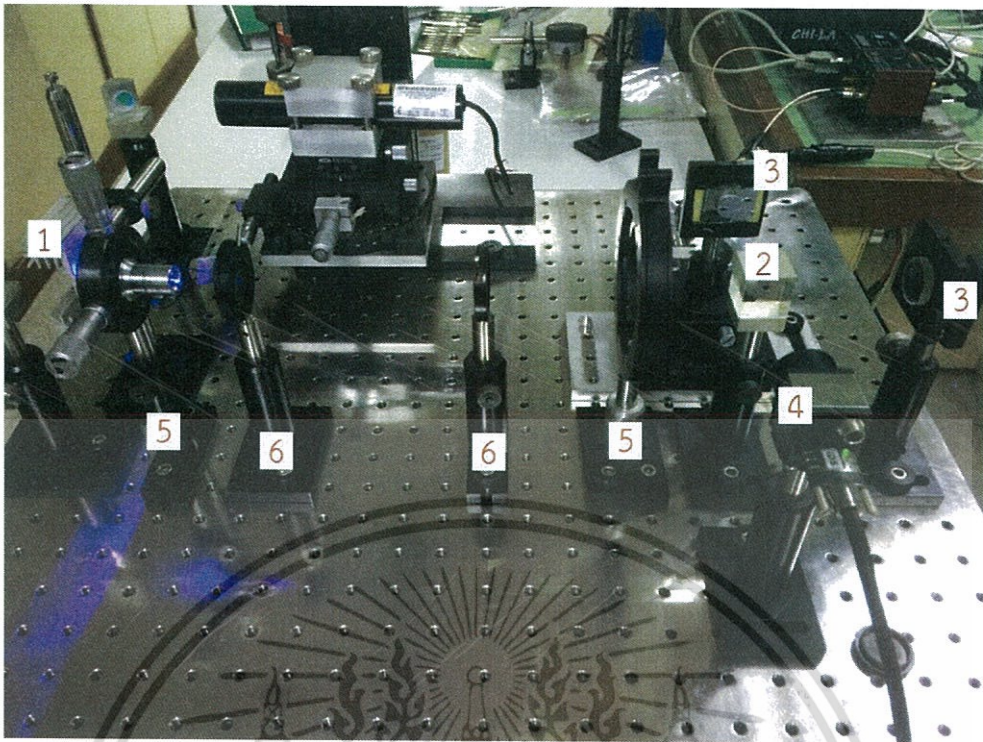
เมื่อจัดอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว จะทำให้เกิดภาพริ้วการแทรกสอด ซึ่งหลักการเกิดภาพริ้วการแทรกสอดของระบบ Michelson Interferometry นั้น คือการที่ลำแสง 2 ลำแทรกสอดกัน แสงที่ส่องออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง จะถูกส่องไปยังกระจกแบ่งแสง (BS) แสงที่มากระทบกระจกแบ่งแสง จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน แสงส่วนแรก จะวิ่งทะลุผ่านไปยังกระจกอ้างอิง และจะสะท้อนกลับไปยังกระจกแบ่งแสง และผ่านกระจกแบ่งแสงไปยังฉากรับ (S) แสงส่วนที่สองจะวิ่งสะท้อนหักมุมกับกระจกแบ่งแสงผ่านไปยังกระจกตัวอย่าง และจะสะท้อนกลับไปยังกระจกแบ่งแสง (BS) และสะท้อนอีกครั้งไปยังฉากรับ (S) โดยจะเกิดเป็นริ้วการแทรกสอดที่มีแถบมืดแถบสว่างสลับกันไปเมื่อระยะห่างระหว่างกระจกแยกแสงกับกระจกอ้างอิงยาวเท่ากับระยะห่างของกระจกแยกแสงกับกระจกตัวอย่าง

3.1.2 การจัดระบบแสง Michelson Interferometry (MI) ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED

เนื่องจาก LED สีฟ้า เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวโคฮีเรนซ์สั้นมากคือประมาณ 20 ไมโครเมตร ทำให้การสร้างภาพริ้วการแทรกสอดนั้นทำได้ค่อนข้างยากเพราะจะเกิดริ้วการแทรกสอดได้เมื่อระยะห่าง ระหว่าง Beam Splitter ถึงกระจกบานอ้างอิง และระยะห่างระหว่าง Beam Splitter ถึงกระจกของตัวอย่าง จะต้องแตกต่างกันไม่เกินความยาวโคฮีเรนซ์ของแสง ซึ่งก็คือ 20 ไมโครเมตรเท่านั้น



รูปที่ 3.4 การจัดแสงเพื่อสร้างลำแสงขนาน ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED
(ก) ภาพริ้วการแทรกสอด (ข) Block diagram การจัดระบบแสง



รูปที่ 3.5 การจัดระบบแสง Michelson interferometer ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED

อุปกรณ์ของการจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED ประกอบด้วย

1. แหล่งกำเนิดแสง (Light source): Blue LED (Blue Light Emitting Diode)
2. กระจกแยกแสง (Beam Splitter) : เป็นกระจกที่สามารถแยกลำแสงออกเป็น 2 ส่วน โดยแสงสามารถทะลุผ่านได้ 50% และจะสะท้อนกลับ 50%
3. กระจกความเรียบสูง 2 บาน (M1, M2) : ทำหน้าที่ในการสะท้อนแสงและเกิดการแทรกสอด
4. ฉากรับแสง (screen) : อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับรับภาพริ้วของการแทรกสอดที่เกิดขึ้นในระบบ
5. เลนส์นูนแกมระนาบ (Plano convex lens) 2 อัน (ความยาวโฟกัส 10 mm, 250 mm)
6. ไอริส 2 อัน
7. เชียร์เพลท : ใช้ตรวจสอบการเป็นลำแสงขนาน

เมื่อจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.5 จะทำให้แสงเป็นลำแสงขนาน แต่เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงเป็น Blue LED จึงมีการใช้ Objective Lens เข้าด้วย เพราะแหล่งกำเนิดนี้ลำแสงจะกระจัดกระจาย การใช้ Objective Lens จะช่วยรวมแสงที่กระจัดกระจายและโฟกัสลำแสงไปยังเลนส์นูนแกมระนาบ (Plano convex lens) ขนาดความยาวโฟกัส 10 mm และ 250 mm นำเลนส์นูนแกมระนาบกับกระจกแยกแสง (BS) มาวางไว้ข้างหน้าแหล่งกำเนิดแสง โดยวางเลนส์อันที่มีความยาวโฟกัส 10 mm ไว้ด้านหน้าของเลนส์ที่มีความยาวโฟกัส 250 mm โดยที่เลนส์ 2 อันนี้ต้องมีระยะห่างกัน 260 mm โดยที่ไอริส (Iris) จะวางอยู่ระหว่างเลนส์ทั้งสองอัน แล้วต่อด้วยกระจกแยกแสง (BS) โดยจัดลำแสงให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าที่กึ่งกลางของเลนส์นูนแกมระนาบและไอริส โดยที่ไอริสสามารถขยายลำแสงให้บานออกหรือเล็กลงได้ เราสามารถตรวจสอบได้ว่าลำแสงที่ผ่านเลนส์ที่มีความยาวโฟกัส 260 nm เป็นลำแสงขนานโดยการนำซีเรียเพลตวางไว้หลังเลนส์ที่มีความยาวโฟกัส 260 nm ดังรูปที่ 3.3 เมื่อลำแสงที่ได้เป็นลำแสงขนานนำกระจกแยกแสงมาวางโดยให้ลำแสงผ่านกึ่งกลางกระจก จากนั้นนำกระจกความเรียบสูง 2 บานมาวาง ให้กระจกบานที่ 1 เป็นกระจกอ้างอิงและกระจกบานที่ 2 เป็นกระจกของตัวอย่างที่ต้องการวัดความเรียบพื้นผิว วางกระจกอ้างอิงในระนาบเดียวกันแหล่งกำเนิดแสงและตัวแยกแสง วางกระจกตัวอย่างตั้งฉากกับแหล่งกำเนิดแสงและกระจกแยกแสงโดยที่กระจกตัวอย่างจะถูกควบคุมการเคลื่อนที่ของกระจกด้วยเพียโซอิเล็กทริก เพื่อปรับระยะที่กระจกของตัวอย่างจะอยู่ในความยาวโคฮีเรนต์ของแสง แล้วนำฉากรับแสงวางตรงข้ามกับกระจกของตัวอย่างที่ต้องการวัด

เมื่อจัดอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว จะทำให้เกิดภาพริ้วการแทรกสอด ซึ่งหลักการเกิดภาพริ้วการแทรกสอดของระบบ Michelson Interferometry นั้น คือการที่ลำแสง 2 ลำแทรกสอดกัน แสงที่ส่องออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง จะถูกส่งไปยังกระจกแบ่งแสง (BS) แสงที่มากระทบกระจกแบ่งแสง จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน แสงส่วนแรก จะวิ่งทะลุผ่านไปยังกระจกอ้างอิง และจะสะท้อนกลับไปยังกระจกแบ่งแสง และผ่านกระจกแบ่งแสงไปยังฉากรับ (S) แสงส่วนที่สองจะวิ่งสะท้อนหักมุมกับกระจกแบ่งแสงผ่านไปยังกระจกตัวอย่าง และจะสะท้อนกลับไปยังกระจกแบ่งแสง (BS) และสะท้อนอีกครั้งไปยังฉากรับ (S) โดยจะเกิดเป็นริ้วการแทรกสอดที่มีแถบมืดแถบสว่างสลับกันไปเมื่อระยะห่างระหว่างกระจกแยกแสงกับกระจกอ้างอิงยาวเท่ากับระยะห่างของกระจกแยกแสงกับกระจกตัวอย่าง

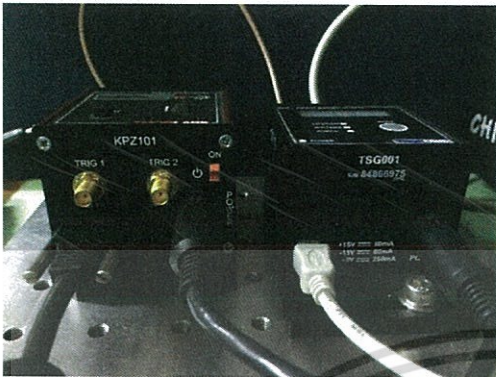
3.2 ส่วนควบคุมของการเคลื่อนที่กระจกอ้างอิง

3.2.1 เพียโซอิเล็กทริกและสเตรนเกจ

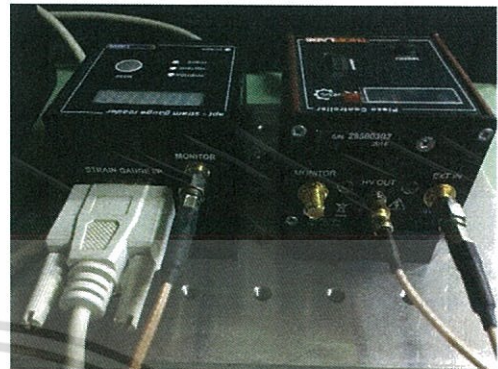
ในส่วนนี้จะทำการให้โวลต์เตจแก่ผลึกเพียโซ เพื่อให้ผลึกเพียโซขยับซึ่งผลึกเพียโซจะติดอยู่กับกระจกด้านหนึ่งของระบบการแทรกสอดของแสงแบบไมเคิลสันทำให้กระจกเลื่อนไปตามระยะที่ต้องการ จากนั้นจะทำการบันทึกภาพริ้วการแทรกสอดที่ระยะต่างๆของกระจกที่เลื่อนไป โดยระยะที่ผลึกเพียโซเลื่อนไปนั้นจะถูกอ่านค่าโดยอุปกรณ์สเตรนเกจ อุปกรณ์ทั้งสองจะเชื่อมต่อกันและใช้โปรแกรมในการควบคุมระยะที่ต้องการให้ผลึกเพียโซเลื่อนไป โดยที่สเตรนเกจจะบ่งบอกว่าผลึกเพียโซนั้นมีการยืดหรือหดเป็นระยะเท่าใด ผลึกเพียโซเปลี่ยนระยะเท่ากับที่สั่งในโปรแกรมหรือไม่ เนื่องจากคุณสมบัติของสเตรนเกจนั้นสามารถอ่านค่าความเครียดของวัสดุ และสามารถแปลงโดยใช้สมการกลายเป็นค่าระยะทางที่เปลี่ยนแปลงได้เมื่อวัสดุมีความเครียดเปลี่ยนไป ด้วยเหตุนี้จึงใช้สเตรนเกจเป็นอุปกรณ์ที่จะป้อนค่ากลับมาสู่การทดลองว่า ผลึกเพียโซขยับไปจริงหรือไม่ และขยับไปเท่าไร ทั้งนี้จะต้องทำการทดสอบก่อนว่าสเตรนเกจนั้นแสดงค่าระยะทางที่ผลึกเพียโซเลื่อนไปอย่างถูกต้องคือระยะทางที่สั่งโปรแกรมให้ขยับเคลื่อนผลึกเพียโซกับค่าระยะทางที่แสดงบน อุปกรณ์สเตรน-เกจนั้นเป็นค่าเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การเชื่อมต่อ Piezo Driver T-Cube (KPZ101) กับ Strain Gauge Reader T-Cube (TSG001)



