

การพัฒนาระบบวัดโครมกราฟีพื้นผิวด้วยอินเตอร์เฟอเมตรีแบบกวาดแนวตั้ง
DEVELOPMENT OF VERTICAL SCANNING INTERFEROMETRY FOR
SURFACE PROFILE MEASUREMENT



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับสูงตรีโทศึกษาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การพัฒนาระบบวัดโครงสร้างพื้นผิวด้วยอินเตอร์ฟีรอมетรีแบบกวาดแนวตั้ง
DEVELOPMENT OF VERTICAL SCANNING INTERFEROMETRY FOR
SURFACE PROFILE MEASUREMENT



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานปีการศึกษา 2557 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF VERTICAL SCANNING INTERFEROMETRY FOR
SURFACE PROFILE MEASUREMENT



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

ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การพัฒนาระบบวัดโครงสร้างพื้นผิวด้วยอินเทอร์เฟอเมตริกวางแนวตั้ง
DEVELOPMENT OF VERTICAL SCANNING INTERFEROMETR FOR
SURFACE PROFILE MEASUREMENT

ชื่อนักศึกษา นายพงศธร ตันติธรรมฐิติ รหัสนักศึกษา 54050556

นางสาวพิมลสิริ ทศมาลี รหัสนักศึกษา 54050563

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์





ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2557

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
อ.สุรชาติ กมลดีลก	
รศ.สาทราย เล็กชะอุม	
อ.ธนภรณ์ สีลาวัฒนานนท์	
รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา	
ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเชิงอื่นเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การพัฒนาระบบวัดโครงสร้างพื้นผิวด้วยอินเทอร์เฟอเมตรีแบบกวาดแนวตั้ง
ชื่อนักศึกษา พงศธร ตันติธรรมฐิติ รหัสนักศึกษา 54050556
พิมสิริ ทศมาลี รหัสนักศึกษา 54050563
ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2557
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วราวุฒิ เถลัดดา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาความขรุขระของพื้นผิววัสดุ โดยการใช้วิธีการตรวจสอบพื้นผิวของวัสดุแบบไม่สัมผัสคือวิธีการแทรกสอดของแสงแบบกวาดแนวตั้ง ซึ่งวิธีการตรวจสอบด้วยวิธีนี้จะไม่มีสัมผัสกับพื้นผิววัสดุทำให้สามารถใช้ในการตรวจสอบวัสดุที่มีพื้นผิวบอบบางหรืออ่อนนุ่มได้ โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับพื้นผิววัสดุ ในโครงการพิเศษนี้ใช้ LED สีฟ้า เป็นแหล่งกำเนิดแสงให้กับระบบที่ทำให้เกิดลำแสงขนานและระบบการแทรกสอดของแสงแบบไมเคิลสัน เพื่อให้เกิดริ้วการแทรกสอด จากนั้นจะใช้อุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์เป็นตัวควบคุมระยะการเลื่อนกระจกที่ติดฟิล์ม ในระบบการแทรกสอดของแสงแบบไมเคิลสันเพื่อให้ได้ภาพริ้วการแทรกสอดของแสง ที่ระยะกระจกต่างๆกัน เป็นจำนวน 70 ภาพ จากนั้นจะนำภาพริ้วการแทรกสอดที่ได้มาทำการวิเคราะห์โดยโปรแกรม MATLAB ด้วยอินเทอร์เฟอเมตรีแบบกวาดแนวตั้ง คือการวิเคราะห์ตำแหน่งที่แสงมีความเข้มสูงสุดที่แต่ละพิกเซล จากนั้นจะนำค่าตำแหน่งของทุกพิกเซลที่มีความเข้มของแสงสูงสุดมาสร้างเป็นโครงสร้าง 3 มิติ แสดงลักษณะของพื้นผิววัสดุที่ติดบริเวณกระจก

คำสำคัญ : การวัดโครงสร้างพื้นผิวของวัสดุ , วิธีการแทรกสอดของแสงแบบกวาดแนวตั้ง

Title DEVELOPMENT OF VERTICAL SCANNING INTERFEROMETRY
FOR SURFACE PROFILE MEASUREMENT

Students Pongsathon Tantithamthiti Student ID 54050556
Pimsiri Tusmalee Student ID 54050563

Degree Bachelor of Science in Applied Physics

Department Physics

Academic Year 2014

Advisor Assoc.Prof.Dr. Warawoot Thowladda

Co-Advisor Dr. S Tipawan Khlayboonme

ABSTRACT

This special project is to study roughness profile of surface object by use noncontact measurement technique called vertical scanning interferometry. By this technique we can use with object that have a soft surface without damage to surface object. Blue LED is a light source that we use in the system. In this system we make a light through the collimator lens so light are become parallel beam and pass in to Michelson system. So that, beams are interferes and then fringes are occurs. We used piezo electric transducer to drive mirror in Michelson interferometer and used camera canon power shot G7 to take photos of fringes. After that we used program matlab to processing images to make 3d surface profile of object that we test.

Keywords : Surface profile measurement , Vertical scanning interferometry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของรองศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒิ เถลัดดาที่คอยชี้แนะ แก้ไขในสิ่งที่ผิดจนลูกศิษย์เข้าใจในสิ่งที่ถูก รวมทั้งสอนให้รู้จักการพยายามและอดทนในการทำงาน

ขอขอบคุณ ดร. ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำงาน

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการแนะนำการทำรายงานเล่มนี้

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานในห้องปฏิบัติการ ที่คอยบอกข่าวสารและให้ความช่วยเหลือ

สุดท้ายขอขอบคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่ได้อุปการะค่าใช้งานในการเรียน รวมทั้งเข้าใจการทำงานเป็นอย่างดี จึงขอกล่าวขอบพระคุณท่านไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

พงศธร ตันติธรรมฐิติ

พิมสิริ ทัตมาลี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การตรวจสอบโดยไม่ทำลาย	4
2.2 ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์	6
2.3 Vertical scanning interferometry (VSI)	8
2.4 เชียร์เพลต อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ (Shear Plate Interferometer)	8
2.5 เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect)	10
2.6 สเตรนเกจ (strain gauge)	11
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	14
3.1 ระบบการสร้างภาพรีการแทรกสอดด้วยกระจก	14
3.2 ส่วนควบคุมเพียโซอิเล็กทริกและสเตรนเกจ	25
3.3 ผลการสอบเทียบความถูกต้องของเพียโซอิเล็กทริกและสเตรนเกจ	26
3.4 สรุปผลการสอบเทียบอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริกและสเตรนเกจ สำหรับขีดจำกัดสูงสุด 150 V	36
3.5 ภาพรีการแทรกสอดด้วยกระจกราบด้วย Blue LED	38
3.6 ภาพรีการแทรกสอดของแสงโดยกระจกที่เคลือบฟิล์มชั้นบนได้ด้วย Blue LED	39
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	40
4.1 ผลการวิเคราะห์ภาพรีการแทรกสอด	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	48
เอกสารอ้างอิง	49
ภาคผนวก	50



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินงาน	2
3.1 ผลการวัดค่าผลต่าง peak to peak เมื่อใช้ limit voltage 75 V	30
3.2 ผลการวัดค่าผลต่าง peak to peak เมื่อใช้ limit voltage 150 V (forward bias)	32
3.3 ผลการวัดค่าผลต่าง peak to peak เมื่อใช้ limit voltage 150 V (reverse bias)	35
3.4 เปรียบเทียบค่า peak to peak ที่แต่ละ step	36



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์	6
2.2 พิจารณาแนวทางเดินแสงทั้งหมด	7
2.3 ภาพจำลองการวางรี้วการแทรกสอดในแนวตั้งเพื่อวิเคราะห์ภาพ	8
2.4 Shear Plate SI254 ของบริษัท THORLAB	8
2.5 Shear Plate Interferometry	9
2.6 ลักษณะของลำแสงบนเชียร์เพลตที่ลำแสงขนาน	9
2.7 ลักษณะของลำแสงบนเชียร์เพลตที่ลำแสงไม่ขนาน	10
2.8 ปรากฏการณ์ Piezoelectricity	10
2.9 Wheatstone bridge	13
3.1 ซีเลียมนีออนเลเซอร์ (HeNe Laser)	14
3.2 กระจกสะท้อน 45 องศา	15
3.3 เลนส์นูนแกมระนาบ (Plano convex lens) ความยาวโฟกัสขนาด 10 mm	15
3.4 เลนส์นูนแกมระนาบ (Plano convex lens) ความยาวโฟกัสขนาด 250 mm	15
3.5 การจัดระบบแสงเพื่อทำให้เกิดลำแสงขนาน	16
3.6 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์ในการจัดระบบแสงเพื่อทำให้เกิดลำแสงขนาน	16
3.7 เชียร์เพลต (Shear Plate)	16
3.8 ภาพรี้วการแทรกสอดของ HeNe Laser เมื่อเป็นลำแสงขนาน จากอุปกรณ์เชียร์เพลต	17
3.9 ภาพรี้วการแทรกสอดของ HeNe Laser เมื่อเป็นลำแสงขนาน จากอุปกรณ์เชียร์เพลต	17
3.10 ภาพรี้วการแทรกสอดของ He-Ne Laser เมื่อลำแสงไม่ขนาน	17
3.11 ภาพรี้วการแทรกสอดของ He-Ne Laser เมื่อลำแสงไม่ขนาน	18
3.12 Michelson Interferometry ด้วย He-Ne Laser	19
3.13 ภาพรี้วการแทรกสอดของแสงเลเซอร์จากระบบ Michelson Interferometry กรณีที่กระจก 2 บาน ยังไม่ขนานกันอย่างแท้จริง	20
3.14 ภาพรี้วการแทรกสอดของแสงเลเซอร์ ที่กระจกทั้ง 2 บาน ขนานกันอย่างแท้จริง	20
3.15 ภาพรี้วการแทรกสอดของแสงเลเซอร์ ที่กระจกทั้ง 2 บาน ขนานกันอย่างแท้จริง	20
3.16 ระบบการจัดแสงเพื่อให้เกิดลำแสงขนาน โดย LED สีฟ้า	21
3.17 Michelson Interferometry ด้วย LED สีฟ้า	21
3.18 ระบบการจัดลำแสงขนานและระบบ Michelson Interferometry ด้วย LED สีฟ้า	22
3.19 Objective Lens รวมและโฟกัสลำแสงแหล่งกำเนิดแสง LED สีฟ้าไปยังเลนส์นูน	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.20 การติดตั้งไมโครมิเตอร์ที่หมุนได้บริเวณกระจกความเรียบสูงด้านหนึ่ง	23
3.21 ภาพการหมุนไมโครมิเตอร์ หาตำแหน่งของกระจกที่ทำให้เกิดการแทรกสอดของแสง	23
3.22 ไมโครมิเตอร์แสดงตำแหน่งที่พบริ้วการแทรกสอดของแสง	24
3.23 ภาพริ้วการแทรกสอดของแสง LED สีฟ้า ที่กระจกยังไม่ขนานกันมากที่สุด	24
3.24 ภาพริ้วการแทรกสอดของแสง LED สีฟ้า หลังจากปรับกระจกและไอริส	24
3.25 การใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสง(Photodetector)ของริ้วการแทรกสอด	27
3.26 digital multimeter อ่านค่าความเข้มแสงของริ้วการแทรกสอดเป็นค่าโวลต์เตจ	28
3.27 กล้องควบคุมสเตรนเกจและผลึกเพียโซ(piezo controller)	28
3.28 โปรแกรมควบคุมการเลื่อนของผลึกเพียโซ	28
3.29 การหาค่าตำแหน่งที่มีความเข้มสูงสุดและค่าผลของ peak to peak ในโวลต์เตจ แต่ละช่วงเมื่อให้ขีดจำกัดโวลต์เตจสูงสุดคือ 75 V และสเตปการเลื่อนผลึกเพียโซคือ 30 nm โดยที่ p2p = peak to peak ระหว่างยอดความสูงของกราฟที่เลือกมาพิจารณา	29
3.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง(mV)และระยะทาง(nm)ของการเลื่อน ผลึกเพียโซครั้งที่ 1 ด้วยขีดจำกัดสูงสุด150V แบบ forward bias โดยใช้stepการขยับ ผลึกเพียโซคือ30 nm โดยที่ p2p = peak to peak ระหว่างยอดความสูงของกราฟ ที่เลือกมาพิจารณา	37
3.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง(mV)และระยะทาง(nm)ของการเลื่อน ผลึกเพียโซครั้งที่ 1 ด้วยขีดจำกัดสูงสุด150V แบบ reverse bias โดยใช้stepการขยับ ผลึกเพียโซคือ30 nm โดยที่ p2p = peak to peak ระหว่างยอดความสูงของกราฟ ที่เลือกมาพิจารณา	37
3.32 การจัดระบบการแทรกสอดของแสง Blue LED ด้วยกระจกราบ	38
3.33 ตัวอย่างริ้วการแทรกสอดของแสง Blue LED ด้วยกระจกราบ	38
3.34 การจัดระบบการแทรกสอดของ Blue LED ด้วยกระจกที่เคลือบฟิล์มชั้นบนได	39
4.1 หน้าต่างโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์ภาพริ้วการแทรกสอด	40
4.2 หน้าต่างโปรแกรมที่ใช้ตัดภาพริ้วการแทรกสอด	40
4.3 ภาพริ้วการแทรกสอดที่แปลงภาพสีเป็นภาพเทา	41
4.4 ภาพ Gray scale ที่ยังไม่เกิดริ้วการแทรกสอด	42
4.5 ภาพ Gray scale ที่เกิดริ้วการแทรกสอด	42
4.6 ความเข้มแสงของภาพที่ยังไม่เกิดริ้วการแทรกสอด	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ความเข้มแสงของภาพที่ยังไม่เกิดริ้วการแทรกสอด	42
4.8 ความเข้มแสงของภาพที่เกิดริ้วการแทรกสอด	43
4.9 ความเข้มแสงของภาพที่เกิดริ้วการแทรกสอด	43
4.10 ความเข้มแสงของภาพที่เกิดริ้วการแทรกสอดลดด้วยความเข้มแสง Background	43
4.11 ความเข้มแสงของภาพที่เกิดริ้วการแทรกสอดลดด้วยความเข้มแสง Background	44
4.12 ตัวอย่างภาพริ้วการแทรกสอดของกระจกราบ	44
4.13 ตัวอย่างภาพริ้วการแทรกสอดของกระจกราบ	44
4.14 ตัวอย่างภาพริ้วการแทรกสอดของกระจกเคลือบฟิล์มชั้นบันได step	45
4.15 ตัวอย่างภาพริ้วการแทรกสอดของกระจกเคลือบฟิล์มชั้นบันได step	45
4.16 ตัวอย่างการซ้อนภาพริ้วการแทรกสอดที่ลบ Background แล้ว เพื่อวิเคราะห์แบบ Vertical scanning interferometry	45
4.17 ภาพจำลองการวิเคราะห์แบบ vertical scanning	46
4.18 Surface roughness profile of flat mirror	46
4.19 Surface roughness profile of step mirror	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ความขรุขระของพื้นผิววัสดุ เป็นตัวแปรหนึ่งที่จะเกิดขึ้นกับวัสดุได้โดยทั่วไป หากวัสดุนั้นมีการสัมผัสโดยส่วนต่างๆของร่างกาย หรือการที่วัสดุนั้นได้สัมผัสกับอนุภาคนิวมิ ความดันรวมไปถึงความชื้นที่มีค่าต่างกันไป ปัจจัยต่างๆเหล่านี้จะส่งผลทำให้วัสดุเกิดความขรุขระบนพื้นผิว ซึ่งความขรุขระของพื้นผิววัสดุนั้นจะส่งผลต่อกับเสถียรภาพของมวลวัสดุ รวมถึงประสิทธิภาพของวัสดุด้วย เช่น ประสิทธิภาพในการสะท้อนหรือดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของวัสดุ ว่าความขรุขระของพื้นผิววัสดุนั้นยังอยู่ในระดับที่ยังสามารถนำไปใช้งานได้หรือไม่และจะส่งผลกระทบต่อการใช้งานหรือไม่