(ก)



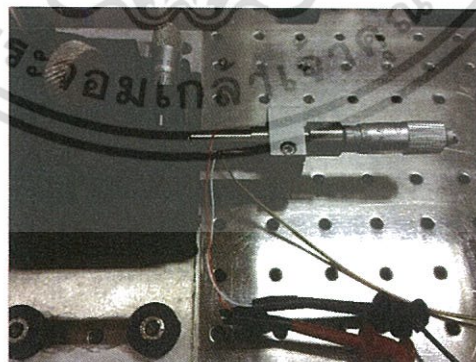
(ข)

รูปที่ 3.6 การเชื่อมต่อ Piezo Driver T-Cube (KPZ101) กับ Strain Gauge Reader T-Cube (TSG001)

(ก) การเชื่อมต่อ Piezo Driver และ Strain Gauge Reader กับ computer

(ข) การเชื่อมต่อระหว่าง Piezo Driver กับ Strain Gauge Reader

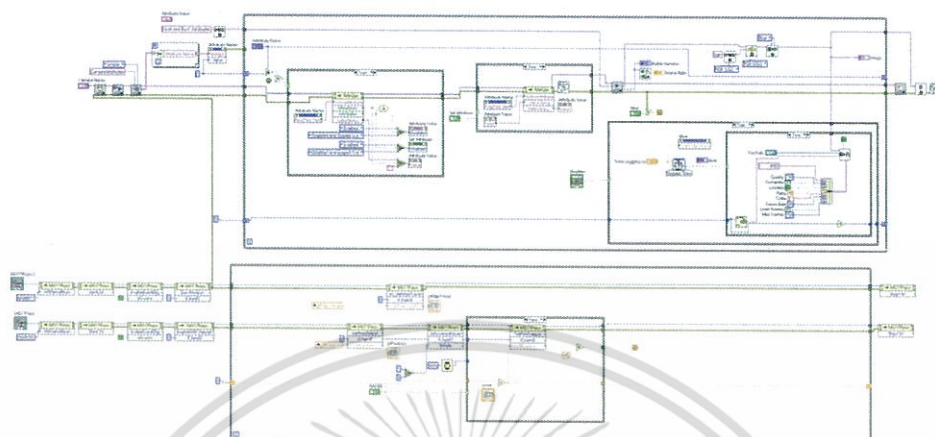
จากรูปที่ 3.6 เป็นการเชื่อมต่อ Piezo Driver กับ Strain Gauge Reader เพื่อควบคุมและอ่านค่าของผลึกเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการขยับกระจกตัวอย่าง โดยควบคุมการขยับเพียโซอิเล็กทริกด้วยคอมพิวเตอร์ เมื่อจ่ายแรงดันให้กับ Piezo Driver ระยะที่ผลึกเพียโซอิเล็กทริกยืดหรือหดจะถูกอ่านค่าด้วย Strain Gauge Reader



รูปที่ 3.7 ผลึกเพียโซที่ใช้ยืดหรือหดกระจกตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเชื่อมต่อ LABVIEW กับ CCD Camera, Piezo Control (KPZ101) และ Strain Gauge Reader (TSG001)



รูปที่ 3.8 block diagram โปรแกรมที่ใช้ควบคุม Piezo Driver



รูปที่ 3.9 Front Panel โปรแกรมที่ใช้ควบคุม Piezo Driver

วิธีการใช้โปรแกรม

1. เลือกโฟลเดอร์ที่ต้องการบันทึกภาพ
2. เลือกโหมดที่ต้องการวัดเป็น close loop หรือ open loop
3. ใส่ระยะที่ต้องการให้เพียโซซัพเป็นนาโนเมตร
4. กดปุ่ม RUN
5. เลือก Attribute name เป็น Exposure Value
6. ใส่ค่า Attribute Value ตามที่เราต้องการยิ่งมีค่ามากค่าความสว่างจะยิ่งมากขึ้น
7. หลังจากตั้งค่าในข้อที่ 6. เรียบร้อยแล้ว กดปุ่ม Set Attribute

เอกสารนี้ 6. กดปุ่ม Record ให้เป็น ON โปรแกรมจะเริ่มทำการบันทึกภาพ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

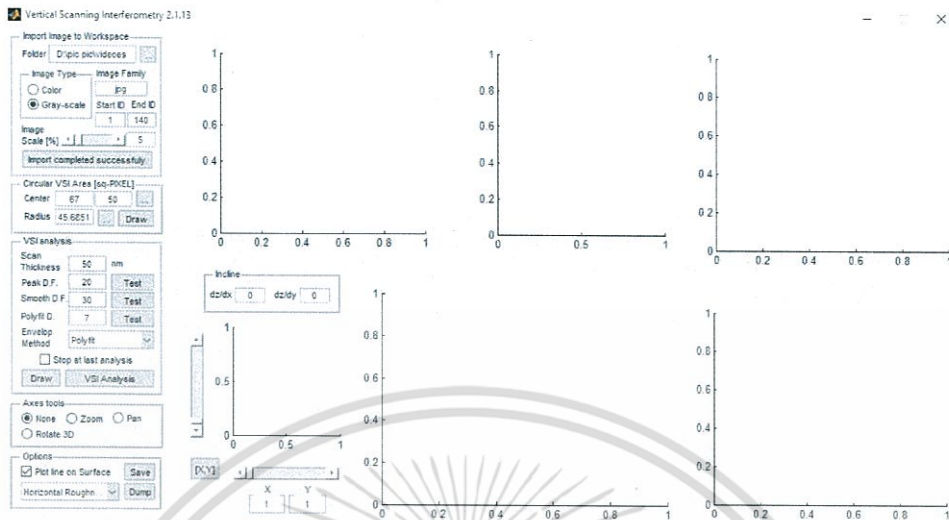
3.4 การวิเคราะห์ภาพ

สำหรับการบันทึก interferogram วัตถุตั้งอยู่บนแท่น PZT โดยจะค่อยๆ ขยับไปตามทิศทางในแนวแกน Z และถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ เพราะ Blue LED มีความยาวคลื่นกลางเป็น 646 นาโนเมตร และเมื่อขยับ PZT ให้เป็น 10 นาโนเมตร แสงที่ตกกระทบบนพื้นผิวของวัตถุที่วางอยู่บนแท่น PZT จะทำให้เกิดพริ้งบนฉากรับภาพ และพริ้งที่เกิดจะถูกบันทึกด้วยกล้อง CCD เมื่อขยับ PZT ไปในแนวแกน Z ในระยะที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้เกิดความเข้มของแสงในแต่ละภาพที่แตกต่างกัน เพราะในการเกิดพริ้งนั้น จะมีความเข้มแสงที่มากที่สุดเพียงจุดเดียว คือจุดที่ระยะของแสงที่สะท้อนจากกระจกแยกแสงกระทบกับผิวของวัตถุ เท่ากับระยะของแสงที่สะท้อนจากกระจกแยกแสงกับกระจกอ้างอิง ยกตัวอย่างเช่น เราสามารถเก็บบันทึกรูปภาพได้ทั้งหมด 10 ภาพ โดยที่พิกเซลที่ 1 ของทั้ง 10 ภาพ อาจจะมีค่าความเข้มแสงมากที่สุดในภาพที่ 5 ซึ่งค่าความเข้มของแสงจะพบได้มากที่สุดเพียงค่าเดียวและความเข้มของแสงที่เกิดขึ้นในแต่ละภาพที่พิกเซลต่างกัน เกิดจากการขยับ PZT ในแนวแกน Z





รูปที่ 3.10 interferogram ของภาพ 1 ภาพที่ถูกเก็บบันทึกด้วยกล้อง CCD

3.4.1 การใช้โปรแกรม Matlab วิเคราะห์ภาพรีฟlectionแทรกสอด



รูปที่ 3.11 โปรแกรม Matlab ที่ใช้ในการวิเคราะห์ภาพ

วิธีการใช้โปรแกรม

1. เลือกโฟลเดอร์ที่เก็บบันทึกรูปภาพรีฟlectionแทรกสอด
2. เลือกภาพแรกที่ต้องการวิเคราะห์ (Start ID) และภาพสุดท้ายที่ต้องการวิเคราะห์ (End ID)
3. เลือก Image scale (%) ตามที่ผู้ทำการทดลองต้องการวัด
4. กด Import
5. Circular VSI Area ที่ Center คลิก  เพื่อทำการเลือกจุดศูนย์กลางวงกลม และที่ Radius คลิก  เพื่อทำการเลือกเส้นรอบวง เพื่อตัดภาพของภาพรีฟlectionแทรกสอดที่ต้องการทำการวิเคราะห์
6. กด Draw
7. คลิก VSI Analysis

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลจากการจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง He-Ne Laser

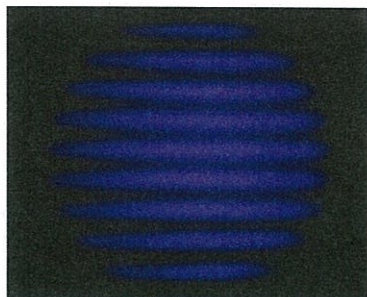
เมื่อทดลองจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วย He-Ne Laser แหล่งกำเนิดแสงขนาน ปรากฏการแทรกสอดที่เกิดขึ้นมีลักษณะเรียงกันเป็นเส้นตรงขนานกันระหว่างแถบมืดกับแถบสว่าง ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพรบกวนการแทรกสอดเมื่อแหล่งกำเนิดแสงคือ He-Ne Laser

4.2 ผลจากการจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED (Light emitting diode)

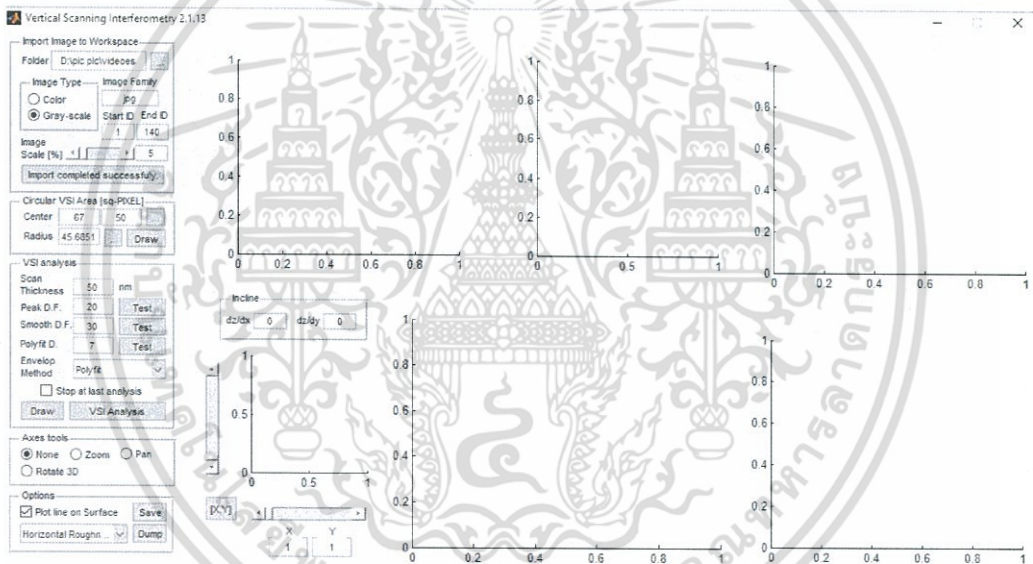
เมื่อทดลองจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วย LED สีฟ้า นั้น ภาพรบกวนการแทรกสอดที่เกิดขึ้นมีลักษณะเรียงกันเป็นเส้นตรงขนานกันระหว่างแถบมืดกับแถบสว่าง คล้ายกับรบกวนการแทรกสอดที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสง He-Ne Laser แต่มีความคมชัดน้อยกว่าและเกิดรบกวนการแทรกสอดยากกว่า เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสง Blue LED มีความยาวโคฮีเรนซ์สั้นกว่าแหล่งกำเนิดแสง He-Ne Laser จึงใช้เพียงไซอิเล็กทริกในการควบคุมการปรับระยะของกระจกตัวอย่าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 4.2 ภาพรบกวนการแทรกสอดเมื่อแหล่งกำเนิดแสงคือ Blue LED ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การใช้โปรแกรม Matlab วิเคราะห์ความเรียบพื้นผิวของตัวอย่าง (VSI Analyze Simulation)

จากการทดลองเพียโซคอนโทรลสามารถยับยั้งระยะได้ตามที่ผู้ทำการทดลองต้องการ ในโครงการพิเศษ นี้จึงได้ทำการบันทึกภาพที่เพียโซยับไปเป็นระยะ 50 nm, 100 nm และ 150 nm ทำให้ได้จำนวนภาพของ รั้วการแทรกสอดที่ได้ในแต่ละระยะของการยับเพียโซไม่เท่ากันซึ่งมีผลต่อการวิเคราะห์ภาพ นอกจากนี้ขนาด ภาพที่บันทึกได้มีขนาดใหญ่จึงใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ภาพนานเกินไป จึงได้ทำการลดขนาดของภาพจาก 100 % ให้เหลือ 5%, 10% และ 15% เมื่อวิเคราะห์ภาพที่บันทึกได้ในแต่ละระยะของการยับเพียโซและ ขนาดของภาพที่ลดลง ส่งผลให้ความละเอียดที่ได้จากการวิเคราะห์ต่างกัน ในโครงการพิเศษนี้จึงได้ทำการ ทดลองวิเคราะห์ภาพรั้วการแทรกสอดที่ระยะและขนาดภาพที่ต่างกัน



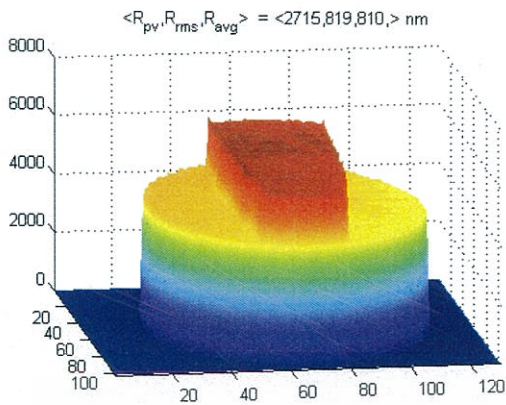
รูปที่ 4.3 โปรแกรมวิเคราะห์ความเรียบพื้นผิว

4.3.1 ผลการวิเคราะห์ภาพเมื่อเพียโซยับไปเป็นระยะ 50 nm

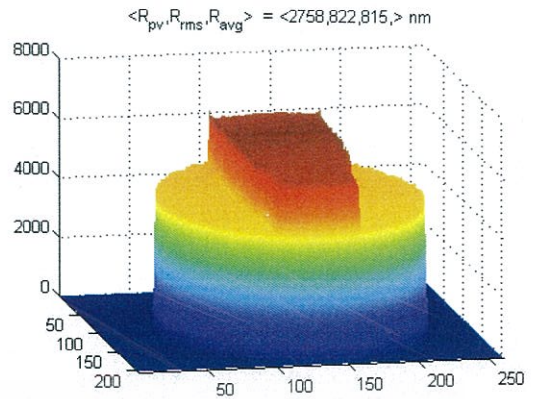
เมื่อเก็บภาพรั้วการแทรกสอดที่เพียโซยับไปเป็นระยะ 50 nm โดยทุกครั้งที่เพียโซยับ จะทำการบันทึกภาพรั้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้น ทำให้ได้ภาพรั้วการแทรกสอดทั้งหมด 140 ภาพ และ นำภาพที่บันทึกได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Matlab ซึ่งขนาดภาพที่ได้มีขนาดใหญ่เกินไปทำให้ใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ภาพนาน จึงลดขนาดภาพให้เล็กลงเพื่อให้ใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ให้เร็วขึ้น ซึ่งในโครงการพิเศษนี้ ได้ทดลองลดขนาดของภาพจาก 100 % เหลือ 5%, 10% และ 15%

เมื่อนำภาพที่บันทึกได้มาลดขนาดภาพให้เหลือ 5%, 10% และ 15% จะเห็นได้ว่า ความละเอียดของภาพ 3D Surface ที่ได้จากการวิเคราะห์มีลักษณะที่แตกต่างกัน

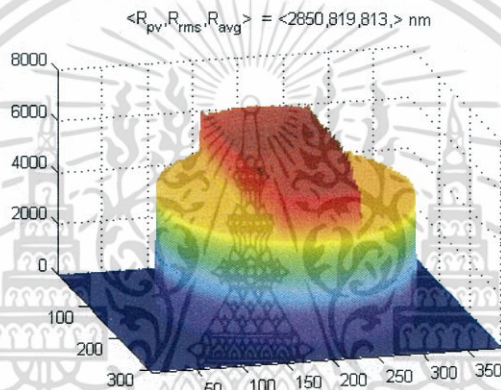
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.4 ภาพ 3D Surface ที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Matlab

(ก) เมื่อเพียโซขยับไปเป็นระยะ 50 nm ลดขนาดภาพเหลือ 5%

(ข) เมื่อเพียโซขยับไปเป็นระยะ 50 nm ลดขนาดภาพเหลือ 10%

(ค) เมื่อเพียโซขยับไปเป็นระยะ 50 nm ลดขนาดภาพเหลือ 15%

ตารางที่ 4.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ภาพวีการแทรกสอดเมื่อเพียโซขยับไปเป็นระยะ 50 nm

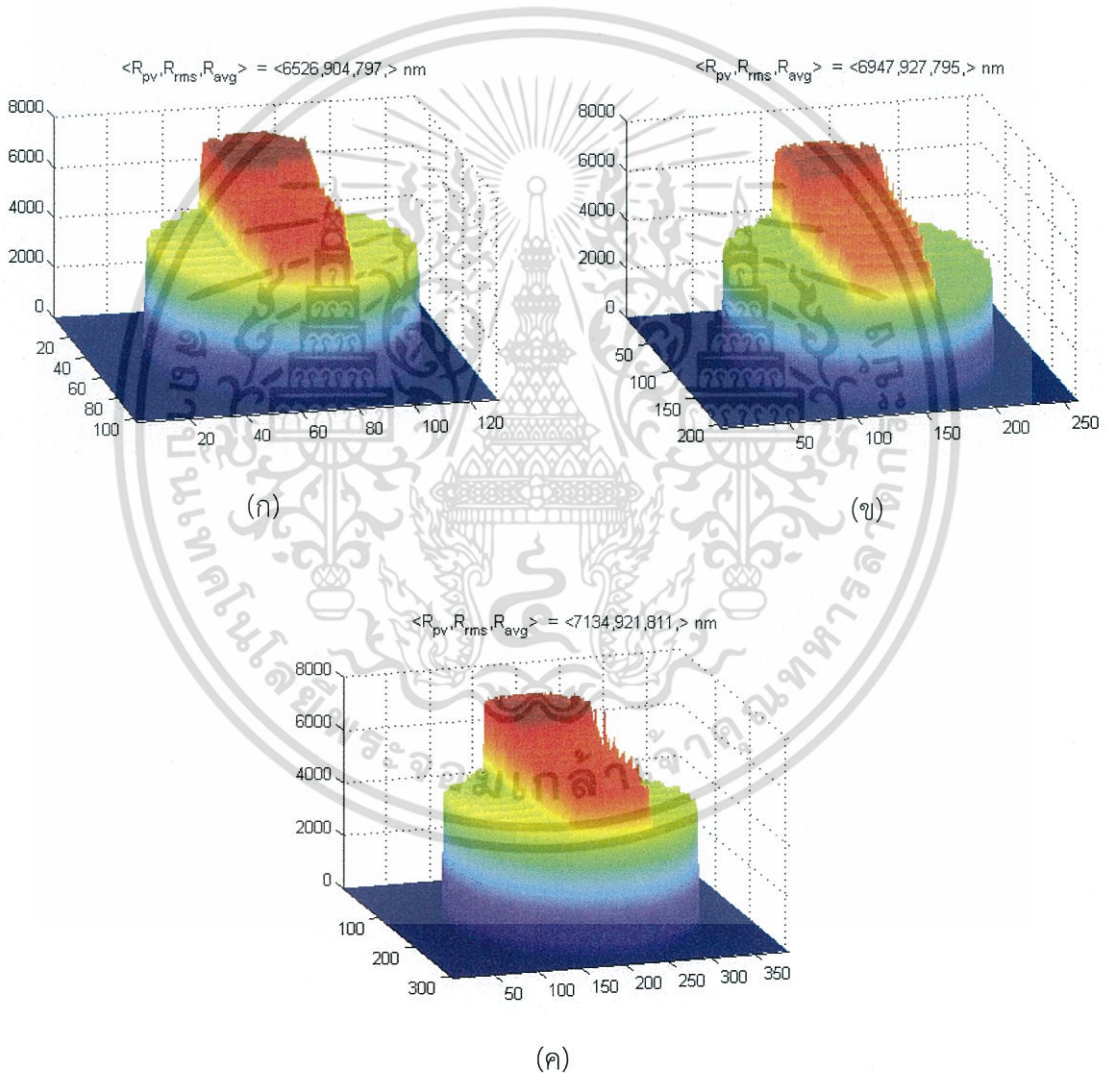
Scale	5%	10%	15%	
	Scan thickness	50	45 นาที	210 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการวิเคราะห์ภาพเมื่อเพียโซขยับไปเป็นระยะ 100 nm

เมื่อเก็บภาพรีจิสตราร์แทรกสอดที่เพียโซขยับไปเป็นระยะ 100 nm โดยทุกครั้งที่เพียโซขยับ จะทำการบันทึกภาพรีจิสตราร์แทรกสอดที่เกิดขึ้น ทำให้ได้ภาพรีจิสตราร์แทรกสอดทั้งหมด 75 ภาพ และ นำภาพที่บันทึกได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Matlab ซึ่งขนาดภาพที่ได้มีขนาดใหญ่เกินไปทำให้ใช้ ระยะเวลาในการวิเคราะห์ภาพนาน จึงลดขนาดภาพให้เล็กลงเพื่อให้ใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ให้ เร็วขึ้น ซึ่งในโครงการพิเศษนี้ ได้ทดลองลดขนาดของภาพจาก 100 % เหลือ 5%, 10% และ 15%

เมื่อนำภาพที่บันทึกได้มาลดขนาดภาพเหลือ 5%, 10% และ 15% จะเห็นได้ว่า ความ ละเอียดของภาพ 3D Surface ที่ได้จากการวิเคราะห์มีลักษณะที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.5 ภาพ 3D Surface ที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Matlab

(ก) เมื่อเพียโซขยับไปเป็นระยะ 100 nm ลดขนาดภาพเหลือ 5%

(ข) เมื่อเพียโซขยับไปเป็นระยะ 100 nm ลดขนาดภาพเหลือ 10%

(ค) เมื่อเพียโซขยับไปเป็นระยะ 100 nm ลดขนาดภาพเหลือ 15%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