ซึ่งการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างพื้นผิววัสดุนั้นก็มีหลากหลายวิธีเช่น การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างพื้นผิวแบบสัมผัส (Contact measurement technique) โดยใช้เข็มกล (Stylus) ข้อดีของการตรวจสอบด้วยวิธีนี้คือสามารถตรวจสอบได้ง่าย แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือหากวัสดุที่เรานำมาตรวจสอบมีพื้นผิววัสดุที่อ่อนนุ่มหรือบอบบาง อาจทำให้พื้นผิวหน้าวัสดุเสียหายได้ ดังนั้นในโครงการพิเศษนี้จึงเลือกใช้การตรวจสอบพื้นผิววัสดุแบบไม่สัมผัส (Noncontact measurement technique) โดยการตรวจสอบลักษณะของพื้นผิววัสดุแบบไม่สัมผัสก็มีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งจะต้องมีการเตรียมชิ้นงานให้เหมาะสมเพื่อให้สามารถตรวจสอบโดยใช้เครื่อง SEM ได้ หรือวิธีการแทรกสอดของแสงแบบเลื่อนเฟส (Phase shift interferometry : PSI) โดยที่การตรวจสอบลักษณะของพื้นผิววัสดุด้วยวิธีนี้ จะเหมาะกับวัสดุที่มีความเรียบของพื้นผิวสูงมากๆ คือในพื้นที่ผิวของวัสดุที่ตรวจสอบนั้นความขรุขระที่แต่ละตำแหน่งแตกต่างกันไม่มากนัก ไม่เช่นนั้นจะทำให้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ผิดพลาดไป ดังนั้นในโครงการพิเศษนี้จึงเลือกใช้การตรวจสอบลักษณะของพื้นผิววัสดุ โดยการใช้วิธีการแทรกสอดของแสงแบบกวาดแนวตั้ง (Vertical scanning Interferometry : VSI) ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถตรวจสอบ

ลักษณะของพื้นผิววัสดุที่มีความเรียบสูงไม่มากนักได้ และจากการตรวจสอบด้วยวิธีนี้จะได้ภาพการแทรกสอดของแสง เมื่อนำไปวิเคราะห์แล้วใช้โปรแกรม MALAB แสดงภาพโครงสร้างพื้นผิวของวัสดุแบบ 3 มิติ ทำให้สามารถทราบลักษณะของพื้นผิววัสดุได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการทำงานของระบบ Michelson interferometry (MI) เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน (He-Ne Laser) และ LED (Light emitting diode) สีฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เพื่อศึกษาภาพรบกวนการแทรกสอดของแสงที่ได้จากแหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ฮีเดียม(He-Ne Laser) และ LED (Light emission diode) สีฟ้า
3. เพื่อศึกษาการทำงานของ piezoelectric transducer (PZT) ในการควบคุมระยะของวัสดุที่เลื่อนไป
4. เพื่อศึกษาการวิเคราะห์ภาพรบกวนการแทรกสอด
5. เพื่อแสดงภาพโครงสร้างของพื้นผิววัสดุที่นำมาตรวจสอบ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. จัดระบบแสงแบบ Michelson interferometry (MI)
2. การควบคุมระยะของกระจกโดยการใช้ Piezoelectric transducer (PZT)
3. นำภาพรบกวนการแทรกสอดที่บันทึกได้จากระบบ Michelson interferometry (MI) กรณีใช้แหล่งกำเนิดแสงLED (Light emitting diode) สีฟ้า มาวิเคราะห์ผล
4. แสดงภาพโครงสร้างของพื้นผิววัสดุที่นำมาตรวจสอบผ่านโปรแกรม MATLAB

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินงาน

ช่วงเวลา	ขั้นตอนการดำเนินงาน
ตุลาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2557	<ul style="list-style-type: none"> - ศึกษาลักษณะการทำงานของ PZT - ศึกษาการจัดระบบแสงแบบ MI โดยใช้วิธี VSI - ศึกษาการนำภาพที่บันทึกได้มาวิเคราะห์ - ศึกษาการสร้าง surface profile โดยใช้โปรแกรม MATLAB
มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2558	<ul style="list-style-type: none"> - จัดระบบแสงแบบ MI โดยใช้วิธี VSI - ควบคุมการเคลื่อนที่ของ PZT เพื่อให้ได้ระยะตามต้องการ - ถ่ายภาพรบกวนการแทรกสอดที่ได้จากระบบโดยใช้กล้อง Canon G7
พฤษภาคม พ.ศ. 2558	<ul style="list-style-type: none"> - นำภาพรบกวนการแทรกสอดที่ได้มาวิเคราะห์ค่าความสูงในแต่ละพิกเซล - นำค่าความสูงที่ได้ในแต่ละพิกเซล มาสร้างเป็นภาพโครงสร้างของพื้นผิววัสดุแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจในการจัดระบบแสง เพื่อทำให้เกิดลำแสงขนาน
2. มีความรู้ความเข้าใจในการจัดระบบแสงแบบ Michelson interferometry (MI) เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน(He-Ne Laser) และ LED (Light emitting diode) สีฟ้า
3. มีความรู้ความเข้าใจในการควบคุมระยะของกระจกที่เลื่อนไปโดย Piezoelectric transducer (PZT)
4. มีความรู้ความเข้าใจในการวิเคราะห์และเก็บข้อมูลจากภาพรีวการแทรกสอด
5. มีความรู้ความเข้าใจในการนำข้อมูลที่วิเคราะห์ได้ มาสร้างภาพโครงสร้างพื้นผิววัสดุด้วย โปรแกรม MATLAB



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การตรวจสอบโดยไม่ทำลาย

2.1.1 ความหมายของการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย

การตรวจสอบโดยไม่ทำลาย หมายถึง กรรมวิธีที่ใช้ค้นหาหรือบ่งชี้หรือความผิดปกติใดๆ ที่มีอยู่ในชิ้นงาน ทั้งที่เป็นอันตรายต่อการใช้งานหรือไม่เป็นอันตรายต่อการใช้งาน โดยที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับชิ้นงานนั้น ซึ่งต่อไปนี้อาจบ่งชี้หรือความผิดปกติใดๆ ที่กล่าวถึงนี้จะเรียกโดยรวมว่า ความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuity) จากความหมายของการตรวจสอบโดยไม่ทำลายนี้ การตรวจสอบโดยใช้สายตา (Visual Inspection) เป็นการตรวจสอบโดยไม่ทำลายที่สะดวก รวดเร็ว และประหยัดที่สุด ดังนั้นหากสามารถตัดสินผลของการตรวจสอบโดยใช้การตรวจสอบโดยใช้สายตาได้แล้ว ก็ไม่จำเป็นที่จะต้องใช้การตรวจสอบโดยวิธีอื่นอีกแต่อย่างไรก็ตามความไม่ต่อเนื่องอาจเกิดในตำแหน่งหรือขนาดที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าจึงได้มีการพัฒนาวิธีการตรวจสอบโดยไม่ทำลายวิธีต่างๆ ขึ้นมาเพื่อช่วยให้สามารถตรวจสอบความไม่ต่อเนื่องดังกล่าวนี้ได้

2.1.2 ความสำคัญของการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย

ในการออกแบบชิ้นงานทางด้านวิศวกรรม นอกจากต้องออกแบบองค์ประกอบของการทำงานของชิ้นงานนั้นแล้ว ยังต้องออกแบบให้มีความแข็งแรงและอายุการใช้งานเหมาะสมตามความต้องการของการใช้งานชิ้นงานนั้น การเสียหายของชิ้นงานก่อนเวลาอันสมควรไม่ควรเกิดขึ้นจากการใช้งานตามปกติ แต่ในกรณีที่ชิ้นงานนั้นมีความไม่ต่อเนื่องเกิดขึ้น ความไม่ต่อเนื่องนี้ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานต่ำกว่าที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งก็มีวิธีการแก้ไขโดยการใส่ตัวประกอบความปลอดภัย (Safety Factor) ที่สูงขึ้น เพื่อชดเชยไว้หากเกิดความไม่ต่อเนื่องดังกล่าว วิธีการนี้มีข้อเสียคือชิ้นงานต้องมีขนาดใหญ่ขึ้นจึงสิ้นเปลืองวัสดุและทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้การตรวจสอบโดยไม่ทำลายจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญ ในการค้นหาความไม่ต่อเนื่องก่อนการนำไปใช้งาน ดังนั้นจึงสามารถลดตัวประกอบความปลอดภัยในส่วนเพื่อของการเกิดความไม่ต่อเนื่องลงได้

2.1.3 วัตถุประสงค์ของการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย

2.1.3.1 เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นของผลิตภัณฑ์

อุปกรณ์และโครงสร้างต่างๆ นั้น จะต้องมีความปลอดภัยในขณะที่ใช้งาน ถ้าไม่มีรอย บกพร่อง อยู่เลยก็จะมี ความแข็งแรงทางกลเท่าเทียมกับวัสดุที่ไม่มีรอยบกพร่อง ซึ่งตามความเป็นจริงแล้วการที่จะให้วัสดุที่ไม่มีรอยบกพร่องเลยย่อมเป็นไปได้ ทำนองเดียวกันวิธีการผลิตที่จะไม่ก่อให้เกิดรอย บกพร่องเลยก็เป็นไปไม่ได้ ดังนั้น ที่ตัวชิ้นส่วนหรือบริเวณรอยเชื่อมนั้นมียรอยบกพร่องอยู่เท่าใดจะ ประเมินได้โดย การตรวจสอบอุปกรณ์หรือโครงสร้างจริงที่จะใช้งาน แล้วตัดสินว่ารอยบกพร่องที่มีนั้น มีความปลอดภัยเพียงพอสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการใช้งานหรือไม่ ข้อมูลที่จะใช้ในการตัดสินใจ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังกล่าวจะได้จากการทดสอบโดยไม่ทำลายนั่นเอง โดยการใช่วิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายอย่างเหมาะสม จะสามารถตรวจสอบให้แน่ใจ ถึงความปลอดภัยและเพิ่มความเชื่อมั่นขึ้นได้ ซึ่งก็เป็นวัตถุประสงค์ที่สำคัญประการหนึ่ง ของการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย

2.1.3.2 เพื่อการปรับปรุงเทคนิคการผลิต

ตัวอย่างเช่น เพื่อกำหนดวิธีการเชื่อมที่เหมาะสม จะทำการวางแผนการเชื่อมต่างๆ แล้วสร้างแผนทดสอบโดยเชื่อมตามแผนที่วางไว้ จากนั้นก็ทำการทดสอบโดยไม่ทำลายโดยวิธีการต่างๆ เริ่มตั้งแต่การทดสอบด้วยรังสีจากผลการทดสอบก็จะนำมาแก้ไขปรับปรุงวิธีการเชื่อม แล้วตัดสินใจเลือกวิธีการเชื่อมที่จะได้รอยเชื่อมที่มีคุณภาพตามต้องการ ซึ่งวิธีการทดสอบโดยไม่ทำลายก็มีส่วนช่วยในการปรับปรุงเทคนิคในการเชื่อมได้ปัจจุบันนี้ การทดสอบแบบไม่ทำลายได้มีส่วนช่วยในการปรับปรุงเทคนิคการผลิตต่างๆ เป็นอย่างมากเริ่มจากเทคนิคในการเชื่อมเป็นประการแรก ต่อไปในอนาคตการทดสอบโดยไม่ทำลายก็จะมีบทบาทสำคัญ โดยขาดเสียมิได้ในการช่วยพัฒนาปรับปรุงเทคนิคการผลิตต่างๆ มากยิ่งขึ้น