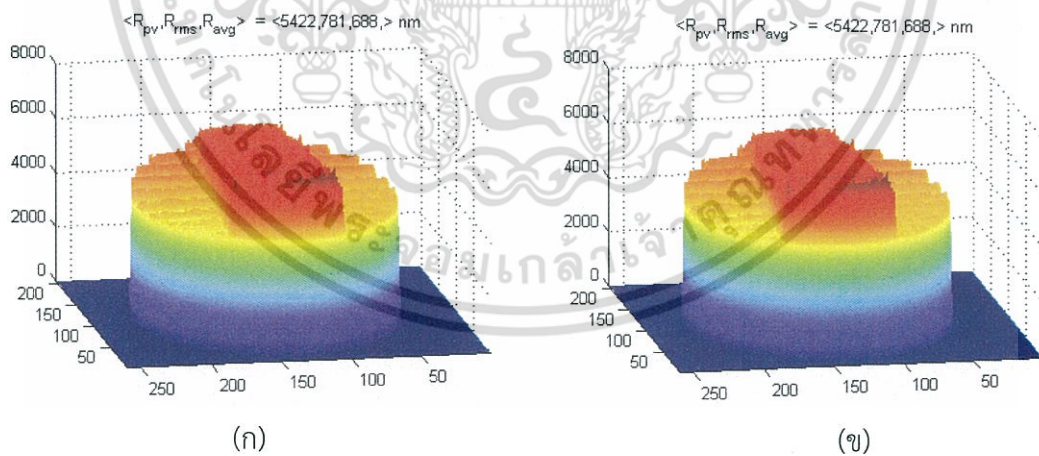
ตารางที่ 4.3 ระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ภาพรีวการแทรกสอดเมื่อเพียโซขับไปเป็นระยะ 100 nm

Scale	5%	10%	15%
Scan thickness			
100	30 นาที	120 นาที	360 นาที

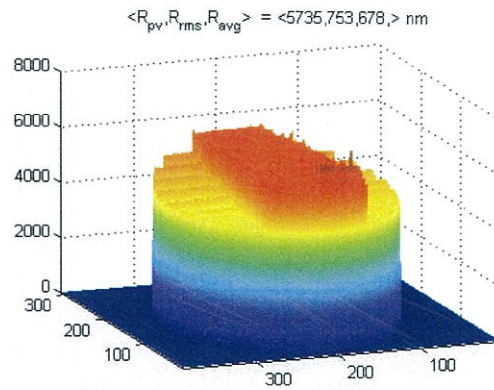
4.3.3 ผลการวิเคราะห์ภาพเมื่อเพียโซขับไปเป็นระยะ 150 nm

เมื่อเก็บภาพรีวการแทรกสอดที่เพียโซขับไปเป็นระยะ 150 nm โดยทุกครั้งที่เพียโซขับ จะทำการบันทึกภาพรีวการแทรกสอดที่เกิดขึ้น ทำให้ได้ภาพรีวการแทรกสอดทั้งหมด 49 ภาพ และ นำ ภาพที่บันทึกได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Matlab ซึ่งขนาดภาพที่ได้มีขนาดใหญ่เกินไปทำให้ใช้ ระยะเวลาในการวิเคราะห์ภาพนาน จึงลดขนาดภาพให้เล็กลงเพื่อให้ใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ให้ เร็วขึ้น ซึ่งในโครงการพิเศษนี้ ได้ทดลองลดขนาดของภาพจาก 100 % เหลือ 5%, 10% และ 15%

เมื่อนำภาพที่บันทึกได้มาลดขนาดภาพให้เหลือ 5%, 10% และ 15% จะเห็นได้ว่า ความ สะเอียดของภาพ 3D Surface ที่ได้จากการวิเคราะห์มีลักษณะที่แตกต่างกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 4.6 ภาพ 3D Surface ที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Matlab

- (ก) วิเคราะห์ภาพเมื่อเพียโซขยับไปเป็นระยะ 150 nm ลดขนาดภาพเหลือ 5%
- (ข) วิเคราะห์ภาพเมื่อเพียโซขยับไปเป็นระยะ 150 nm ลดขนาดภาพเหลือ 10%
- (ค) วิเคราะห์ภาพเมื่อเพียโซขยับไปเป็นระยะ 150 nm ลดขนาดภาพเหลือ 15%

ตารางที่ 4.4 ระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ภาพรีวิการแทรกสอดเมื่อเพียโซขยับไปเป็นระยะ 150 nm

Scale	5%	10%	15%
Scan thickness			
100	30 นาที	120 นาที	360 นาที

สามารถสรุปได้ว่าผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดคือระยะที่เพียโซขยับไปเป็นระยะ 50 nm และลดขนาดภาพให้เหลือ 15% แต่จากการทดลองพบว่าการลดขนาดภาพเหลือ 15% ใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์นานเกินไป ในโครงการพิเศษนี้จึงเลือกวิเคราะห์ภาพที่ระยะเพียโซขยับไปเป็นระยะ 50 nm และลดขนาดภาพเหลือ 5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

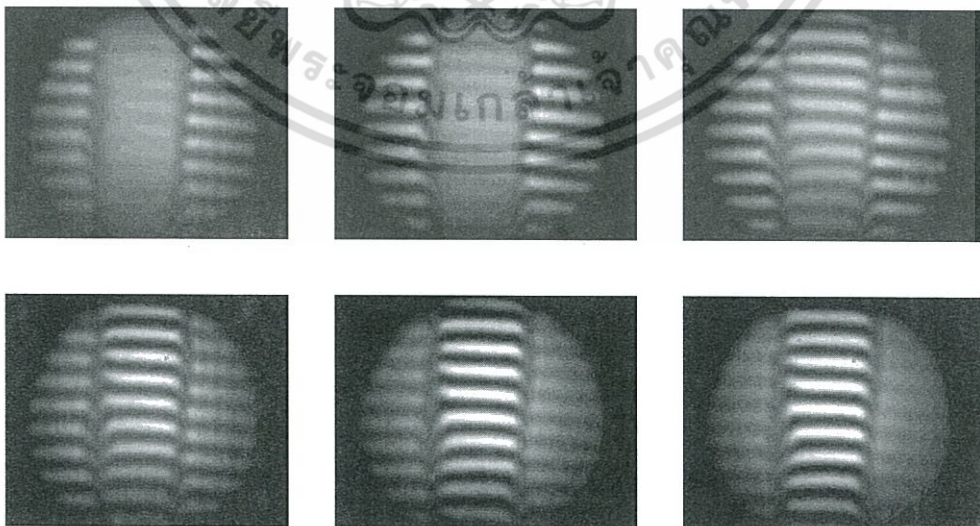
4.4 ผลการทดลองจากการจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED (Light emitting diode) กับกระจกที่มีระดับพื้นผิวตรงกลางสูงกว่าระดับพื้นผิวด้านข้าง

ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขสำหรับการปลูกฟิล์มบางอะลูมิเนียม

เงื่อนไขของแก๊ส	Power RF (W)	อัตราการไหลของแก๊ส (sccm)	เวลา (นาที)	
			Pre -sputter	Deposition
Ar	250	17.8	20	60
Ar	250	17.8	20	90

เมื่อจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วย LED สีฟ้ากับกระจกตัวอย่างที่มีลักษณะพื้นผิวตรงกลางสูงกว่าบริเวณด้านข้าง จะเกิดภาพริ้วการแทรกสอดบริเวณพื้นที่ด้านข้าง เนื่องจากมีระยะห่างระหว่างกระจกตัวอย่างกับกระจกแยกแสงเท่ากับระยะห่างระหว่างกระจกอ้างอิงกับกระจกแยกแสง เมื่อขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกจะทำระยะห่างเปลี่ยนไป จึงทำให้เกิดภาพริ้วการแทรกสอดที่เปลี่ยนไปดังรูปที่ 4.3

ในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างได้ให้ความสำคัญกับความเข้มของแสง จึงไม่จำเป็นต้องบันทึกภาพริ้วการแทรกสอดเป็นภาพสี เพราะเมื่อบันทึกภาพริ้วการแทรกสอดเป็นภาพสี จะทำให้เกิดการฉีกตัวของแสง RGB อาจทำให้ค่าความเข้มแสงที่ได้มีความคลาดเคลื่อน ในโครงการพิเศษนี้จึงบันทึกภาพริ้วการแทรกสอดที่ได้เป็น Gray Scale

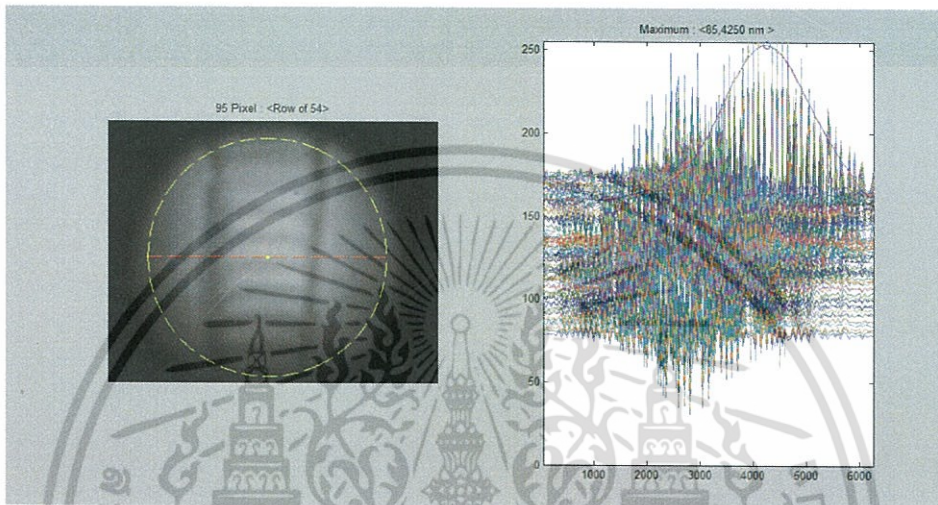


รูปที่ 4.7 ภาพริ้วการแทรกสอดของผิวตัวอย่างทดสอบเป็นกระจกความเรียบสูงที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์ม

โดยลักษณะพื้นผิวตรงกลางสูงกว่าพื้นผิวด้านข้าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

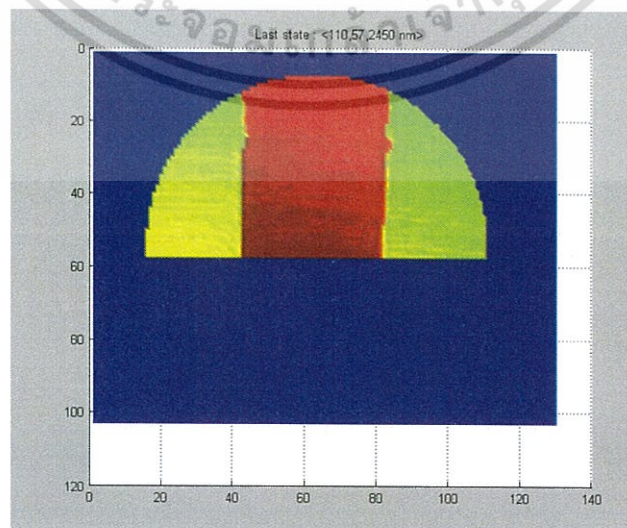
4.4.1 การใช้โปรแกรม Matlab วิเคราะห์ความเรียบพื้นผิวของตัวอย่าง (VSI Analyze Simulation)

จากการทดลองได้ทำการเก็บรูปวีการแทรกสอดของพื้นผิวตัวอย่างของ sample แบบที่ 1 ด้วยโปรแกรม LabVIEW เมื่อได้ภาพวีการแทรกสอดตามที่เรากำลังต้องการ จึงนำภาพที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Matlab



รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรม Matlab แต่ละพิกเซลของภาพที่บันทึกได้ทั้งหมด

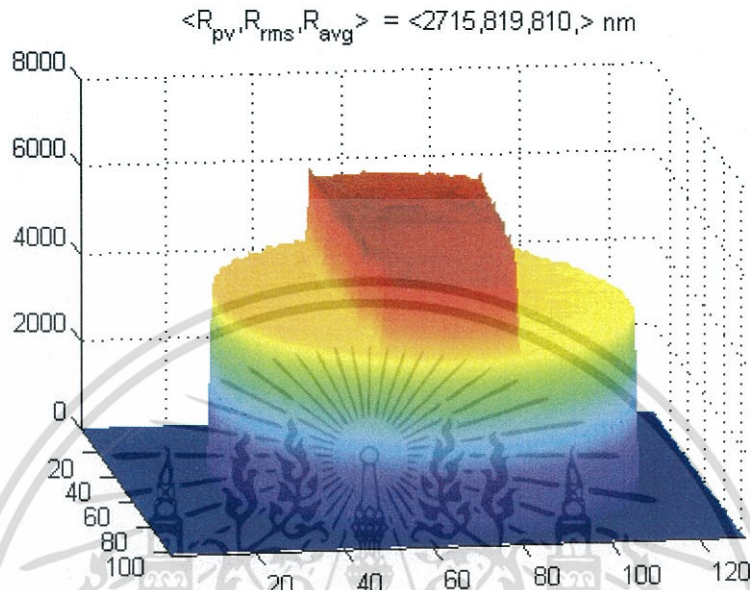
จากรูปที่ 4.8 เป็นการวิเคราะห์ภาพทั้งหมดที่บันทึกได้ โดยวิเคราะห์ทีละพิกเซลในแต่ละแถวตามแนวเส้นประสีแดง กราฟที่ได้จะแสดงความเข้มแสงของแต่ละพิกเซลใน 1 รูป โดยจุดสูงสุดของกราฟคือจุดที่มีความเข้มแสงมากที่สุด



รูปที่ 4.9 แสดงภาพ 2D ของภาพที่วิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อวิเคราะห์รูปทั้งหมดจะได้ภาพ 2D ของลักษณะพื้นผิวตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.9 จากนั้นจึงนำภาพ 2D ที่ได้มาวิเคราะห์เป็น Roughness Surface 3D



รูปที่ 4.10 แสดงภาพ 3D ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่มีตรงกลางสูงกว่าบริเวณด้านข้าง

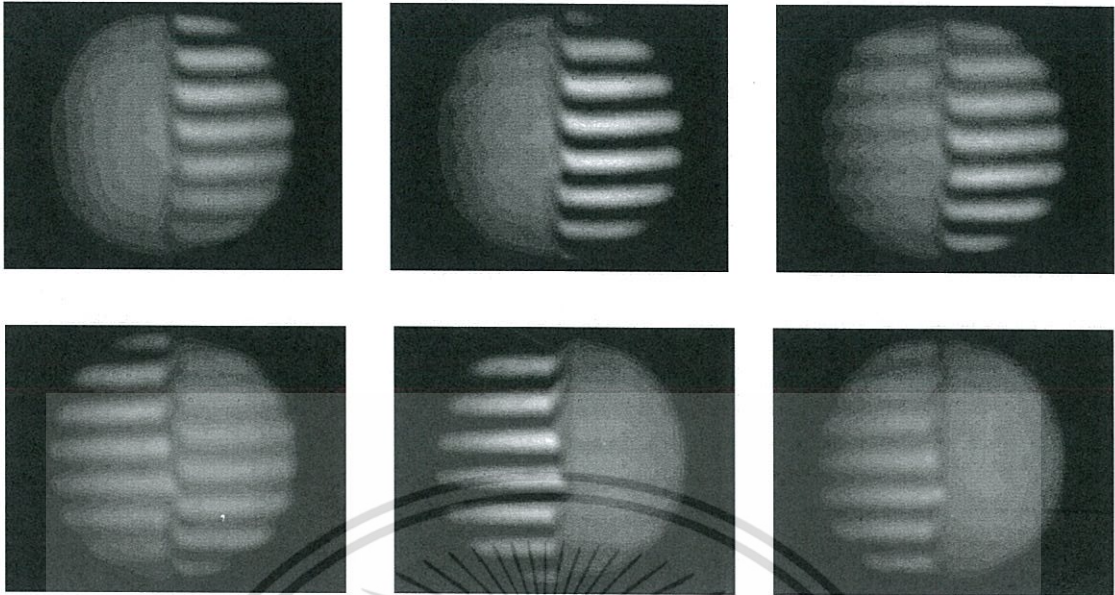
จากรูปที่ 4.10 จะแสดงลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ โดยในแนวแกน z จะแสดงความสูงของพื้นผิวที่วิเคราะห์ แกน x และ แกน y จะแสดงพิทเชลทั้งหมดของรูปภาพ

4.5 ผลการทดลองจากการจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED (Light emitting diode) กับกระจกที่มีระดับพื้นผิวด้านขวาสูงกว่าด้านซ้าย

ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขสำหรับการปลูกฟิล์มบางอะลูมิเนียม

เงื่อนไขของแก๊ส	Power RF (W)	อัตราการไหลของแก๊ส (sccm)	เวลา (นาที)	
			Pre -sputter	Deposition
Ar	250	25	20	60
Ar	250	25	20	120

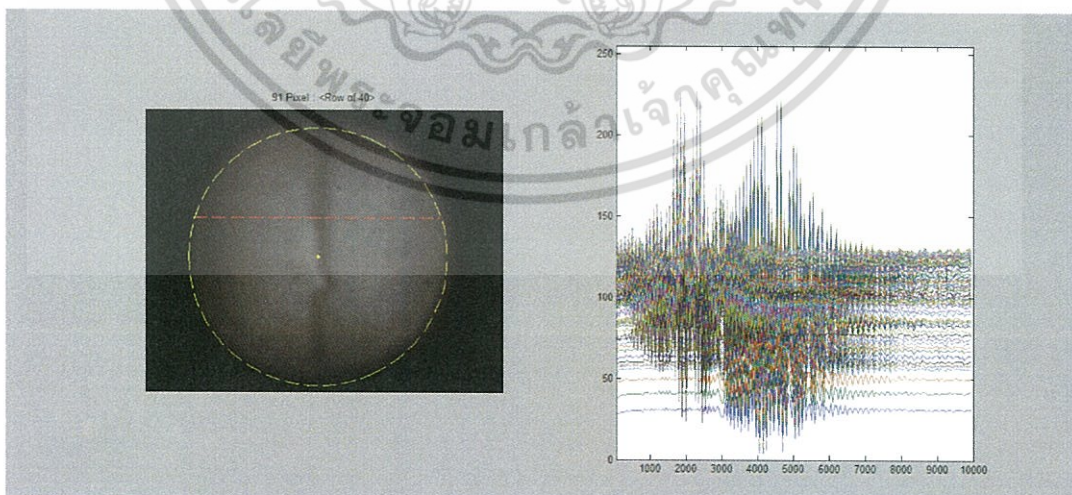
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ภาพรีการแทรกสอดของผิวตัวอย่างทดสอบเป็นกระจกความเรียบสูงที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์ม โดยลักษณะพื้นผิวด้านขวาสูงกว่าพื้นผิวด้านซ้าย

4.5.1 การใช้โปรแกรม Matlab วิเคราะห์ความเรียบพื้นผิวของตัวอย่าง (VSI Analyze Simulation)

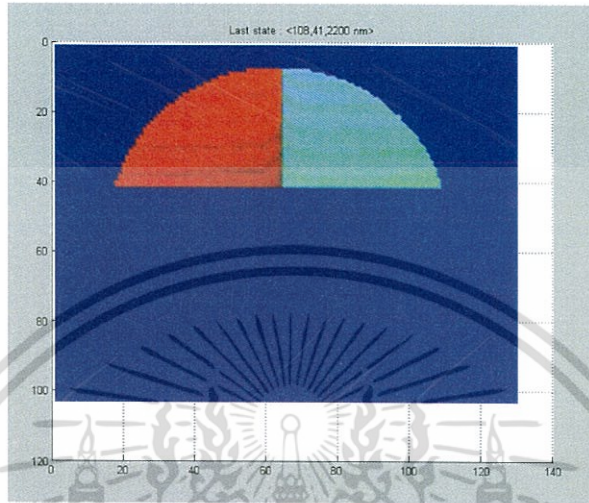
จากการทดลองได้ทำการเก็บรูปรีการแทรกสอดของพื้นผิวตัวอย่างของ sample แบบที่ 1 ด้วยโปรแกรม LabVIEW เมื่อได้ภาพรีการแทรกสอดตามที่เรากำลังต้องการ จึงนำภาพที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Matlab



รูปที่ 4.12 การวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรม Matlab แต่ละพิกเซลของภาพที่บันทึกได้ทั้งหมด

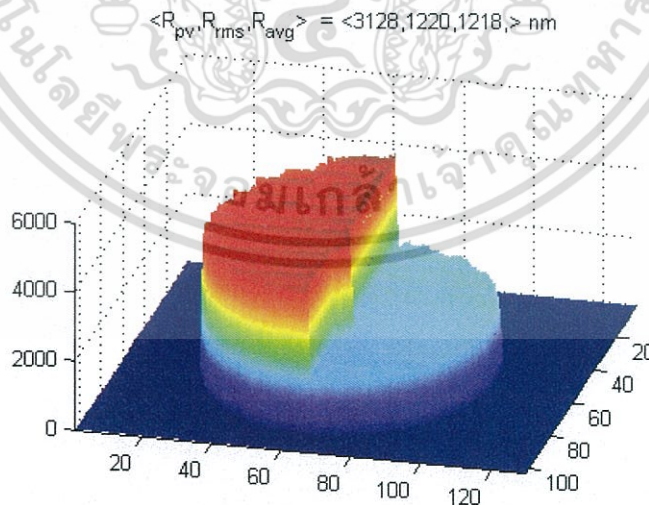
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.12 เป็นการวิเคราะห์ภาพทั้งหมดที่บันทึกได้ โดยวิเคราะห์ทีละพิกเซลในแต่ละแถวตามแนวเส้นประสีแดง กราฟที่ได้จะแสดงความเข้มแสงของแต่ละพิกเซลใน 1 รูป โดยจุดสูงสุดของกราฟคือจุดที่มีความเข้มแสงมากที่สุด



รูปที่ 4.13 แสดงภาพ 2D ของภาพที่วิเคราะห์

เมื่อวิเคราะห์รูปทั้งหมดจะได้ภาพ 2D ของลักษณะพื้นผิวตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.13 จากนั้นจึงนำภาพ 2D ที่ได้มาวิเคราะห์เป็น Roughness Surface 3D



รูปที่ 4.14 แสดงภาพ 3D ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่มีตรงกลางสูงกว่าบริเวณด้านข้าง

จากรูปที่ 4.14 จะแสดงลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ โดยในแนวแกน z

จะแสดงความสูงของพื้นผิวที่วิเคราะห์ แกน x และ แกน y จะแสดงพิกเซลทั้งหมดของรูปภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับลิขสิทธิ์ที่ออกให้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นชอบที่จะเผยแพร่หรือใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

ในโครงการพิเศษนี้ทำขึ้นเพื่อศึกษาและพัฒนาการวัดความเรียบของพื้นผิวโดยอาศัยหลักการแทรกสอดของแสงแบบการกวาดในแนวตั้งให้สามารถใช้งานได้จริง และมีการดำเนินของระบบให้ใช้งานได้ง่ายขึ้น

จากการทดลองนี้ได้เลือกใช้แหล่งกำเนิดแสง Blue LED มาใช้ในการทดลองเพราะมีความยาวโคฮีเรนซ์ที่สั้นมาก ซึ่งทำให้มีค่าความยาวโคฮีเรนซ์เพียงค่าเดียวที่เกิดริ้วการแทรกสอดที่ชัดที่สุดได้ ทำให้สามารถวัดความเรียบของพื้นผิววัตถุได้ง่ายและแม่นยำกว่าการใช้แหล่งกำเนิดแสงจาก He-Ne Laser

5.1.1 การจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วย He -Ne Laser

การจัดระบบแสงด้วย He-Ne Laser นั้น จำเป็นต้องจัดให้ลำแสงมีความขนานมากที่สุด เพื่อให้ง่ายต่อการเปลี่ยนไปใช้แหล่งกำเนิดแสงแบบ Blue LED

5.1.2 การจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วย Blue LED

การจัดระบบแสงด้วย Blue LED ค่อนข้างมีข้อจำกัดในเรื่องของแสงสว่างที่เกิดขึ้นจากสภาพแวดล้อม เพื่อให้การจัดแสงมีประสิทธิภาพสูงสุดควรทำในห้องที่มืดและไม่มีแสงสว่างจากภายนอกมารบกวน และในการจัดระบบแสงหากปรับระนาบของกระจก 45 องศาให้เอียงมากเกิดไปอาจทำให้เรามองไม่เห็นการแทรกสอดของแสงได้