2.1.3.3 เพื่อลดต้นทุนการผลิต

ในการทำการทดสอบแบบไม่ทำลายนั้น จะเพิ่มค่าใช้จ่ายในการทดสอบขึ้น และอาจคิดว่าค่าใช้จ่ายในการผลิตจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าทำการทดสอบโดยไม่ทำลายในระหว่างกระบวนการผลิตอย่างเคร่งครัด จะทำให้ไม่มีการส่งผ่านผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเสียไปยังกระบวนการต่อไปโดยไม่รู้ล่วงหน้า ลดการสูญเสียในขั้นตอนต่อไปได้ซึ่งทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตโดยรวมลงไป อุปมาเหมือนกับการเจ็บไข้ได้ป่วย ถ้ารู้อาการล่วงหน้าได้ยิ่งเร็วเท่าใด ก็สามารถรักษาให้หายได้เร็วขึ้นเท่านั้น ทำนองเดียวกันถ้าได้ประยุกต์การทดสอบโดยไม่ทำลายตั้งแต่ขั้นต้นๆ ของกระบวนการผลิตประหยัดกระบวนการและค่าใช้จ่ายโดยรวมไปได้ ซึ่งเท่ากับเป็นการลดต้นทุนการผลิตลง

2.1.4 ข้อได้เปรียบของการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย

1. สามารถทำการตรวจสอบได้โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายใดๆ กับชิ้นงาน ดังนั้นหลังการตรวจสอบจึงสามารถนำชิ้นงานกลับมาใช้ได้อีก
2. สามารถทำการตรวจสอบทุกชิ้นงานและแบบสุ่มตัวอย่าง
3. ใช้ในการตรวจสอบหลายชนิดกับงานชิ้นเดียวกันได้เพื่อความถูกต้องของการตรวจสอบ
4. สามารถทำการตรวจสอบซ้ำกับชิ้นงานเดิมได้
5. สามารถตรวจสอบชิ้นงานขณะใช้งานได้ (ใช้ได้ในบางวิธีการ)
6. สามารถตรวจสอบชิ้นงานตามระยะเวลาการใช้งานได้ จึงทำให้ทราบการเปลี่ยนแปลงสภาพของชิ้นงานหลังผ่านการใช้งานแล้ว
7. มีอุปกรณ์ที่ใช้ในงานภาคสนามได้สะดวก
8. ในการตรวจสอบชิ้นงานที่เหมือนกัน อาจออกแบบการตรวจสอบให้เป็นระบบอัตโนมัติได้
9. ไม่ต้องเตรียมชิ้นงานเพื่อการตรวจสอบหรือบางครั้งอาจทำเพียงเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

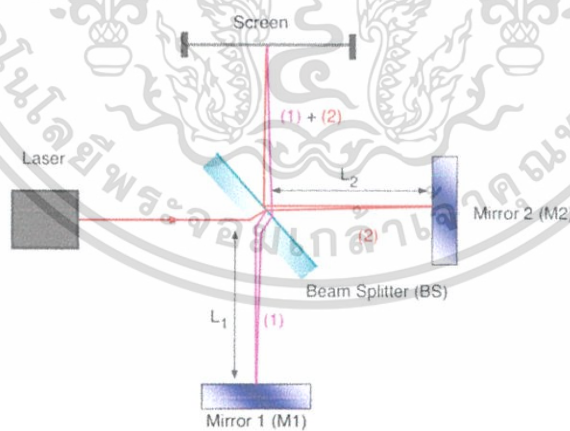
2.1.5 ข้อจำกัดของการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย

การตรวจสอบโดยไม่ทำลายเป็นการตรวจสอบความไม่ต่อเนื่องที่ซ่อนอยู่ เปรียบเทียบได้กับการคลำวัตถุในที่มีดจึงอาจทำให้เกิดการแปลผลการตรวจสอบที่ผิดพลาดได้ ดังนั้นจึงต้องใช้ผู้ตรวจสอบที่มีความชำนาญเป็นพิเศษ นอกจากนั้นการแปลผลการตรวจสอบมักต้องกระทำผ่านสื่อกลางจึงทำให้ความไว (Sensitivity) ในการตรวจสอบต่ำลงและอาจเกิดการแปลผลที่แตกต่างกันระหว่างผู้ทำการตรวจสอบแต่ละราย ข้อจำกัดอีกประการหนึ่งคือผลการตรวจสอบที่ได้มักเกิดจากการเปรียบเทียบกับสิ่งที่ทราบค่ามาก่อนหน้าที่แล้ว ดังนั้นจึงมักต้องมีการเตรียมชิ้นงานจำลองที่มีความไม่ต่อเนื่องที่ทราบค่า เช่น ขนาด ตำแหน่งที่แน่นอนเพื่อผลการตรวจสอบที่ถูกต้อง จึงเป็นการเสียเวลาและค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น

2.2 ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์

2.2.1 หลักการพื้นฐานของไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ด้วย He-Ne เลเซอร์

ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ เป็นรูปแบบการแทรกสอดเกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดแสงโคฮีเรนต์เดียวกัน ลำแสงจะถูกแยกออกเป็นแสงสองขบวนโดยตัวแยกแสง (Beam Splitter : BS) โดยปกติ ลำแสงลำที่ 1 จะสะท้อน (Reflected : R) ตัวแยกแสงและไปตกกระทบ Mirror 1 (M1) จากนั้นจะสะท้อนกระจกกลับมายังตัวแยกแสง และส่งผ่านเลนส์ไปยังฉากรับแสง (Screen) และลำแสงอีกลำหนึ่งจะส่งผ่าน (Transmitted : T) โดยตัวแยกแสงไปยัง Mirror 2 (M2) และสะท้อนกระจกกลับมายังตัวแยกแสง จากนั้นจะสะท้อนตัวแยกแสงไปยังฉากรับแสง ทำให้ได้ลำแสง 2 ลำมาแทรกสอดกันและเกิดภาพริ้วการแทรกสอดบนฉากรับภาพ



รูปที่ 2.1 ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์

การเกิดภาพริ้วการแทรกสอดนั้น ระยะห่างระหว่างกระจก M1 ถึงตัวแยกแสง และระยะห่างระหว่างกระจก M2 ถึงตัวแยกแสง ทั้ง 2 ค่าจะต้องมีค่าห่างกันไม่เกินความยาวโคฮีเรนต์ของแหล่งกำเนิด ซึ่งในกรณีเลเซอร์นั้นเป็นแหล่งกำเนิดที่มีความยาวโคฮีเรนต์มาก ดังนั้นหากกระจกทั้ง 2 ห่างจากตัวแยกแสงเป็นระยะที่ไม่เท่ากันก็ยังสามารถเกิดภาพริ้วการแทรกสอดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ด้วย LED สีฟ้า

ในกรณีของการใช้แหล่งกำเนิดเป็น LED (Light Emitting Diode) สีฟ้า นั้น ความยาวโคฮีเรนซ์ของแหล่งกำเนิดมีค่าน้อยมากคือประมาณ 20 ไมโครเมตร ดังนั้นการจะทำให้เกิดภาพริ้วการแทรกสอดได้ กระจกทั้ง 2 จะต้องมียุทธห่างจากตัวแยกแสงต่างกันไม่เกิน 20 ไมโครเมตร ดังนั้นชนิดของแหล่งกำเนิดมีผลต่อความละเอียดในการปรับระยะกระจก และยังส่งผลต่อการเกิดภาพริ้วการแทรกสอด

2.2.3 แนวทางเดินแสงของไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์



รูปที่ 2.2 แสดงแนวทางเดินแสงทั้งหมด เพื่อพิจารณาความต่างของทางเดินแสง การวางตำแหน่งของกระจก $M1'$ คือการนำมาเปรียบเทียบกับการวางของกระจก $M2$ จะเห็นได้ว่ามีระยะที่แตกต่างกันระยะของกระจก $M1$ ถึงตัวแยกแสงคือ d_1 และระยะของกระจก $M2$ ถึงตัวแยกแสงคือ d_2 จะได้ผลต่างของทางเดินแสงคือ Δd

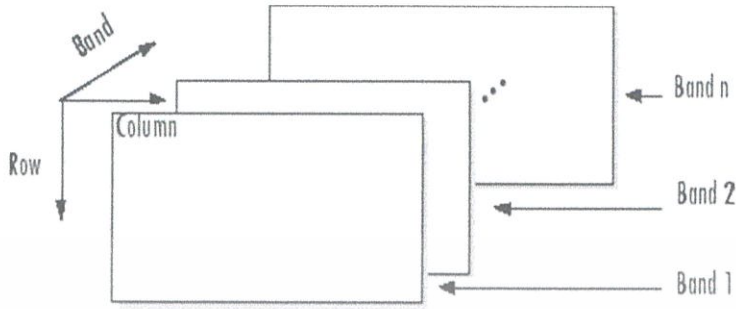
ซึ่งผลต่างทางเดินแสงจะเป็นตัวกำหนดว่าริ้วการแทรกสอดจะเกิดหรือไม่ เพราะการที่ริ้วการแทรกสอดจะเกิดได้ ผลต่างทางเดินแสงจะต้องมีค่าไม่เกิดความยาวโคฮีเรนซ์ของแสง

2.3 Vertical scanning interferometry (VSI)

การวิเคราะห์ภาพริ้วการแทรกสอดเพื่อสร้างภาพโครงร่างพื้นผิววัสดุนั้นมีหลายวิธี แต่วิธี Vertical scanning Interferometry นั้นสามารถวิเคราะห์ได้ง่ายและไม่มีข้อจำกัดว่าพื้นผิว การวิเคราะห์ด้วย Vertical scanning Interferometry เป็นการวิเคราะห์ภาพริ้วการแทรกสอดของแสงแบบกวาดแนวตั้งบนภาพริ้วการแทรกสอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่วิธีการวิเคราะห์คือวิเคราะห์ที่ตำแหน่งพิกเซลเดียวกันของทุกภาพ แล้วพิจารณาหาตำแหน่งที่ภาพร็วการแทรกสอดนั้นมีความเข้มสูงสุด จากนั้นทำการหาตำแหน่งที่ร็วมีความเข้มสูงสุดในทุกๆ พิกเซล



รูปที่ 2.3 ภาพจำลองการวางร็วการแทรกสอดในแนวตั้งเพื่อวิเคราะห์ภาพ

2.4 เชียร์เพลต อินเตอร์เฟอริมิเตอร์ (Shear Plate Interferometer)

เชียร์เพลต (Shear Plate) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบความขนานของลำแสง (Collimation of light)

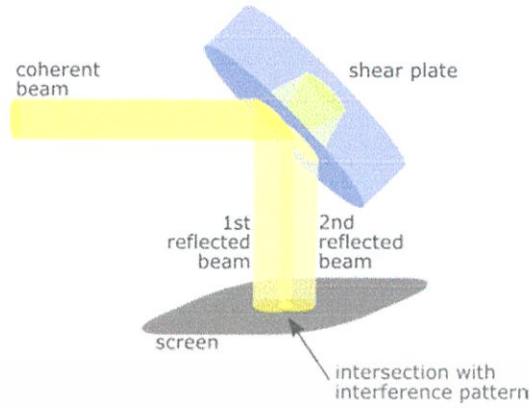


รูปที่ 2.4 Shear Plate SI254 ของบริษัท THORLAB

2.4.1 หลักการทำงานพื้นฐานของเชียร์เพลต

เมื่อระนาบของคลื่นตกกระทบที่มุม 45 องศา จะเกิดการสะท้อนสองครั้งที่แผ่นเพลต (Plate) ที่มีขอบเขตความหนาจำกัดจะทำให้ลำแสงที่สะท้อนจะถูกแยกออกทางด้านข้าง เชียร์เพลตถูกสร้างให้มีการสะท้อนแสงที่พื้นผิวด้านหน้า และด้านหลังนั้นมีเส้นทางเดินแสงแตกต่างกันตามลำดับ ส่งผลให้ตรงบริเวณที่มีการซ้อนทับกันของลำแสงขนานนั้นเกิดเป็นร็วแทรกสอดเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



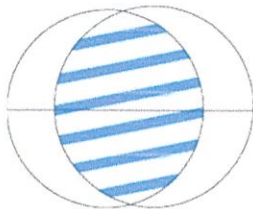
รูปที่ 2.5 Shear Plate Interferometry

ริ้วที่เกิดขึ้นนั้นจะมีระยะห่างเท่าๆกัน ขนานตามแนวแกนแสงในเชียร์ริงอินเตอร์เฟอริเตอร์ โดยทิศทางของริ้วจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อลำแสงนั้นไม่ได้ขนานกันอย่างสมบูรณ์

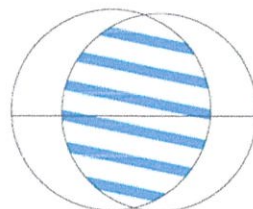


รูปที่ 2.6 ลักษณะของลำแสงบนเชียร์เพลตที่ลำแสงขนาน

จะเห็นได้ว่าลักษณะของลำแสงบนเชียร์เพลตนั้น มีหลายรูปแบบแต่การที่ลำแสงขนานนั้นจะทำให้ได้ลักษณะลำแสงบนเชียร์เพลตดังรูป collimated beam ส่วนลำแสงที่ไม่ขนานนั้นจะได้ดังรูป diverging beam และ converging beam



diverging beam



converging beam

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแก้ไขลำแสงที่ไม่ขนานนั้นอาจทำได้โดยการจัดระบบแสงให้มีความถูกต้อง เช่น การปรับลำเลเซอร์ให้ขนาน การปรับมุมและความสูงของกระจกให้เหมาะสมรวมไปถึงการปรับระยะเลนส์ซึ่งเป็นระบบจัดแสงขนานให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องด้วย

2.5 เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect)

เพียโซอิเล็กทริกเป็นคุณสมบัติชนิดหนึ่งของวัสดุที่มาจากคริสตอลรวมไปถึงคริสตอลธรรมชาติทั้ง ควอตซ์(Quartz) ดีเกลือ (Rochelle Salt) อัญมณี (Tourmaline) รวมกับเซรามิก เช่น แบเรียมไททาเนต และลีดโซโคเนต เมื่อใช้ความดันทางกลปรับให้เข้ากับวัสดุเหล่านี้โครงสร้างที่เป็นคริสตอลจะสร้างสนามไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมกับความดัน ทำให้โครงสร้างถูกเปลี่ยนรูปร่างจนทำให้เกิดการเปลี่ยนมิติของวัสดุ