5.1.3 การใช้ซอฟต์แวร์ ATP เพื่อควบคุม Piezo Control

ในโครงการพิเศษนี้เราเลือกใช้ซอฟต์แวร์ ATP ควบคุม Piezo Driver โดยผ่าน LabVIEW จากการทดลองเมื่อเราสามารถจัดลำแสงได้ตามที่ต้องการแล้ว ภาพริ้วการแทรกสอดจะถูกเก็บบันทึกด้วย CCD Camera เพื่อให้ได้ภาพที่มีประสิทธิภาพและความละเอียดสูง โดยที่เราสามารถควบคุมระยะที่ Piezo จะเคลื่อนที่ได้โดยผ่าน LabVIEW

การทดสอบโดยใช้ตัวอย่างพื้นผิวที่มีความเรียบแตกต่างกันในชิ้นงานเดียวกัน จะทำการวัดโดยปรับระยะจากการควบคุม Piezo Driver และเทียบกับ Strain Gauge Reader ว่าระยะที่ขยับไปมีความแม่นยำมากแค่ไหน เมื่อเราขยับ Piezo Driver ไปเรื่อยๆ จะพบว่าริ้วแทรกสอดมีการเปลี่ยนแปลงไปตามระยะที่ขยับ ถ้าความแตกต่างของระยะที่ขยับไปทั้งสองข้างนั้น อยู่ในช่วงเดียวกันกับระยะของความยาวโคฮีเรนซ์ของ Blue LED จะเกิดริ้วการแทรกสอดที่ชัดเจนขึ้น และริ้วการแทรกสอดที่เห็นได้ชัดเจนที่สุดจะเกิดเฉพาะที่ตรงส่วนที่สูงที่สุดของบริเวณพื้นผิว ส่วนบริเวณที่ต่ำกว่าจะไม่เห็นริ้วการแทรกสอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ Piezo Control สามารถเลือกใช้ได้ทั้ง Open loop และ Close loop แต่ในโครงการนี้เลือกใช้แบบ Close loop เพราะได้ทำการเชื่อมต่อกับ Strain gauge reader ซึ่งถ้าใช้แบบ Close loop จะทำให้สามารถอ่านค่าที่เพียโซอิเล็กทริกยึดและหดได้แม่นยำกว่า

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. ในการจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วย Blue LED ควรทำในห้องมืดและไม่มีแสงภายนอกรบกวน
2. ควรจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วย Blue LED ในพื้นที่ที่มีการสั่นสะเทือนน้อย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมาร์ทหฺร.2554.ความหยาบผิวของสเดนเลสแผ่น. [Online]. Available :
<http://www.siamstainless.com/?p=1110>
- [2] Wiroj Sudatham.2560.ไมเคิลสันอินเตอร์เพียร์โรมิเตอร์. [Online]. Available :
<http://pirun.ku.ac.th/~fsciwr/>
- [3] นายพงศธร ตันติธรรมฐิติ และ นางสาวพิมสิริ ทัตมาลี.2557. “การพัฒนาาระบบวัดโครงสร้างพื้นผิวด้วยอินเตอร์เฟอเมตรีแบบกวาดแนวตั้ง.” ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [4] Creative Thailand.2558.Converse Energy for Future. [Online]. Available :
<http://www.tcdc.or.th/creativethailand/article/Matter/22396>
- [5] Pompana Suklaead.2560.สเตรนเกจ. [Online]. Available :
<https://www.scribd.com/doc/23424357/สเตรนเกจ>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Investigation of a dual-layer structure using vertical scanning interferometry

C.J. Tay, C. Quan*, M. Li

Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, 10 Kent Ridge Crescent, Singapore 119260, Singapore

Received 1 April 2006; received in revised form 1 December 2006; accepted 1 January 2007

Available online 27 March 2007

Abstract

This paper proposes a method based on white light vertical scanning interferometry (VSI) to investigate a dual-layer structure. The optical arrangement is based on a modified Michelson interferometer that utilizes a reference beam and two object beams. Each object beam interferes with the reference beam and produces an interferogram. A series of interferograms are obtained on a dual-layer structure and the thickness of each layer is obtained. A continuous wavelet transform (CWT) is used to extract the envelope of each interferogram in order to determine the peak intensity that provides an indication of each layer's boundary. Tests are conducted on a semiconductor wafer and a micro-gear made of polymeric material deposited on a metal substrate. Results show that the proposed method has a good potential for investigating a dual-layer micro-structure.

© 2007 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Dual-layer structure; Vertical scanning interferometry (VSI); Continuous wavelet transform (CWT)

1. Introduction

With the development of micro-electro-mechanical systems (MEMS), accurate measurement techniques are required for the inspection of micro-structures. Optical technique is a popular tool for such an inspection due to their high accuracy, high-resolution and non-contact characteristics. Dual/multi-layer structures are a common MEMS component used widely in the semiconductor industry and other fields [1–3]. In a dual/multi-layer structure, the thickness of each layer and the properties of the interface between two layers are important parameters that should be inspected. Such an inspection is normally carried out by a spectroscopic ellipsometer [4–6]. However, using such an instrument only one point can be measured at a time and the method provides information only on a particular layer of interest.

White light has the characteristic of a very short coherence length, normally less than several microns. As

a white light interferometric profiler scans an object, interference occurs only when the optical path difference (OPD) between the object and reference beams is within a very short coherence length. Hence, the position of the object can be determined with high accuracy. Numerous works have been done on white light vertical scanning interferometry (VSI). These include methods based on Michelson, Linnik, and Mirau interferometers [7,8]. These methods have been applied on the measurement of a moth's eye [9] and roughness measurement [10]. The white light VSI has also been modified to obtain large field of view [11]. However, all the above work focused only on the top surface of an object. In this paper, we propose a whole-field method based on white light VSI to simultaneously obtain the thickness of each layer and the three-dimensional (3D) profile of the interfaces in a dual-layer structure. Wavelet transform has been used in white light interferogram analysis using cross-sectional distribution of the transformed spectrum [12]. However, in this paper, continuous wavelet transform (CWT) is used to obtain sub-scanning-increment resolution and improve its accuracy using the phases of a transformed interferogram.

*Corresponding author. Tel.: +65 6516 8089; fax: +65 6779 1459.

E-mail address: mpeqcg@nus.edu.sg (C. Quan).

2. Principle of the method

In white light VSI, a typical intensity field of an arbitrary point on a test surface, along z -axis (vertical scanning direction), is given by [13]

$$I(z) = I_0 + \gamma I_0 g(z - z_0) \cos[2k_0(z - z_0) + \varphi_0], \quad (1)$$

where I_0 is the background intensity, γ is the fringe contrast, k_0 is the mean wave number of a light source, z is the vertical scanning position along the optical axis, z_0 is the peak position of the intensity field, and φ_0 is a phase offset. $g(z - z_0)$ is the coherence envelope that depends on the spectrum of the light source [14,15]. In this study, a halogen light source with a Gaussian spectrum is used, and hence the intensity field can be expressed as

$$I(z) = I_0 + \gamma I_0 \exp\left[-\left(\frac{z - z_0}{l_c}\right)^2\right] \cos[2k_0(z - z_0) + \varphi_0], \quad (2)$$

where l_c is the coherence length of the light source. Fig. 1 shows the intensity field of an intensity response of a point on a test surface (solid line) and its coherence envelope function (dashed line). The peak position of the envelope indicates the height of the corresponding point on the surface.

Fig. 2 shows a schematic diagram of a multi-layer structure with various refractive indexes n_1, n_2, \dots, n_m and the thicknesses of different layers t_1, t_2, \dots, t_m . The dashed lines indicate the OPD from the reference plane to different interfaces in the structure. When the structure is illuminated, the beam reflected from each interface will interfere with the reference beam and produce m number of envelopes as shown in Fig. 3. The intensity of a point on the structure is approximately given by

$$I(z) = I_0 + \gamma_0 I_0 g(z - z_0) \cos[2k_0(z - z_0) + \varphi_0] + \gamma_1 I_0 g(z - z_1) \cos[2k_0(z - z_1) + \varphi_1]$$

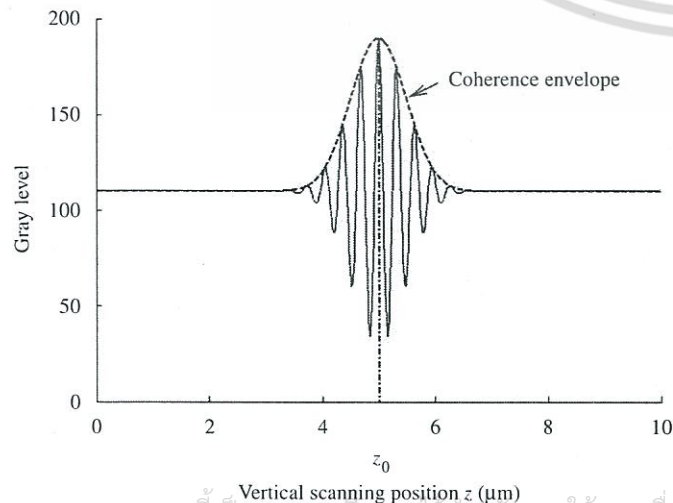
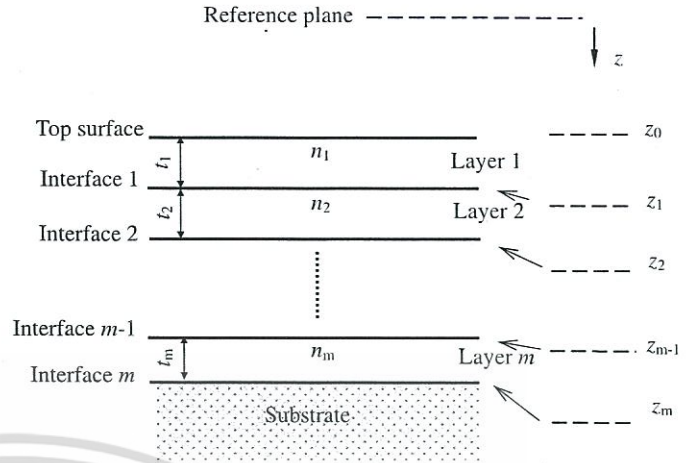


Fig. 1. A VSI intensity response and its coherence envelope.



z_m – Optical path from the reference plane to the m th interface
 n_m – Refractive index of the m th layer

Fig. 2. Schematic of a multi-layer structure.

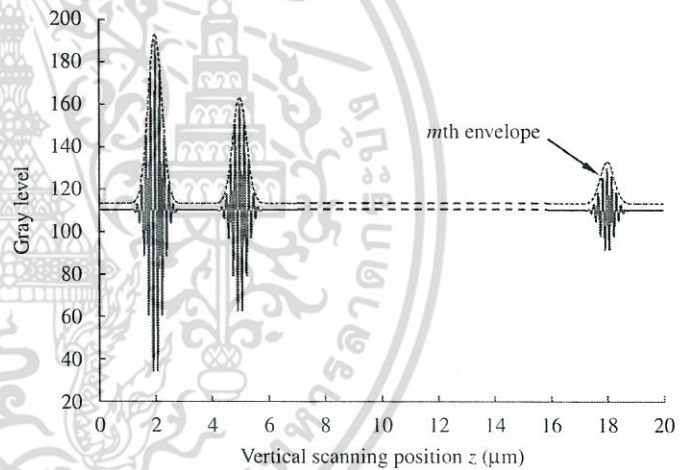


Fig. 3. A VSI intensity response of a multi-layer structure.

$$+ \gamma_2 I_0 g(z - z_2) \cos[2k_0(z - z_2) + \varphi_2] + \dots + \gamma_m I_0 g(z - z_m) \cos[2k_0(z - z_m) + \varphi_m], \quad (3)$$

where $g(z - z_m) = \exp\{-[(z - z_m)/l_c]^2\}$ and z_m indicates the OPD from the reference plane to the m th interface. Hence, the thickness of each layer is given by

$$t_m = \frac{z_m - z_{m-1}}{n_m} \quad m = 1, 2, 3, \dots, m, \quad (4)$$

where n_m is the refractive index of the m th layer.