2.5.1 ปรากฏการณ์ Piezoelectricity

เนื่องจากความไม่สมมาตรกับจุดศูนย์กลางของผลึกเซลล์ (Non Centrosymmetry) เมื่อมีแรงกดจะทำให้ Dipole เกิดขึ้น และเป็นผลทำให้เกิดกระแสขึ้น ในทำนองกลับกันเมื่อมีแรงดึงจะทำให้ Dipole เกิดขึ้น และเป็นผลทำให้เกิดกระแสขึ้น เช่นกัน ดังรูปที่ 2.8ก

ในทำนองเดียวกันเมื่อเราบีบแรงดันบนเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ตัวเซรามิกจะขยายและหดตัว ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล ดังรูปที่ 2.8ข



(2.8ข)

รูปที่ 2.8 ปรากฏการณ์ Piezoelectricity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 แนวทางและหลักการทํางานพื้นฐานของเพียโซอิเล็กทริก

เมื่อความดัน แรง ความเร่ง ถูกนำไปใช้กับคริสตัลควอตซ์ ประจุสามารถผ่านคริสตัลโดยเป็นส่วนหนึ่งของแรงที่ใช้ ความแตกต่างระหว่างคริสตัลเซนเซอร์และแรงทางกล เช่น Strain Gauge คือสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากคริสตัลปล่อยกัมมันตรังสีอย่างรวดเร็ว ความเฉพาตัวดังกล่าวจึงไม่เหมาะที่จะใช้วัดแรงสถิตหรือความดัน แต่ใช้ได้ผลดีกับการวัดที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

2.6 สเตรนเกจ (strain gauge)

คือเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดแรงดึงเครียด(Strain) ของวัตถุ ส่วนใหญ่สเตรนเกจ จะทำจากเส้นลวดโลหะขนาดเล็กขดเป็นรูปร่างต่างๆอยู่บนแผ่นฉนวน นอกจากนี้ยังมีสเตรนเกจแบบอุปกรณ์กึ่งตัวนำด้วย ซึ่งมีความไวสูงกว่าและขนาดเล็กกว่าแบบลวดโลหะ แต่ก็มีราคาแพงกว่าเช่นกัน สเตรนเกจสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือแบบยึดติด (Bonded Strain Gauge) และแบบไม่ยึดติด (Unbonded Strain Gauge) ซึ่งสเตรนเกจ ทั้งสองชนิดจะมีลักษณะของโครงสร้างและการทำงานที่คล้ายกันคือ ทำด้วยเส้นลวดเล็กๆ ขดไปขดมาและนำไปติดกับวัตถุที่ต้องการตรวจวัดความเครียด

2.6.1 หลักการพื้นฐานของสเตรนเกจ (Strain gage)

ใช้หลักการของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าภายในเส้นลวด เพื่อการตรวจวัดความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นจากแรงที่มากระทำบนเส้นลวดนี้ สเตรนเกจ มีการใช้งานในการตรวจวัดได้อย่างกว้างขวาง เช่น การวัดน้ำหนัก ความดัน แรงเชิงกล หรือการเคลื่อนที่ (Displacement) เมื่อสเตรนเกจถูกดึงให้ยืดออก ความยาวของเส้นลวดจะเพิ่มขึ้นในขณะที่พื้นที่หน้าตัดจะลดลง ผลก็คือความต้านทานของเส้นลวดจะเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากความต้านทานโลหะตัวนำจะแปรค่าโดยตรงตามความยาวและแปรค่าผกผันกับพื้นที่หน้าตัด ดังนั้นจึงเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ได้ว่า

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

เมื่อ R = ความต้านทานของสเตรนเกจ หน่วย โอห์ม

P = ค่าความต้านทานคงที่ของตัวโลหะ หน่วย โอห์มเมตร

L = ความยาวของเส้นลวด หน่วย เมตร

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ หน่วยตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 การใช้สเตรนเกจวัดความเครียดของวัตถุ

การใช้สเตรนเกจ ในการตรวจวัดความเครียดวัตถุ นั้น เราจะพิจารณาถึงปริมาณทางกายภาพสองสิ่ง คือ 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

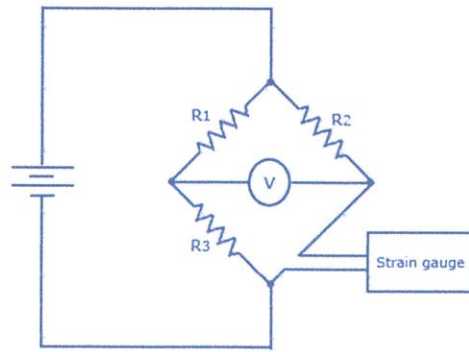
$$K = \frac{\Delta R/R}{G}$$

จากการค้นพบของฮุค (Hooke) เกี่ยวกับวัตถุหลายๆ ชนิดที่ขนาดจำกัด ซึ่งจะมีอัตราส่วนคงที่ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) อยู่ ซึ่งความเค้น (Stress) จะนิยามได้ว่าเป็นแรงภายในต่อหน่วยพื้นที่ค่าคงที่ ค่าคงที่ของสัดส่วนระหว่างความเค้นและความเครียดตามกฎของฮุค (Hooke's law) นี้เรียกว่า “ดัชนีการยืดหดของวัตถุ” (Modulus of Elasticity of The Material) หรืออาจจะเรียกว่า “ยังโมดูลัส” (Young's Modulus)

2.6.3 การใช้งานสเตรนเกจ

การใช้งานของสเตรนเกจ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ให้ความเที่ยงตรงในการวัดความยืดหรือหดตัวของวัตถุได้เป็นอย่างดี เช่น การวัดความเครียดในคานเสาของงานด้านโยธา โดยเราจะนำเอาสเตรนเกจ ไปแปะติดกับคานหรือเสาที่ต้องการวัด และต้องงานเข้าร่วมกับวงจรบริดจ์ ใช้วัดค่าความต้านทานในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อวัดหาค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 Wheatstone bridge



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ระบบการสร้างภาพรีจิวการแทรกสอดด้วยกระจก

3.1.1 ระบบการจัดแสงเพื่อสร้างลำแสงขนาน โดยเลเซอร์

การจัดระบบแสงเพื่อให้เป็นลำแสงขนานนี้ เป็นขั้นตอนในการทำให้ลำแสงที่ปลายทางนั้นมีขนาดของลำแสงสม่ำเสมอ ไม่ว่าจะตรวจสอบลำแสงที่ระยะห่างจากเลนส์ตัวสุดท้ายของระบบไปเท่าใด ลำแสงก็ยังคงจะมีขนาดเท่าเดิม ซึ่งการทำให้เป็นลำแสงขนานนั้นจะต้องเกิดจากการวางอุปกรณ์

3.1.1.1 He-Ne Laser

คือแหล่งกำเนิดแสงที่ให้กับระบบ โดยเป็นแหล่งกำเนิดที่มีความยาวโคฮีเรนซ์ยาว ในโครงการพิเศษนี้จะใช้ He-Ne Laser ในการให้แก่ระบบแสง เพื่อใช้ในการตรวจสอบตำแหน่งการวางของอุปกรณ์ว่าลำแสงขนานที่การวางอุปกรณ์ตำแหน่งใด สาเหตุที่ใช้แหล่งกำเนิดเป็นแสงเลเซอร์ในการตรวจวัดความเป็นลำแสงขนานเนื่องจากมีความเข้มสูง และสามารถเกิดรีจิวการแทรกสอดได้ง่าย



รูปที่ 3.1 ฮีเลียมนีออนเลเซอร์ (HeNe Laser)

3.1.1.2 กระจกสะท้อนมุม 45 องศา

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการสะท้อนลำแสงจากแหล่งกำเนิด ที่มาตกกระทบเพื่อสะท้อนลำแสงเป็นมุม 45 องศา ซึ่งการปรับอุปกรณ์กระจกตัวนี้จะต้องระมัดระวังและมีความถูกต้องสูงในการปรับระดับความสูงและมุมของกระจกจึงจะทำให้การสะท้อนของเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดนั้นมีความสูงของลำแสงเท่าเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 กระจกสะท้อน 45 องศา

3.1.1.3 เลนส์นูนแกมระนาบ (Plano convex lens)

ลักษณะของเลนส์นูนแกมระนาบ จะมีด้านหนึ่งของเลนส์นูนออกมา ส่วนอีกด้านหนึ่งจะมีลักษณะแบนตรง เลนส์นูนทำหน้าที่รวมแสงหรือลำแสงให้เข้ามารวมกันที่จุดจุดหนึ่งเรียกว่าจุดรวมแสงหรือจุดโฟกัส โดยขนาดความยาวโฟกัสของเลนส์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ 10 mm และ 250 mm



รูปที่ 3.3 เลนส์นูนแกมระนาบ (Plano convex lens) ความยาวโฟกัสขนาด 10 mm



รูปที่ 3.4 เลนส์นูนแกมระนาบ (Plano convex lens) ความยาวโฟกัสขนาด 250 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเลนส์ 2 ตัวนี้จะเป็นส่วนประกอบที่ต่อจากกระจกเพื่อทำให้ลำแสงขนาน การวางตำแหน่งของเลนส์ 2 ตัวนี้เพื่อให้เกิดลำแสงขนานคือการวางตำแหน่งของฉากรับที่ตำแหน่งจุดโฟกัสของเลนส์ทั้งสองพอดี นั่นคือเลนส์ตัวที่ 1 มีความยาวโฟกัส 10 mm และ เลนส์ตัวที่ 2 มีความยาวโฟกัส 250 mm ดังนั้นจะได้ว่า จะต้องวางเลนส์ตัวที่ 1 และตัวที่ 2 วางห่างกัน 260 mm จะทำให้ได้ลำแสงขนานนั้น คือความสูงของลำแสงจะต้องเท่าเดิมเสมอ รวมไปถึงขนาดของลำแสงจะมีขนาดเท่าเดิม แม้เลื่อนฉากรับแสงออกไปอีกก็ตาม เนื่องจากการวางเลนส์นั้นได้อยู่ตำแหน่งที่ทำให้เกิดลำแสงขนานแล้ว



รูปที่ 3.5 การจัดระบบแสงเพื่อทำให้เกิดลำแสงขนาน



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์ในการจัดระบบแสงเพื่อทำให้เกิดลำแสงขนาน

3.1.1.4 เชียร์เพลต (Shear Plate)



รูปที่ 3.7 เชียร์เพลต (Shear Plate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นอุปกรณ์ที่เป็นตัววัดเพื่อยืนยันว่าลำแสงที่จัดได้นั้นเป็นลำแสงขนานจริงๆ เพราะหากมองด้วยตาเปล่าไปยังลำแสงอาจดูเหมือนว่าลำแสงนั้นมีขนาดเท่าเดิมเสมือนนั้นคือ ลำแสงขนานแล้ว ดังนั้นอุปกรณ์เชียร์เพลตนี้จะเป็นตัวบ่งบอกความขนานจริงๆของลำแสง



รูปที่ 3.8 ภาพริ้วการแทรกสอดของ HeNe Laser เมื่อเป็นลำแสงขนาน จากอุปกรณ์เชียร์เพลต



รูปที่ 3.9 ภาพริ้วการแทรกสอดของ HeNe Laser เมื่อเป็นลำแสงขนาน จากอุปกรณ์เชียร์เพลต

หากลำแสงที่ผ่านระบบการจัดลำแสงขนานแล้ว ลำแสงขนานกันจริงๆจะได้ภาพลำแสงดังรูป3.8 และ 3.9 แต่ถ้าหากลำแสงนั้นไม่ได้ขนานกันจริงๆ จะทำให้ได้ภาพจากอุปกรณ์เชียร์เพลตดังนี้



รูปที่ 3. 10 ภาพริ้วการแทรกสอดของ He-Ne Laser เมื่อลำแสงไม่ขนาน จากอุปกรณ์เชียร์เพลต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ภาพริ้วการแทรกสอดของ He-Ne Laser เมื่อลำแสงไม่ขนาน จากอุปกรณ์ซีเรียเพลต

ซึ่งการที่ลำแสงไม่ขนานนั้น เกิดได้หลายสาเหตุได้ เช่น

1) ลำกระบอกเลเซอร์ไม่ขนาน

คือมีการเข้ดหน้าขึ้นหรือหน้าต่ำลง ทำให้ลำแสงที่ออกไปมีความสูงไม่เท่ากันในแต่ละระยะ เมื่อไปสะท้อนกระจกก็จะทำให้ลำแสงที่สะท้อนไปนั้นไม่ได้สะท้อนไปด้วยความสูงที่เท่าเดิม ลำกระบอกเลเซอร์ไม่ขนานเป็นปัจจัยในการจัดระบบแสงอย่างแรกที่ต้องคำนึงถึง

2) การปรับความสูงและมุมของกระจกไม่เหมาะสม

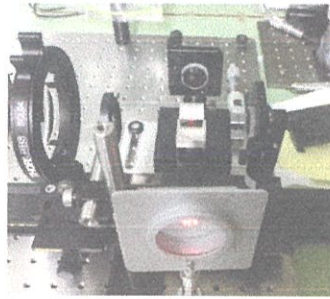
การที่ความสูงของกระจกไม่เหมาะสมนั้นอาจส่งผลทำให้ลำแสงที่มาจากกระจกนั้นไม่เข้าตรงกลางของกระจก และทำให้เกิดแสงกระเจิงไปบางส่วนหากมีแสงหลุดออกไป นอกจากนี้การที่มุมของกระจกไม่เหมาะสมก็เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ลำแสงที่สะท้อนไปอาจไม่ได้มีความสูงเท่าเดิม

3) ระยะห่างระหว่างเลนส์ทั้งสองไม่ได้อยู่ที่จุดโฟกัส

คือระยะห่างระหว่างเลนส์ตัวที่ 1 และเลนส์ตัวที่ 2 จะต้องเท่ากับ 260 mm คือที่จุดโฟกัสพอดี จะทำให้เกิดลำแสงขนานและจะได้ภาพริ้วการแทรกสอดผ่านอุปกรณ์ซีเรียเพลตเป็นเส้นตรง ถ้าหากระยะห่างระหว่างเลนส์ทั้งสองมากกว่าหรือน้อยกว่า 260 mm จะทำให้ลำแสงไม่ขนาน และภาพริ้วการแทรกสอดผ่านอุปกรณ์ซีเรียเพลตจะไม่เป็นเส้นขนานและจะเอียงทางขวาหรือทางซ้าย

เมื่อปรับอุปกรณ์แต่ละอย่างให้มีความสูง มุม และตำแหน่งที่เหมาะสมจะทำให้ได้ลำแสงขนาน เมื่อได้ตำแหน่งของอุปกรณ์ที่เกิดลำแสงขนานแล้ว โครงการพิเศษนี้จะต่ออุปกรณ์ในการจัดระบบ Michelson Interferometry (MI) เพื่อตรวจสอบตำแหน่ง ระยะ และมุมของอุปกรณ์ในระบบที่ทำให้เกิดริ้วการแทรกสอดของแสง

3.1.2 การจัดระบบแสง Michelson Interferometry (MI) ด้วย He-Ne Laser



รูปที่ 3. 12 Michelson Interferometry ด้วย He-Ne Laser

เมื่อได้ลำแสงขนานจากการเซตระบบแล้ว ก็มีการจัดระบบแสงแบบ Michelson Interferometry (MI) ซึ่งนำอุปกรณ์ของระบบ Michelson Interferometry มาประกอบถัดไป ซึ่งอุปกรณ์ต่าง ๆ นั้น ประกอบไปด้วย

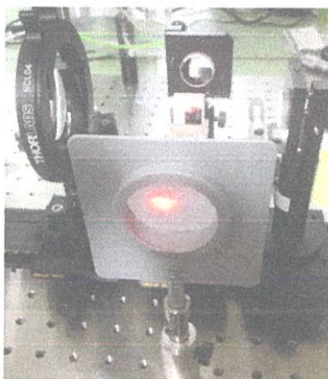
- 1) ตัวแยกแสง (Beam Splitter) ทำหน้าที่ในการแยกลำแสงออกเป็น 2 ลำ โดยแบ่งความเข้มแสงเป็น 50 : 50
- 2) กระจกความเรียบสูง 2 บาน ทำหน้าที่ในการสะท้อนแสงและเกิดการแทรกสอด
- 3) ไอริส คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการควบคุมปริมาณความเข้มของลำแสงที่ให้ผ่านมายังตัวแยกแสง (Beam Splitter)
- 4) ฉากรับแสง คือ อุปกรณ์ที่คอยรับภาพริ้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้น

เมื่อจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.12 จะทำให้เกิดภาพริ้วการแทรกสอด ซึ่งหลักการเกิดภาพริ้วการแทรกสอดด้วยระบบ Michelson Interferometry นั้น คือการที่ลำแสง 2 ลำแทรกสอดกัน

- 1) โดยลำแสงลำที่ 1 จะส่งผ่านผ่าน Beam Splitter ไปยังกระจกบานที่ 1 แล้วสะท้อนจากกระจกมายัง Beam Splitter แล้วสะท้อนไปยังฉาก
- 2) ลำแสงลำที่ 2 จะสะท้อนผ่าน Beam Splitter ไปยังกระจกบานที่ 2 แล้วสะท้อนกระจกกลับมายัง Beam Splitter จากนั้นลำแสงจะส่องผ่านไปยังฉาก

เมื่อลำแสง 2 ลำเกิดการแทรกสอดกับบริเวณฉาก จะทำให้ได้ภาพริ้วการแทรกสอด ซึ่งจากหลักการ Michelson Interferometry คือ เมื่อมีลำแสง 2 ลำ แทรกสอดกันโดยระยะห่างระหว่างกระจกจะต้องห่างไม่เกินความยาวโคฮีเรนต์ของแสง ซึ่งการเกิดภาพริ้วการแทรกสอดด้วยแสงเลเซอร์นั้นสามารถเกิดขึ้นได้ง่าย เนื่องจากแสงเลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดที่มีความยาวโคฮีเรนต์มาก ทำให้ระยะที่กระจกทั้ง 2 บานห่างจาก Beam Splitter ถึงแม้จะไม่เท่ากันก็ยังสามารถเกิดริ้วการแทรกสอดได้อยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

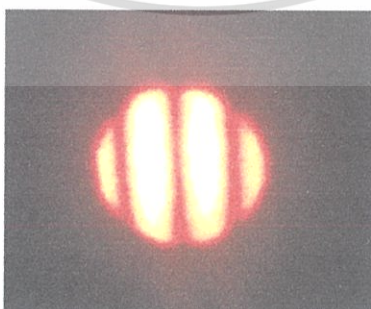


รูปที่ 3.13 ภาพรื้อการแทรกสอดของแสงเลเซอร์จากระบบ Michelson Interferometry กรณีที่กระจกทั้ง 2 บาน ยังไม่ขนานกันอย่างแท้จริง

รื้อการแทรกสอดของแสงที่มีความถี่ของรื้อมาก เนื่องจากกระจกทั้ง 2 บานยังไม่ตั้งฉากและยังไม่ขนานกันจริงๆ การแก้ไขปัญหาคือการปรับกระจกโดยการหมุน ซึ่งหากกระจกทั้ง 2 บานนั้นขนานกันจริงๆแล้ว จะได้ภาพดังนี้



รูปที่ 3.14 ภาพรื้อการแทรกสอดของแสงเลเซอร์ ที่กระจกทั้ง 2 บาน ขนานกันอย่างแท้จริง



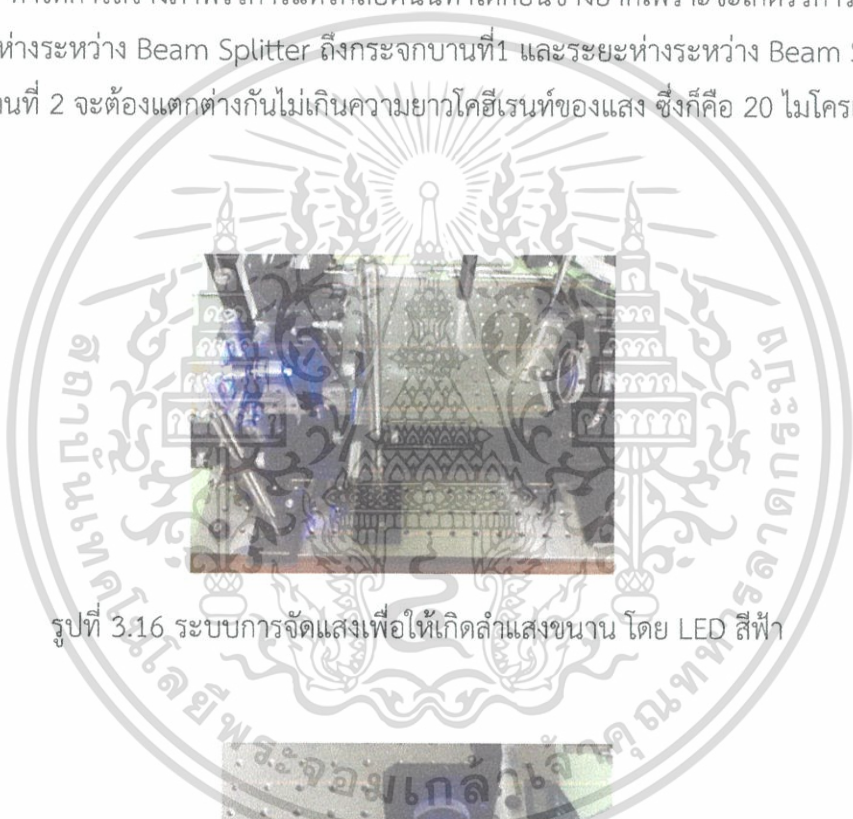
รูปที่ 3.15 ภาพรื้อการแทรกสอดของแสงเลเซอร์ ที่กระจกทั้ง 2 บาน ขนานกันอย่างแท้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

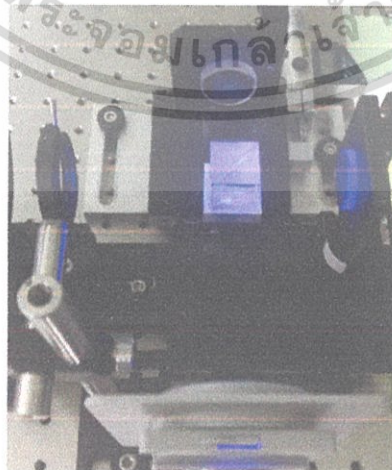
เมื่อได้ภาพรบกวนการแทรกสอดของแสงที่มีลักษณะที่ลำแสงขนาน จะได้ว่าตำแหน่งต่างๆของอุปกรณ์ที่วางไว้นั้นคือตำแหน่งของอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดลำแสงขนาน ลำดับถัดไป ในโครงการพิเศษนี้ เปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงเป็น LED (Light emission diode) สีฟ้า แล้วทำการหาวิธีการแทรกสอดของลำแสง

3.1.3 การจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วย LED (Light emitting diode) สีฟ้า

เนื่องจาก LED สีฟ้า เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวโคฮีเรนซ์สั้นมากคือประมาณ 20 ไมโครเมตร ทำให้การสร้างภาพรบกวนการแทรกสอดนั้นทำได้ค่อนข้างยากเพราะจะเกิดรบกวนการแทรกสอดได้เมื่อระยะห่างระหว่าง Beam Splitter ถึงกระจกบานที่ 1 และระยะห่างระหว่าง Beam Splitter ถึงกระจกบานที่ 2 จะต้องแตกต่างกันไม่เกินความยาวโคฮีเรนซ์ของแสง ซึ่งก็คือ 20 ไมโครเมตร เท่านั้น

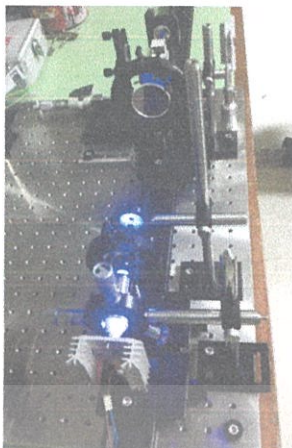


รูปที่ 3.16 ระบบการจัดแสงเพื่อให้เกิดลำแสงขนาน โดย LED สีฟ้า



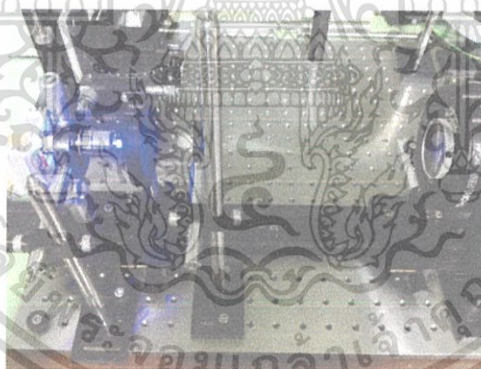
รูปที่ 3.17 Michelson Interferometry ด้วย LED สีฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3. 18 ระบบการจัดลำแสงขนานและระบบ Michelson Interferometry ด้วย LED สีฟ้า

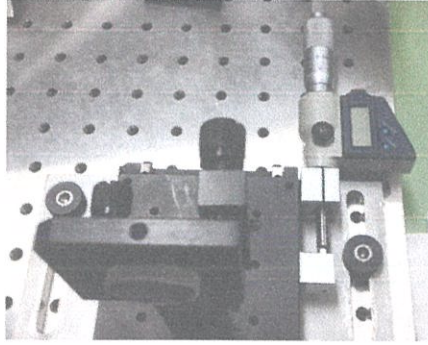
เมื่อใช้ LED (Light Emitting Diode) สีฟ้าเป็นแหล่งกำเนิด จะมีการใช้ Objective Lens เข้าด้วย เนื่องจากแหล่งกำเนิดนี้ ลำแสงจะกระจัดไม่กระจาย การใช้ Objective Lens จะช่วยรวมแสงที่กระจัดกระจายและโฟกัสลำแสงไปยัง เลนส์นูนแกมระนาบ (Plano convex lens) ขนาดความยาวโฟกัส 10 mm และ 250 mm



รูปที่ 3. 19 Objective Lens รวมและโฟกัสลำแสงแหล่งกำเนิดแสง LED สีฟ้าไปยังเลนส์นูนแกมระนาบ ขนาดความยาวโฟกัส 10 mm และ 250 mm

ด้วยความที่ใช้แหล่งกำเนิดเป็น LED สีฟ้า ดังนั้นการขนานของกระจกจะต้องขนานกันจริงๆ และกระจก 2 บานจะมีระยะห่างจาก Beam Splitter เท่ากัน ดังนั้นจึงต้องมีการติดอุปกรณ์ไมโครมิเตอร์ ไว้ที่กระจกบานหนึ่ง เพื่อใช้ในการปรับระยะห่างตำแหน่งที่กระจก 2 บานจะมีระยะห่างจาก Beam Splitter เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3. 20 การติดตั้งไมโครมิเตอร์ที่หมุนได้บริเวณกระจกความเรียบสูงด้านหนึ่ง

และทำการหมุนไมโครมิเตอร์ เพื่อหาตำแหน่งที่จะเกิดริ้วการแทรกสอด ซึ่งการหมุนไมโครมิเตอร์เพื่อขยับระยะกระจกนั้น สามารถหมุนไปทางบวกหรือลบก่อนก็ได้ เพราะตำแหน่งที่กระจกจะแตกต่างกันไม่เกิน 20 ไมโครเมตรนั้น ก็ไม่อาจทราบได้ว่าจะอยู่ทางด้านที่กระจกบานที่ติดไมโครมิเตอร์จะต้องบวกเพิ่มหรือลบถอยหลัง



รูปที่ 3.21 ภาพการหมุนไมโครมิเตอร์ หาตำแหน่งของกระจกที่ทำให้เกิดการแทรกสอดของแสง

ซึ่งการใช้ไมโครมิเตอร์นี้ ในโครงการพิเศษจะทำการหมุนไปที่ละ 1 ไมโครเมตร เพราะถ้าหมุนทีละ 1 ไมโครเมตรจะได้ว่า โอกาสที่จะพบริ้วการแทรกสอดนั้นมีถึง 20 ครั้ง แต่หากหมุนทีละ ครึ่งละ 10 ไมโครเมตรก็สามารถทำได้ แต่โอกาสที่จะพบริ้วการแทรกสอดมีเพียง 2 ครั้งเท่านั้น หากคลาดสายตาหรือโต๊ะมีการสั่นอาจทำให้ริ้วการแทรกสอดหายไปได้ ดังนั้นการหมุนไมโครมิเตอร์จึงจะต้องทำด้วยความระมัดระวัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3. 22 ไมโครมิเตอร์แสดงตำแหน่งที่พบริ้วการแทรกสอดของแสง