To characterize the intensity envelopes accurately, a CWT is utilized. A CWT is generally defined by [16]

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} I(z) h^*\left(\frac{z - b}{a}\right) dz, \quad (5)$$

where $h(z)$ is the mother wavelet, a is the scaling parameter that controls the wavelet compression or dilation (frequency of daughter wavelets), and b is the shift

parameter that controls temporal (or spatial) translation, * denotes the complex conjugate. A CWT uses different daughter wavelets with different frequencies to scan a signal along a temporal (or spatial) direction and determines correlation between a signal and a wavelet. When a signal matches a wavelet in both frequency and temporal position, a maximum correlation coefficient is obtained. The ridge of the coefficient map gives the envelope of a signal $I(z)$. Hence, the peak position of local interference fringe could be obtained. The phases of transformed signal would provide a better interpolation for more accurate fringe peak. As shown in Fig. 4, a discrete intensity sampling would indicate position h' as a fringe peak; however, the actual peak position is located at position h . To locate the correct h position, two methods are normally used. One method is the use of curve fitting after an envelope is obtained; another is to calculate the phase angle φ as shown in Fig. 4. Since the illuminating source possesses a Gaussian spectrum and the intensity field is governed by Eqs. (2) or (3), a complex Morlet wavelet is chosen as the

mother wavelet

$$h(z) = \exp \left[-\left(\frac{z}{l_w} \right)^2 \right] \exp \left[j \left(\frac{4\pi z}{\lambda_0} \right) \right], \tag{6}$$

where l_w is the wavelet length and λ_0 is the mean wavelength of the light source. For a complex Morlet wavelet, the phase angle is given by

$$\varphi = \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}[W(a_0, b_0)]}{\text{Re}[W(a_0, b_0)]} \right\}, \tag{7}$$

where $W(a_0, b_0)$ corresponds to a maximum value of $|W(a, b)|$, Im and Re indicate the imaginary and real part of the complex number and the value of h is given by

$$h = h' - \frac{\lambda_0}{4\pi} \varphi. \tag{8}$$

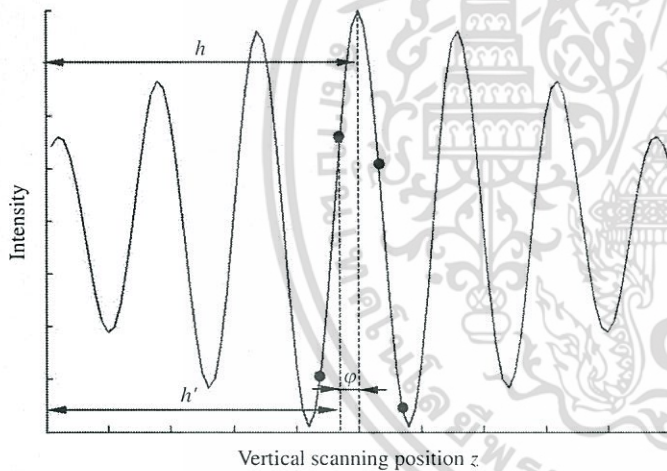


Fig. 4. Phase difference between sampling and actual peak.

3. Description of experiments

The experimental arrangement is shown in Fig. 5. A halogen light source is collimated by a lens A. The collimated light is directed at a reference mirror and an object through a beam splitter. The beams reflected from the reference mirror and the object interfere with each other and the resulting fringe pattern is recorded on a CCD camera. The object is mounted on a PZT stage controlled by a computer to move along the z -direction in increment. For each increment, the CCD camera records one fringe pattern and store in a computer. Two test objects namely a coated silicon wafer and a transparent micro-gear were investigated.

4. Results and discussion

A mirror with a surface roughness root-mean-square (RMS) value of less than 0.1 nm (specified by manufacturer) was first measured using the proposed system. The resulting fringe patterns were processed using both CWT and digital filtering DFT [17] method that a band-pass

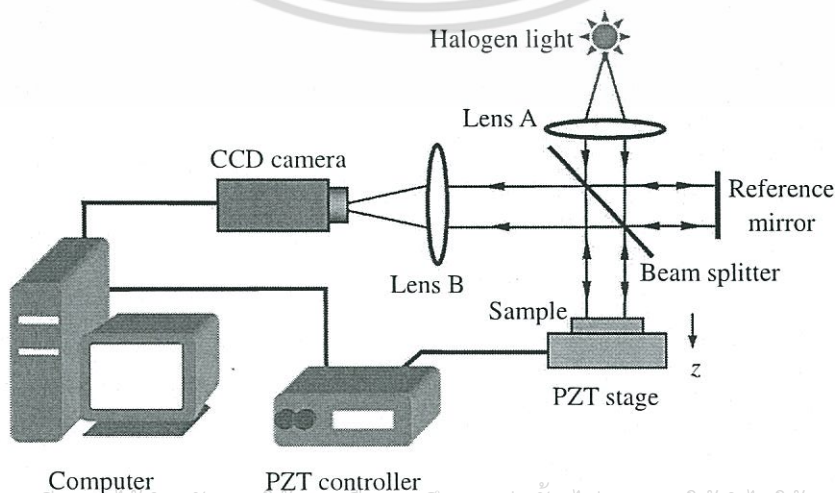


Fig. 5. Experimental arrangement.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

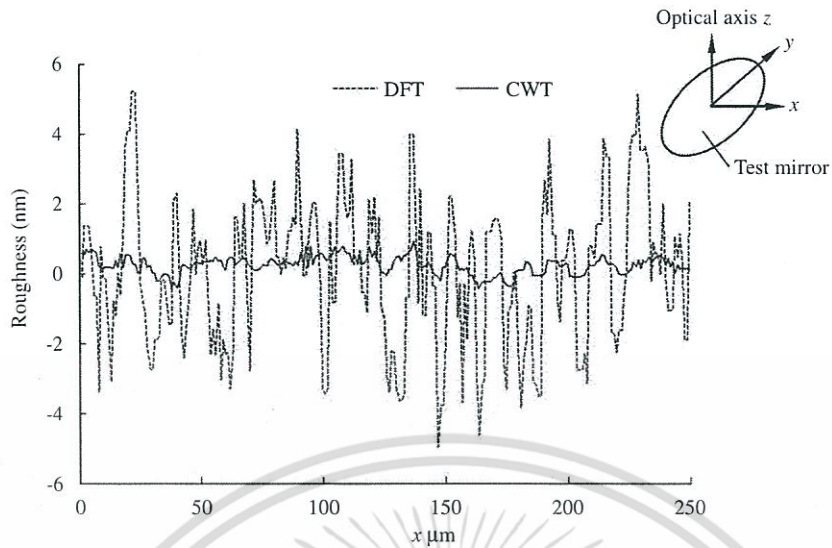


Fig. 6. A comparison of a cross section obtained by DFT and CWT.

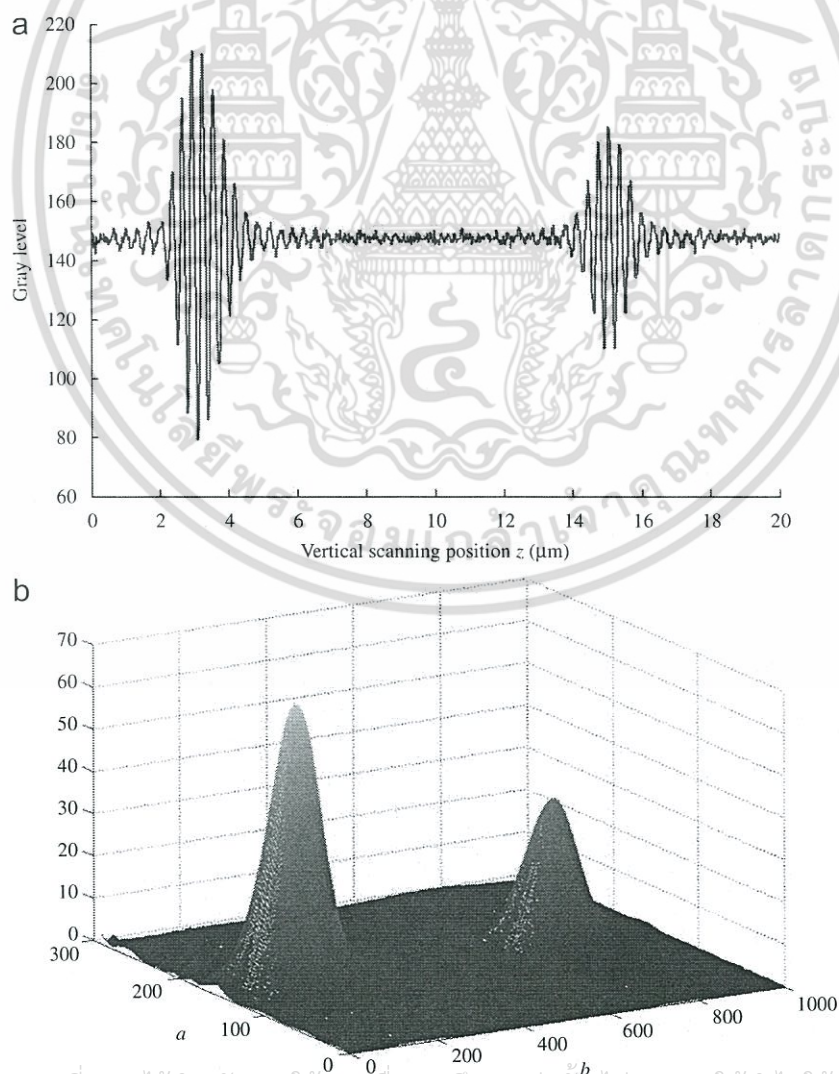


Fig. 7. (a) Intensity response of a point on a coated wafer; (b) Wavelet transform spectrum of the intensity response.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

filter based on Fourier transform is applied to the signal to obtain an envelope of the interferogram. In the DFT method, the vertical position of a fringe peak was determined by an interpolation process on the envelope, while in the CWT method the fringe peak was determined from the phase angles obtained using Eq. (7). Fig. 6 shows a cross section of the mirror obtained by the two methods. The RMS value of the mirror surface obtained by digital filtering is about 1.9 nm, while that obtained using CWT is around 0.3 nm. Compared to digital filtering, CWT gives more accurate results. From Fig. 6 and the calculated RMS, it can be shown that CWT has a better performance in the application of white light interferometry at nanometer level.

The intensity response of a point on a coated silicon wafer is shown in Fig. 7(a). Fig. 7(b) shows a wavelet transform spectrum of the intensity response. It is seen that the peaks of the signals can be identified easily. The phase of each peak was calculated using Eq. (7), while a more accurate peak value was identified with Eq. (8). The double envelopes indicate the position of the top and bottom surface of the coating. Hence, the thickness of the coating as shown in Fig. 8 can be determined from the distance between the peaks of the envelopes. The average distance between the peaks of the measured area is about 11.89 μm . Given the refractive index is 1.65, the average thickness of the coating was determined as 7.21 μm using Eq. (4). Based on the resulting fringe patterns, the surface feature of the two surfaces was also studied. Fig. 9(a) shows a 3D profile of the top surface of the coating and Fig. 9(b) shows that of the interface between the coating and the substrate. It is seen from Fig. 9 that the surface roughness can be readily determined. From the results, the RMS value of the coating surface is about 0.03 μm , and that of the interface is about 0.06 μm .