รูปที่ 3. 23 ภาพริ้วการแทรกสอดของแสง LED สีฟ้า ที่กระจกยังไม่ขนานกันมากที่สุด

เราสามารถแก้ไขหาภาพริ้วการแทรกสอดที่กระจกขนานกันมากที่สุดโดยการปรับระนาบของกระจก และปรับขนาดของไอริสเพื่อให้ได้ขนาดของลำแสงให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ



รูปที่ 3. 24 ภาพริ้วการแทรกสอดของแสง LED สีฟ้า หลังจากปรับกระจกและไอริส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ส่วนควบคุมเฟียโซอิเล็กทริกและสเตรนเกจ

ในส่วนนี้จะทำการให้โวลต์แดกแก่ผลึกเฟียโซ เพื่อให้ผลึกเฟียโซขยับซึ่งผลึกเฟียโซจะติดอยู่กับกระจก ด้านหนึ่งของระบบการแทรกสอดของแสงแบบไมเคิลสันทำให้กระจกเลื่อนไปตามระยะที่ต้องการ จากนั้นจะทำการบันทึกภาพร็วการแทรกสอดที่ระยะต่างๆของกระจกที่เลื่อนไป โดยระยะที่ผลึกเฟียโซเลื่อนไปนั้นจะถูกอ่านค่าโดยอุปกรณ์สเตรนเกจ อุปกรณ์ทั้งสองจะเชื่อมต่อกันและใช้โปรแกรมในการควบคุมระยะที่ต้องการให้ผลึกเฟียโซเลื่อนไป โดยที่สเตรนเกจจะบ่งบอกว่าผลึกเฟียโซนั้นมีการยืดหรือหดเป็นระยะเท่าใด ผลึกเฟียโซเปลี่ยนระยะเท่ากับที่สั่งในโปรแกรมหรือไม่ เนื่องจากคุณสมบัติของสเตรนเกจนั้นสามารถอ่านค่าความเครียดของวัสดุ และสามารถแปลงโดยใช้สมการกลายเป็นค่าระยะทางที่เปลี่ยนแปลงได้เมื่อวัสดุมีความเครียดเปลี่ยนไป ด้วยเหตุนี้จึงใช้สเตรนเกจเป็นอุปกรณ์ที่จะป้อนค่ากลับมาสู่การทดลองว่า ผลึกเฟียโซขยับไปจริงหรือไม่ และขยับไปเท่าไร ทั้งนี้จะต้องทำการทดสอบก่อนว่าสเตรนเกจนั้นแสดงค่าระยะทางที่ผลึกเฟียโซเลื่อนไปอย่างถูกต้อง คือระยะทางที่สั่งโปรแกรมให้ขยับเคลื่อนผลึกเฟียโซกับค่าระยะทางที่แสดงบนอุปกรณ์สเตรนเกจนั้นเป็นค่าเดียวกัน

3.2.1 ส่วนการทดสอบสเตรนเกจ

เริ่มจากการจัดระบบแสงแบบระบบแสงขนานและระบบการแทรกสอดของแสงไมเคิลสัน ด้วยแหล่งกำเนิดคือเลเซอร์ He-Ne เพื่อให้ร็วการแทรกสอดของแสงเลเซอร์ โดยใช้หลักการการแทรกสอดของแสงแบบไมเคิลสัน คือเมื่อผลต่างทางเดินแสงของกระจกทั้งสองบานเป็นจำนวนเต็ม ($m\lambda$) โดยที่ $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ ร็วการแทรกสอดที่ได้จะเป็นจุดสว่าง ด้วยหลักการนี้จะใช้ทดสอบความถูกต้องของการอ่านค่าสเตรนเกจคือ

3.2.1.1 จัดกระจกในการแทรกสอดของแสงแบบไมเคิลสันให้ทั้ง 2 บาน มีระยะห่างจากตัวแยกแสงเท่ากันทั้งคู่ นั่นคือจัดกระจกบานที่สามารถเลื่อนได้ด้วยผลึกเฟียโซนั้นมีระยะห่างจากตัวแยกแสงเท่ากับระยะที่กระจกบานที่อยู่กับที่ห่างจากตัวแยกแสง จะได้ว่าผลต่างทางเดินแสงเท่ากับ 0 นั่นคือ จะได้ร็วการแทรกสอดของแสงที่มีจุดสว่างและมีความเข้มสูงสุด

3.2.1.2 ใช้ photodetector วัดค่าความเข้มแสงของร็วการแทรกสอดของแสงที่จุดสว่างนั้น บันทึกค่าไว้

3.2.1.3 จัดกระจกในการแทรกสอดของแสงแบบไมเคิลสันให้กระจกบานที่สามารถเลื่อนได้ ใช้ผลึกเฟียโซขยับเคลื่อนไปให้มีระยะห่างจากตัวแยกแสงเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ($\frac{\lambda}{2}$) ในขณะที่กระจกอีกบานหนึ่งก็จะอยู่กับที่ ซึ่งจากการหลักการการแทรกสอดของแสงแบบไมเคิลสัน เมื่อลำแสงครึ่งหนึ่งที่ส่งผ่านผ่านตัวแยกแสงไป จะสะท้อนกระจกกลับมาด้วยระยะทางเท่าเดิมคืออีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ ทำให้ได้ทางเดินแสงของกระจกบานที่เลื่อนได้เป็น (λ) จะได้ว่าผลต่างทางเดินแสงของกระจกทั้งสองบานเท่ากับ 1λ นั่นคือ จะได้รับริ้วการแทรกสอดของแสงที่มีจุดสว่างและมีความเข้มสูงสุด

3.2.1.4 ใช้ photodetector วัดค่าความเข้มแสงของริ้วการแทรกสอดของแสงที่จุดสว่างและเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ในข้อ 3.2.1.2

ถ้าค่าในข้อ 2 และ ข้อ 4 เท่ากัน นั่นคือผลึกเพียโซได้ขยับไปครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นจริงๆ (เพราะทำให้ริ้วการแทรกสอดเป็นริ้วสว่างที่มีความเข้มสูงสุด ก็คือตำแหน่งตรงกลาง) จากนั้นจะต้องอ่านค่าที่สเตรนเกจว่า แสดงค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นหรือไม่ก็คือ 316.4 nm หรือ 0.3164 μm (เพราะ He-Ne Laser มีความยาวคลื่น 632.8 nm) ถ้าสเตรนเกจแสดงค่านี้จะหมายความว่าสเตรนเกจอ่านค่าถูกต้อง เหมาะสมที่จะใช้งานได้

3.3 ผลการสอบเทียบความถูกต้องของเพียโซอิเล็กทริกและสเตรนเกจ

ในส่วนนี้จะทำการให้โวลต์แดงแก่ผลึกเพียโซ เพื่อให้ผลึกเพียโซขยับซึ่งผลึกเพียโซจะติดอยู่กับกระจกด้านหนึ่งของระบบการแทรกสอดของแสงแบบไมเคิลสันทำให้กระจกเลื่อนไปตามระยะที่ต้องการ จากนั้นจะทำการบันทึกภาพริ้วการแทรกสอดที่ระยะต่างๆของกระจกที่เลื่อนไป โดยระยะที่ผลึกเพียโซเลื่อนไปนั้นจะถูกอ่านค่าโดยอุปกรณ์สเตรนเกจ อุปกรณ์ทั้งสองจะเชื่อมต่อกันและใช้โปรแกรมในการควบคุมระยะที่ต้องการให้ผลึกเพียโซเลื่อนไป โดยที่สเตรนเกจจะบ่งบอกว่าผลึกเพียโซนั้นมีการยืดหรือหดเป็นระยะเท่าใด ผลึกเพียโซเปลี่ยนระยะเท่ากับที่สั่งในโปรแกรมหรือไม่ เนื่องจากคุณสมบัติของสเตรนเกจนั้นสามารถอ่านค่าความเครียดของวัสดุ และสามารถแปลงโดยใช้สมการกลายเป็นค่าระยะทางที่เปลี่ยนแปลงได้เมื่อวัสดุมีความเครียดเปลี่ยนไป ด้วยเหตุนี้จึงใช้สเตรนเกจเป็นอุปกรณ์ที่จะป้อนค่ากลับมาสู่การทดลองว่า ผลึกเพียโซขยับไปจริงหรือไม่ และขยับไปเท่าไร ทั้งนี้จะต้องทำการทดสอบก่อนว่าสเตรนเกจนั้นแสดงค่าระยะทางที่ผลึกเพียโซเลื่อนไปอย่างถูกต้อง คือระยะทางที่สั่งโปรแกรมให้ขยับเคลื่อนผลึกเพียโซกับค่าระยะทางที่แสดงบนอุปกรณ์สเตรนเกจนั้นเป็นค่าเดียวกัน

3.3.1 ส่วนการทดสอบสเตรนเกจ

เริ่มจากการจัดระบบแสงแบบระบบแสงขนานและระบบการแทรกสอดของแสงไมเคิลสัน ด้วยแหล่งกำเนิดคือเลเซอร์ He-Ne เพื่อให้ริ้วการแทรกสอดของแสงเลเซอร์

โดยใช้หลักการการแทรกสอดของแสงแบบไมเคิลสัน คือเมื่อผลต่างทางเดินแสงของกระจกทั้งสองบานเป็นจำนวนเต็ม $(m\lambda)$ โดยที่ $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ ริ้วการแทรกสอดที่ได้จะเป็นจุดสว่าง ด้วยหลักการนี้จะใช้ทดสอบความถูกต้องของการอ่านค่าสเตรนเกจคือ

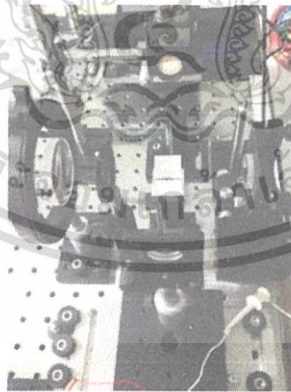
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.1 จัดกระจกในการแทรกสอดของแสงแบบไมเคิลสันให้ทั้ง 2 บาน มีระยะห่างจากตัวแยกแสงเท่ากันทั้งคู่ นั่นคือจัดกระจกบานที่สามารถเลื่อนได้ด้วยผลึกเพียโซนั้น มีระยะห่างจากตัวแยกแสงเท่ากับระยะที่กระจกบานที่อยู่กับที่ห่างจากตัวแยกแสง จะได้ว่าผลต่างทางเดินแสงเท่ากับ 0 นั่นคือ จะได้รับารแทรกสอดของแสงที่มีจุดสว่างและความเข้มสูงสุด

3.3.1.2 ใช้ photo-detector วัดค่าความเข้มแสงของร้วการแทรกสอดของแสงที่จุดสว่างนั้น บันทึกค่าไว้

3.3.1.3 จัดกระจกในการแทรกสอดของแสงแบบไมเคิลสันให้กระจกบานที่สามารถเลื่อนได้ ใช้ผลึกเพียโซขับเคลื่อนไปให้มีระยะห่างจากตัวแยกแสงเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ ในขณะที่กระจกอีกบานหนึ่งก็จะอยู่กับที่ ซึ่งจากการหลักการการแทรกสอดของแสงแบบไมเคิลสัน เมื่อลำแสงครึ่งหนึ่งที่ส่งผ่านผ่านตัวแยกแสงไป จะสะท้อนกระจกกลับมาด้วยระยะทางเท่าเดิมคืออีกครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ ทำให้ได้ทางเดินแสงของกระจกบานที่เลื่อนได้เป็น (λ) จะได้ว่าผลต่างทางเดินแสงของกระจกทั้งสองบานเท่ากับ 1λ นั่นคือ จะได้รับารแทรกสอดของแสงที่มีจุดสว่างและความเข้มสูงสุด

3.3.1.4 ใช้ photo-detector วัดค่าความเข้มแสงของร้วการแทรกสอดของแสงที่จุดสว่าง

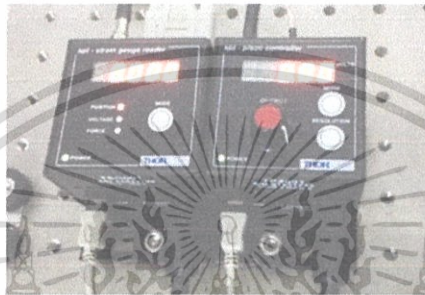


รูปที่ 3.25 การใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสง (Photodetector) ของร้วการแทรกสอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



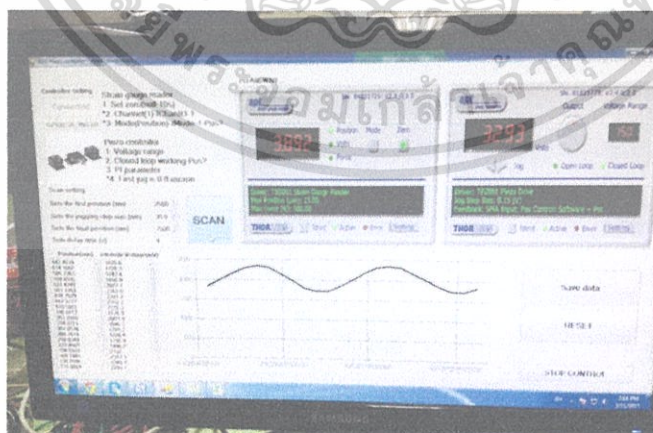
รูปที่ 3.26 digital multimeter อ่านค่าความเข้มแสงของรีจิวการแทรกสอดเป็นค่าโวลต์เตจ



รูปที่ 3.27 กล่องควบคุมสเตรนเกจและผลึกเพียโซ(piezo controller)

Digital multimeter กล่องควบคุมสเตรนเกจและผลึกเพียโซจะต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลโดยใช้โปรแกรม

3.3.1.5 ใช้โปรแกรมในการควบคุมโวลต์เตจและระยะที่จะให้ผลึกเพียโซเลื่อนไป

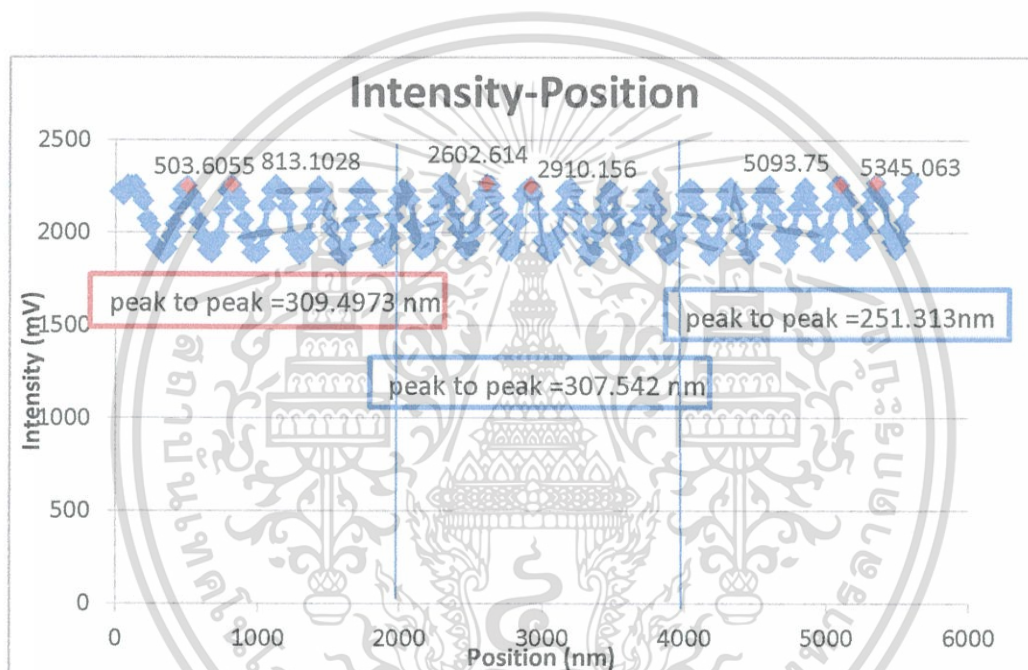


รูปที่ 3.28 หน้าต่างโปรแกรมในการควบคุมการเลื่อน step และ โวลต์เตจที่ให้กับผลึกเพียโซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมนี้จะใช้ในการเลือกโวลต์เตจสูงสุดให้กับผลึกเพียโซ เลือก step ที่ผลึกจะเลื่อนไป รวมถึงเลือกช่วงโวลต์เตจที่จะให้กับผลึกด้วย เมื่อเลือกแล้วจะทำการจ่ายแรงดันให้กับเพียโซอิเล็กทริก ทำให้รีวการแทรกสอดเปลี่ยนแปลงไป โปรแกรมจะวัดค่าความเข้มแสงที่ตำแหน่งต่างๆ บนรีวการแทรกสอดโดยใช้โฟโตดีเทคเตอร์ ซึ่งเชื่อมต่อกับดิจิตอลมัลติมิเตอร์แล้วเก็บค่าระหว่างความเข้มสูงสุดของรีวการแทรกสอดกับระยะทางที่ผลึกเพียโซเลื่อนไป

3.3.1.6 ค่าตำแหน่งที่จุดสูงสุดแต่ละจุดจะบ่งบอกถึงความเข้มที่สูงที่สุด ดังนั้นการจะวัดว่าสเตรนเกจอ่านค่าถูกต้องหรือไม่ จะต้องทำการวัดค่าระยะทางที่จุดสูงสุดระหว่างจุดสูงสุด 2 จุด (peak to peak)



รูปที่ 3. 29 การหาค่าตำแหน่งที่มีความเข้มสูงสุดและค่าผลของ peak to peak ในโวลต์เตจแต่ละช่วงเมื่อให้ขีดจำกัดโวลต์เตจสูงสุดคือ 75 V และสเตรปการเลื่อนผลึกเพียโซคือ 30 nm โดยที่ p2p = peak to peak ระหว่างยอดความสูงของกราฟที่เลือกมาพิจารณา

3.3.1.7 ในการวัดนั้นจะต้องมีตัวแปรต่างๆในการควบคุม เพื่อจะพิจารณาได้ว่าเงื่อนไขใดที่ทำให้ได้ค่าการสอบเทียบเครื่องมือใกล้เคียงค่าที่ถูกต้องมากที่สุด โดยเงื่อนไขที่จะเลือกใช้คือการเลื่อนผลึกเพียโซด้วยสเตรปต่างๆกัน ได้แก่ 10nm,20nm,30nm,40nm และ 50nm และการให้ขีดจำกัดโวลต์เตจสูงสุดที่ให้กับผลึกเพียโซ ได้แก่ 75V และ 150V ซึ่งในความเป็นจริงแล้วโวลต์เตจที่ให้กับผลึกเพียโซคือ 10-75 V เท่านั้น แต่การใช้ขีดจำกัดโวลต์เตจสูงสุดที่ 75V และ 150V ก็เพื่อที่จะเปรียบเทียบว่าขีดจำกัดสูงสุดเท่าใดที่ค่า peak to peak จะใกล้เคียงการนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อสาธารณะไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่ถูกต้องที่สุด รวมถึงการพิจารณาค่าผลต่าง peak to peak ในช่วงต่างๆของโวลต์เตจที่ให้กับผลึกเพียโซ ซึ่งจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 3 ช่วง คือช่วงด้านหน้าของกราฟ (โวลต์เตจจะมีค่าตั้งแต่ 10-30 V) ช่วงกลางของกราฟ(โวลต์เตจจะมีค่าตั้งแต่ 31-50 V) และช่วงด้านหลังของกราฟ(โวลต์เตจจะมีค่าตั้งแต่ 51-75 V) การสร้างเงื่อนไขต่างๆเหล่านี้ก็เพื่อที่จะหาว่าการเลือกใช้เงื่อนไขใด ที่เมื่อสอบเทียบอุปกรณ์แล้วจะได้ค่าใกล้เคียงค่าที่ถูกต้องมากที่สุด

นอกจากนี้จะต้องคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนของค่าที่ได้จาก $S.D/\sqrt{n}$ เนื่องจากในแต่ละค่าที่หาได้ก็จะมีค่าความไม่แน่นอนต่างกันออกไป ดังนั้นจึงต้องหาความไม่แน่นอนที่เงื่อนไขนั้นๆที่เราหามาสุดท้ายจะได้คือ $\bar{x} \pm S.D/\sqrt{n}$ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยบวกลบด้วยค่าความไม่แน่นอนของค่าที่วัด หากมีการทำซ้ำหลายๆครั้ง จำนวน n ก็จะมากขึ้นส่งผลให้ค่าความไม่แน่นอนจะน้อยลงอีกด้วย

3.3.2 โวลต์เตจสูงสุดที่ให้กับผลึกเพียโซคือ 75 V

3.3.2.1 ผลของแต่ละสเตปที่ใช้เลื่อนเพียโซอิเล็กทริก

ตารางที่ 3.1 ผลการวัดค่าผลต่าง peak to peak เมื่อใช้ limit voltage 75 V
limited 75 V

Step		10-30 V	31-50 V	51-75 V
10 nm	ครั้งที่ 1	291.407 nm	270.871 nm	252.78 nm
	ครั้งที่ 2	306.075 nm	298.74 nm	261.582 nm
	ครั้งที่ 3	299.719 nm	316.342 nm	241.535 nm
	average	299.067 nm	295.318 nm	251.966 nm
	S.D/ \sqrt{n}	4.247	13.237	5.801
20 nm	ครั้งที่ 1	299.229 nm	280.161 nm	243.979 nm
	ครั้งที่ 2	300.208 nm	299.23 nm	261.582 nm
	ครั้งที่ 3	316.832 nm	292.873 nm	242.513 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	average	305.423 nm	292.873 nm	249.358 nm
	S.D/sqrt(n)	5.711	6.356	6.127 nm
30 nm	ครั้งที่ 1	309.497 nm	307.542 nm	251.313 nm
	ครั้งที่ 2	307.542 nm	307.542 nm	251.803 nm
	ครั้งที่ 3	307.542 nm	308.52 nm	250.825 nm
	Average	308.194 nm	307.868 nm	252.314 nm
	S.D/sqrt(n)	0.652	0.326 nm	0.282
40 nm	ครั้งที่ 1	298.741 nm	262.559 nm	261.581 nm
	ครั้งที่ 2	299.719 nm	262.56 nm	261.092 nm
	ครั้งที่ 3	300.208 nm	261.092 nm	259.626 nm
	average	299.558 nm	262.070 nm	260.766 nm
	S.D/sqrt(n)	0.431	0.489	0.587
50 nm	ครั้งที่ 1	327.099 nm	280.161 nm	280.649 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่ 2	327.588 nm	279.672 nm	279.673 nm
ครั้งที่ 3	329.055 nm	278.695 nm	280.161 nm
average	327.914 nm	279.509 nm	280.161 nm
S.D/sqrt(n)	0.588	0.431	0.282

3.3.3 โวลต์เตจสูงสุดที่ให้กับผลึกเพียโซคือ 150 V

3.3.3.1 ผลของแต่ละสแตปที่ใช้เลือนเพียโซอิเล็กทริก

ตารางที่ 3.2 ผลการวัดค่าผลต่าง peak to peak เมื่อใช้ limit voltage 150 V

		limited 150 V (forward bias)		
Step		10-30 V	31-50 V	51-75 V
10 nm	ครั้งที่ 1	297.763 nm	280.65 nm	251.802 nm
	ครั้งที่ 2	298.252 nm	269.405 nm	242.513 nm
	ครั้งที่ 3	287.984 nm	270.871 nm	261.092 nm
	Average	294.666 nm	273.642 nm	251.802 nm
	S.D/sqrt(n)	3.344	3.529	5.363

20 nm	ครั้งที่ 1	372.569 nm	279.672 nm	260.603 nm
	ครั้งที่ 2	374.526 nm	280.161 nm	241.535 nm
	ครั้งที่ 3	337.367 nm	278.694 nm	262.559 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	Average	361.487 nm	279.509 nm	254.899 nm
	S.D/sqrt(n)	12.074	0.431	6.7058
30 nm	ครั้งที่ 1	307.542 nm	277.717 nm	224.422 nm
	ครั้งที่ 2	307.052 nm	280.161 nm	252.292 nm
	ครั้งที่ 3	309.986 nm	280.65 nm	251.313 nm
	Average	308.193 nm	279.509 nm	242.676 nm
	S.D/sqrt(n)	0.907	0.907	9.131
40 nm	ครั้งที่ 1	335.412 nm	298.741 nm	223.445 nm
	ครั้งที่ 2	335.411 nm	298.741 nm	223.444 nm
	ครั้งที่ 3	336.878 nm	298.74 nm	222.955 nm
	Average	335.900 nm	298.741 nm	223.281 nm
	S.D/sqrt(n)	0.4889	0.0003	0.163
50 nm	ครั้งที่ 1	279.672 nm	278.695 nm	279.671 nm
	ครั้งที่ 2	279.6726 nm	279.673 nm	279.672 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่ 3	279.672 nm	278.695 nm	278.695 nm
Average	279.6722 nm	279.021 nm	279.346 nm
S.D/sqrt(n)	0.0002	0.326	0.326

จากผลการสอบเทียบเครื่องมือที่ผ่านมา^{นี้} เป็นการป้อนโวลต์เตจให้กับผลึกเพียโซแบบ forward bias คือให้โวลต์เตจตั้งแต่ 10-150 V ค่อยๆเพิ่มขึ้นไป ซึ่งเพื่อการสอบเทียบที่แม่นยำมากขึ้น จะทำการให้โวลต์เตจแก่ผลึกเพียโซแบบย้อนกลับ (reverse bias) เพื่อดูผลระหว่าง peak to peak ว่ามีค่าเป็นอย่างไร ที่โวลต์เตจเดียวกัน ค่า peak to peak มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับของแบบ forward bias หรือไม่

การทดสอบแบบ reverse bias นี้ จะสามารถสมมติฐานได้ว่าการเลือกค่า peak to peak ที่ใกล้เคียงค่าจริงที่สุดนั้นควรจะพิจารณาจากโวลต์เตจช่วงใด

- สำหรับขีดจำกัดสูงสุด 75V

เมื่อทำการให้โวลต์เตจแบบย้อนกลับ (reverse bias) คือจะป้อนโวลต์ให้กับผลึกเพียโซ 75V แล้วค่อยๆลดลงถึง 10 V แต่โวลต์เตจที่อุปกรณ์จ่ายออกมานั้นมันมีค่ามากกว่า 75V (ตรวจสอบจาก Display program) ทำให้ไม่สามารถใช้ขีดจำกัดสูงสุด 75V กับการ reverse bias ให้กับผลึกเพียโซ ดังนั้นจึงจะต้องเลือกใช้ขีดจำกัดสูงสุดที่ 150 V

- ขีดจำกัดสูงสุด 150 V

ได้กล่าวไปแล้วว่าการป้อนโวลต์เตจให้ผลึกเพียโซนั้นจะป้อน 10-75V เท่านั้น แต่เลือกใช้ขีดจำกัดสูงสุดทั้ง 75V และ 150V ก็เพื่อเปรียบเทียบว่าขีดจำกัดแบบใดจะให้โวลต์เตจใกล้เคียงค่าที่ถูกต้องที่สุด ดังนั้นเมื่อป้อนโวลต์เตจแบบย้อนกลับ (reverse bias) ให้ผลึกเพียโซคือป้อนที่ 75V แล้วค่อยๆลดลงถึง 10 V โดยที่โวลต์เตจที่อุปกรณ์ให้มาจริงๆนั้นเกิน 75V