A transparent micro-gear of 500 μm diameter on a metal substrate (see Fig. 10) was also measured using the proposed method. Since the refractive index of the transparent layer is larger than that of air, the interface looks like a concave surface as the dashed line in Fig. 11. If depth of the concave t' is obtained, the thickness

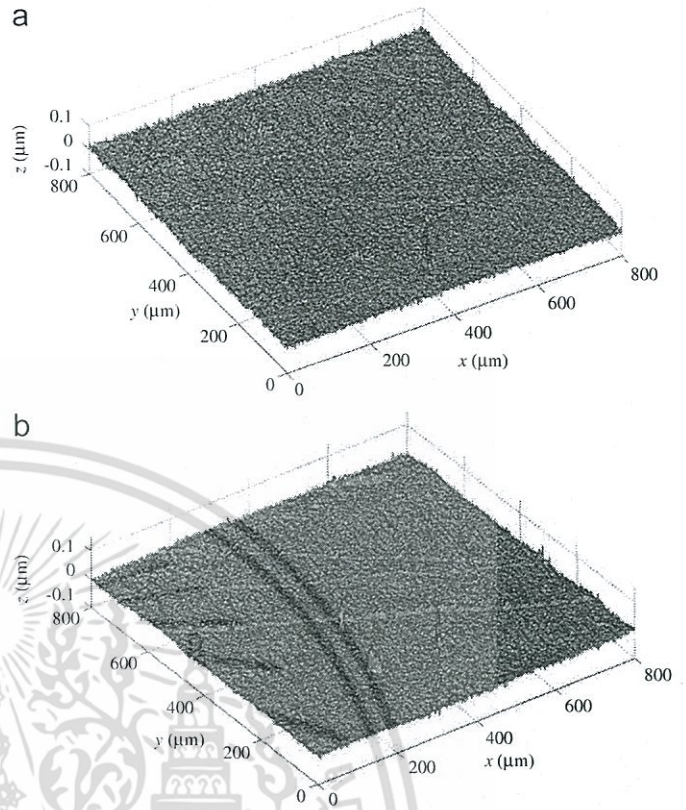


Fig. 9. 3D plots of (a) top surface and (b) interface of a coating on a wafer.

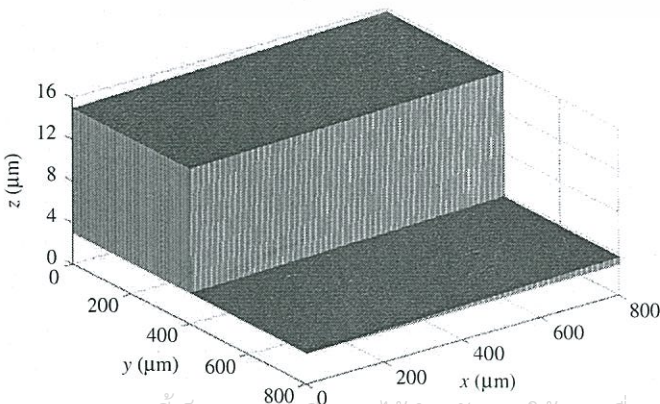


Fig. 8. Thickness of a coating layer on a wafer.

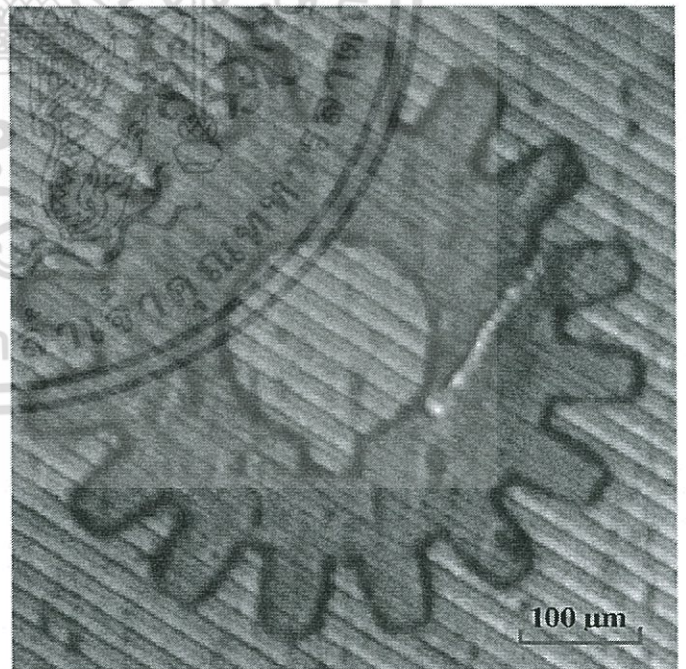


Fig. 10. A top view image of a micro-gear.

of the transparent layer t is determined by the following equation

$$t = \frac{t'}{n-1} \tag{9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

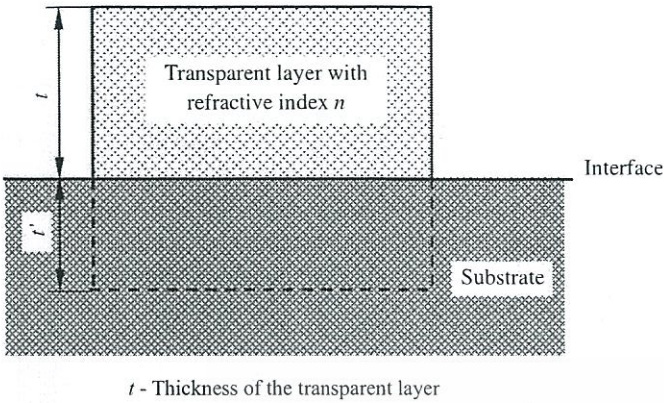


Fig. 11. A transparent layer on an opaque substrate.

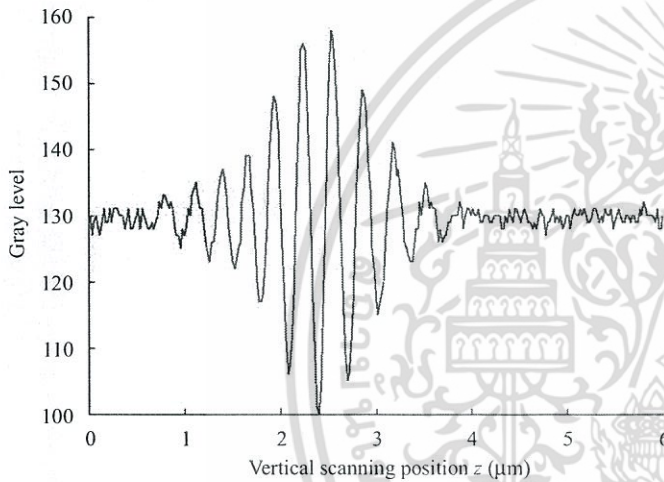


Fig. 12. Intensity response of a point on a transparent gear.

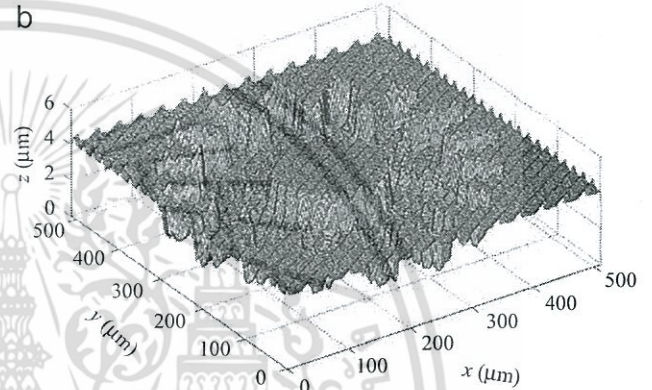
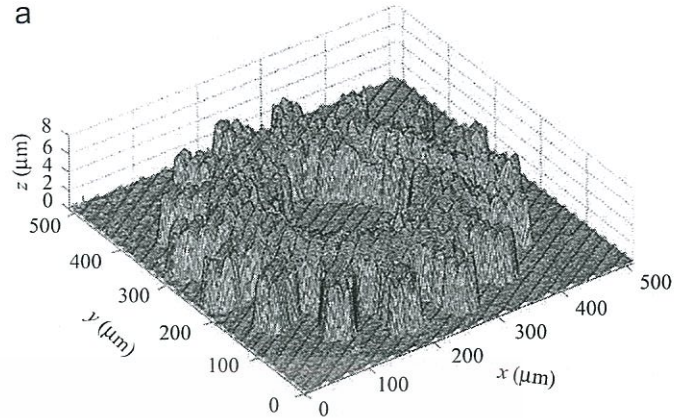


Fig. 13. (a) 3D profile of a transparent micro-gear, (b) 3D profile of a micro-gear interface.

5. Concluding remarks

In this paper, a method for the measurement of a dual-layer structure using white light VSI has been presented. The technique is able to provide whole-field information including 3D surface profiles and layer thickness, and is non-contact, non-destructive, which is an important and necessary requirement for internal measurement of dual/multi-layer structures. The proposed method is also able to simultaneously determine the thickness and the interface roughness of each layer in one scanning procedure. The proposed experimental arrangement is relatively simple and easy to use, and provides a high vertical resolution. Results show that CWT has a good performance in the application of white light interferometry to investigate surface profiles and layer structures. Using the proposed method, layer thickness can also be determined by subtraction of two adjacent interfaces. But the accuracy of such a thickness highly depends on the accuracy of the refractive index, besides the accuracy of the measurement. The method is able to measure the interface roughness at the level of nanometer and the thickness of each layer at the level of micron. The experimental results indicate that the technique has a good potential in investigation of dual/multi-layer structures at the range of several microns to hundreds of microns.

where n is the refractive index of the transparent material. Fig. 12 shows the intensity response of a point on the micro-gear. It can be seen that only one fringe envelope is detected. Real-time fringe patterns imply that the fringe envelope is due to the interface. This can be explained that the light reflected from the top surface is too weak to be sensed by a CCD camera, because the gear is almost totally transparent. Hence, only the interference due to the interface was observed. The peak can be accurately identified using the CWT processing method mentioned above. Thus, the profile of the interface can be obtained using the resulting fringe patterns and the depth of the gear can be determined. The thickness of the gear is therefore obtained using Eq. (9). Fig. 13(a) shows the 3D profile of the micro-gear and Fig. 13(b) shows the 3D profile of the interface, from which the depth t' is obtained. Using a refractive index of 1.4, the average thickness of the gear is about $5.54 \mu\text{m}$. Grating lines are also observed on the gear specimen and the substrate. This is due to the surface texture as can be seen in the specimen image shown in Fig. 10.

References

- [1] Gui C, Boer M, Gardeniers JGE, Jansen H, Berenschot JW, Elwenspoek M. Fabrication of multi-layer substrate for high aspect ratio single crystalline microstructures. *Sensors Actuators A* 1998;70:61–6.
- [2] Jing Y, Luo J, Yi X, Gu X. Design and evaluation of PZT thin-film micro-actuator for hard disk drives. *Sensors Actuators A* 2004;116:329–35.
- [3] Bohl B, Steger R, Zengerle R, Koltay P. Multi-layer SU-8 lift-off technology for microfluidic devices. *J Micromech Microeng* 2005;15:1125–30.
- [4] Horie M, Fujiwara N, Kokubo M, Makiuchida H. Spectroscopic multi-layer film thickness measurement system. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng* 1996;2725:757–64.
- [5] Guo S, Gustafsson G, Hagel OJ, Arwin H. Determination of refractive index and thickness of thick transparent films by variable-angle spectroscopic ellipsometry: application to benzocyclobutene films. *Appl. Opt.* 1996;35:1693–9.
- [6] Wang JS, Lee SJH, Lee CK. Improving the accuracy of ellipsometers for multi-layer film measurements using incident angle verification and retrieval. *Proceedings of the SPIE Int Soc Opt Eng* 1999;3635:48–56.
- [7] Windecker R, Fleischer M, Tiziani HJ. White-light interferometry with an extended zoom range. *J. Mod. Opt.* 1999;46:1123–35.
- [8] Kino GS, Chim SSC. Mirau correlation microscope. *Appl. Opt.* 1990;29:3775–83.
- [9] Groot P, Deck L. Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain. *J Mod Opt* 1995;42:389–401.
- [10] Windecker R, Tiziani HJ. Optical roughness measurements using extended white-light interferometry. *Opt Eng* 1999;38:1081–7.
- [11] Olszak A. Lateral scanning white-light interferometer. *Appl Opt* 2000;39:3906–13.
- [12] Itoh M, Yamada R, Tian R, Tsai M, Yatagai T. Broad-band light-wave correlation topography using wavelet transform. *Opt Rev* 1995;2:135–8.
- [13] Larkin KG. Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry. *J Opt Soc Am A* 1996;13:832–43.
- [14] Born M, Wolf E. *Principles of optics*, 6th ed. Oxford: Pergamon; 1980.
- [15] Sandoz P, Tribillon G. Profilometry by zero-order interference fringe identification. *J Mod Opt* 1993;40:1691–700.
- [16] Abbate A, DeCusatis CM, Das PK. *Wavelets and subbands: fundamentals and applications*. Boston: Birkhäuser; 2001.
- [17] Caber PJ. Interferometric profiler for rough surfaces. *Appl Opt* 1993;32:3438–41.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