การวัดค่าก็สามารถทำได้เพราะขีดจำกัดนี้คือ 150 V

ดังนั้นกรณีป้อนโวลต์เตจย้อนกลับ (reverse bias) ให้แก่ผลึกเพียโซ จึงทำได้ที่ใช้ขีดจำกัด 150V เท่านั้น

3.3.3.2 ผลของแต่ละสแตปที่ใช้เลือนเพียโซอิเล็กทริก (reverse bias)

ตารางที่ 3.3 ผลการวัดค่าผลต่าง peak to peak เมื่อใช้ limit voltage 150 V (reverse bias)

Limited 150 V (reverse bias)				
Step		75-51 V	50-31 V	30-10 V
10 nm	ครั้งที่ 1	333.944 nm	251.803 nm	252.292 nm
	ครั้งที่ 2	337.366 nm	250.824 nm	266.959 nm
	ครั้งที่ 3	328.129 nm	249.825 nm	261.581 nm
	average	333.129 nm	250.825 nm	260.277 nm
	S.D/sqrt(n)	2.713	0.564	4.284
20 nm	ครั้งที่ 1	297.273 nm	243.001 nm	256.204 nm
	ครั้งที่ 2	299.718 nm	258.649 nm	243.98 nm
	ครั้งที่ 3	299.719 nm	237.625 nm	240.914 nm
	average	298.903 nm	246.425 nm	246.914 nm
	S.D/sqrt(n)	0.815	6.306	4.749
30 nm	ครั้งที่ 1	308.031 nm	276.738 nm	251.802 nm
	ครั้งที่ 2	310.964 nm	278.694 nm	250.824 nm
	ครั้งที่ 3	309.009 nm	280.161 nm	251.313 nm
	Average	309.335 nm	278.531 nm	251.313 nm
	S.D/sqrt(n)	0.862	0.991	0.282
40 nm	ครั้งที่ 1	297.274 nm	264.026 nm	223.934 nm
	ครั้งที่ 2	296.297 nm	258.159 nm	226.867 nm
	ครั้งที่ 3	301.186 nm	257.671 nm	224.422 nm
	average	298.252 nm	259.952 nm	225.074 nm
	S.D/sqrt(n)	1.494	2.0419	0.907
50 nm	ครั้งที่ 1	329.056 nm	277.717 nm	233.223 nm
	ครั้งที่ 2	329.544 nm	277.718 nm	231.268 nm
	ครั้งที่ 3	328.565 nm	277.715 nm	236.157 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Average	329.055 nm	277.717 nm	233.549 nm
S.D/sqrt(n)	0.283	0.0009	1.421

3.4 สรุปผลการสอบเทียบอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริกและสเตรนเกจ สำหรับขีดจำกัด สูงสุด 150 V

3.4.1 เมื่อพิจารณาว่าโวลต์เตจช่วงใด มีค่า peak to peak ใกล้เคียงค่าจริงที่สุด

จากตารางจะพบว่าทั้ง forward bias และ reverse bias นั้นแนวโน้มของค่า peak to peak เป็นไปในทางเดียวกัน สำหรับ forward bias คือ 10-30V และสำหรับ reverse bias คือ 75-51 V นั่นคือโวลต์เตจช่วงแรกๆที่ป้อนให้กับผลึกเพียโซ ดังนั้นระยะเวลาที่ป้อนโวลต์เตจให้กับผลึกเพียโซอาจมีผลคือการให้โวลต์เตจยิ่งนานอาจเกิด Error เพราะจากการทดลองจริงๆ หากสั่งให้ผลึกเลื่อนไป 10 nm ในความเป็นจริงแล้ว ไม่ใช่ทุกสเตปที่ผลึกเพียโซจะขยับไป 10 nm จริงๆ อาจมี 9nm บ้าง 8nm บ้าง ค่าที่ไม่ตรง 10 nm เมื่อเลื่อนไปนานๆ ตามโวลต์เตจที่ป้อนให้อาจทำให้ค่า peak to peak มีความถูกต้องน้อยลง นอกจากนี้ความร้อนจากการที่ป้อนโวลต์เตจนานๆอาจทำให้การความผิดพลาด ด้วยสาเหตุต่างๆเหล่านี้ จึงอาจเป็นเหตุผลทำให้ โวลต์เตจที่ป้อนช่วงแรกๆให้กับผลึกเพียโซจึงส่งผลให้ค่า peak to peak ที่ได้มีความถูกต้องมากกว่าโวลต์เตจช่วงอื่นๆ

3.4.2 เมื่อพิจารณาว่า step การเลื่อนผลึกเพียโซเท่าไร ที่จะทำให้ได้ค่า peak to peak ใกล้เคียงค่าจริงที่สุด

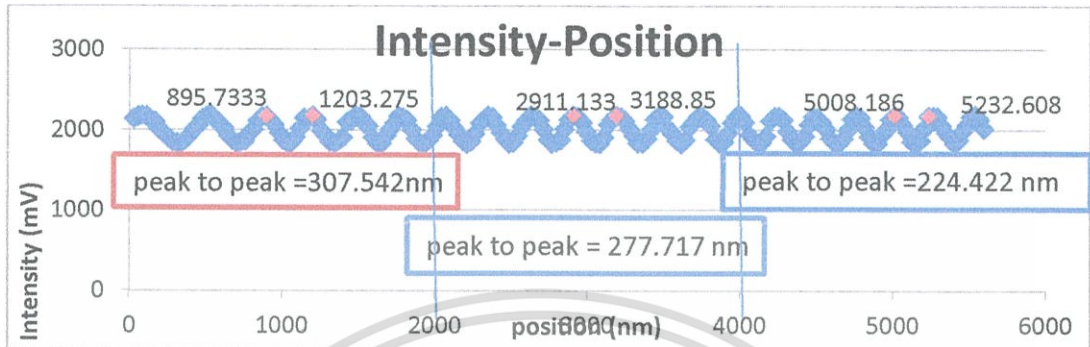
เมื่อพิจารณาค่า peak to peak ที่ใกล้เคียงค่าจริงที่สุดของแต่ละ step จะพบว่าได้ดังตาราง

ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบค่า peak to peak ที่แต่ละ step

	Forward bias	Reverse Bias
ค่า peak to peak ของแต่ละ step ที่มีค่าใกล้ค่าที่ถูกต้องมากที่สุด (316.4 nm)		
10 nm	294.666 nm	333.129 nm
20 nm	279.509 nm	298.903 nm
30 nm	308.193 nm	309.335 nm
40 nm	335.900 nm	298.252 nm
50 nm	279.672 nm	329.055 nm

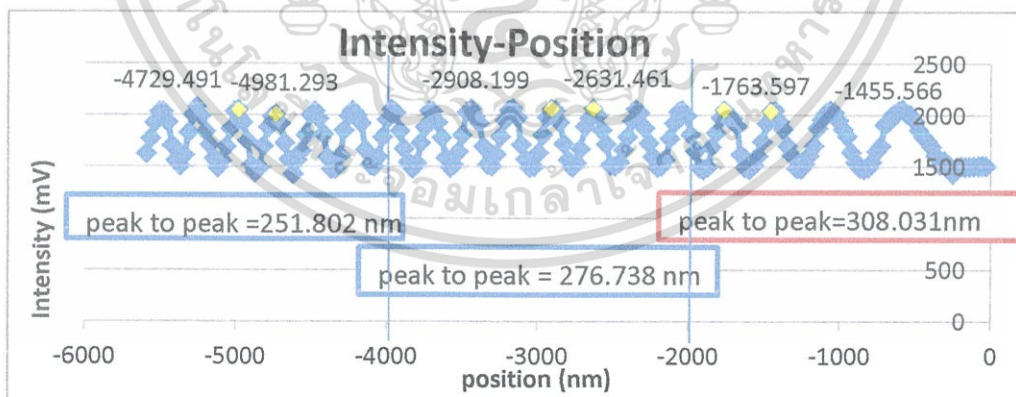
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางจะพบว่าที่ขีดจำกัดเดียวกันคือ 150V นั้น step การขยับผลึกเพียโซที่ 30 nm นั้นมีค่าใกล้เคียงค่าที่ถูกต้องมากที่สุด โดยค่าที่ถูกต้องคือ 316.4 nm ทั้งการให้โวลต์เตจแล้ว forward bias และ reverse bias ซึ่งช่วงโวลต์ที่ได้ค่าใกล้เคียงนั้นก็คือช่วงแรกที่ทำให้โวลต์เตจกับผลึก(10-30V)



รูปที่ 3.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง(mV)และระยะทาง(nm)ของการเลื่อนผลึกเพียโซครั้งที่ 1 ด้วยขีดจำกัดสูงสุด150V แบบ forward bias โดยใช้stepการขยับผลึกเพียโซคือ30 nm โดยที่ p2p = peak to peak ระหว่างยอดความสูงของกราฟที่เลือกมาพิจารณา

จากรูปที่ 3.30 peak to peak ของโวลต์เตจช่วงแรก (10-30V) = 307.542 nm , peak to peak ของโวลต์เตจช่วงกลาง (31-51V) = 277.717 nm และ peak to peak ของโวลต์เตจช่วงหลัง (51-75V) = 224.422



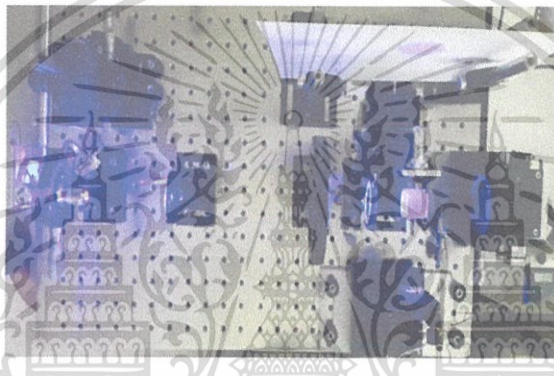
รูปที่ 3.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง(mV)และระยะทาง(nm)ของการเลื่อนผลึกเพียโซครั้งที่ 1 ด้วยขีดจำกัดสูงสุด150V แบบ reverse bias โดยใช้stepการขยับผลึกเพียโซคือ30 nm โดยที่ p2p = peak to peak ระหว่างยอดความสูงของกราฟที่เลือกมาพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.33 peak to peak ของโวลต์เตจช่วงแรก (75-51V) = 308.031nm , peak to peak ของโวลต์เตจช่วงกลาง (51-31V) = 276.738 nm และ peak to peak ของโวลต์เตจช่วงหลัง (30-10V) = 251.802 nm

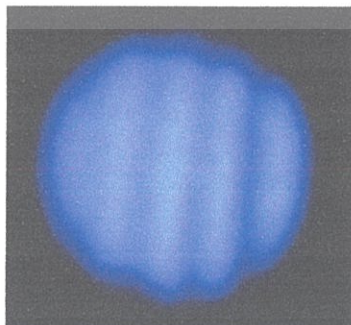
จากตารางและกราฟดังกล่าว พบว่ามีแนวโน้มไปในทางเดียวกันค่าที่โวลต์เตจช่วงเดียวกันก็จะได้ค่า peak to peak ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจะเลือก step 30 nm ในการสร้างภาพรีจิวการแทรกสอดเพื่อนำไปสร้างภาพโครงสร้างพื้นผิวของวัสดุ

3.5 ภาพรีจิวการแทรกสอดด้วยกระจกราบด้วย Blue LED



รูปที่ 3.32 การจัดระบบการแทรกสอดของแสง Blue LED ด้วยกระจกราบ

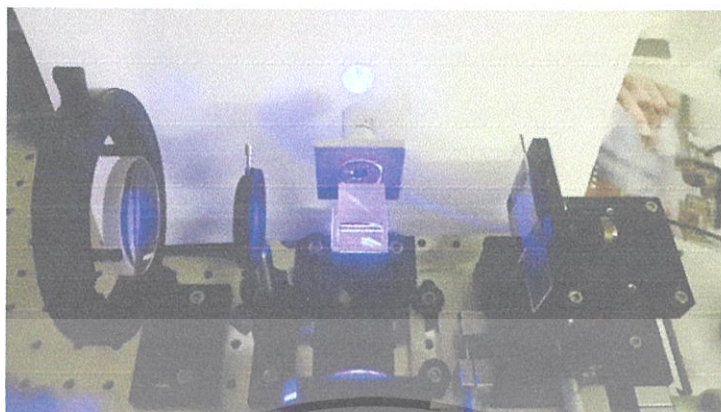
เมื่อจัดระบบของแสงด้วยกระจกราบแล้วทำการหมุนไมโครมิเตอร์เพื่อหาภาพรีจิวการแทรกสอด จากนั้นใช้ผลึกเพียโซในการเลื่อนกระจกโดยใช้ Step การเลื่อน 50 nm และ 100 nm จะทำให้ได้ภาพรีจิวการแทรกสอด โดยจะถ่ายภาพทั้งหมดเป็นจำนวน 84 ภาพ และ 61 ภาพ แล้วนำไปวิเคราะห์ภาพด้วย Vertical scanning Interferometry ในลำดับถัดไป ด้วยโหมดการถ่ายภาพที่แตกต่างกัน เพื่อพิจารณาว่าโหมดใดทำให้ได้ Surface Profile ที่ใกล้เคียงลักษณะของวัสดุที่นำมาทดสอบที่สุด



รูปที่ 3.33 ตัวอย่างรีจิวการแทรกสอดของแสง Blue LED ด้วยกระจกราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 ภาพรีจิวการแทรกสอดของแสงโดยกระจกที่เคลือบฟิล์มชั้นบันไดด้วย Blue LED



รูปที่ 3.34 การจัดระบบการแทรกสอดของ Blue LED ด้วยกระจกที่เคลือบฟิล์มชั้นบันได

เมื่อจัดระบบของแสงด้วยกระจกที่เคลือบฟิล์มบางแล้วทำการหมุนไมโครมิเตอร์เพื่อหาภาพรีจิวการแทรกสอดจากนั้นใช้ผลึกเพียโซในการเลื่อนกระจกโดยใช้ Step การเลื่อน 100 nm จะทำให้ได้ภาพรีจิวการแทรกสอด โดยจะถ่ายภาพทั้งหมดเป็นจำนวน 80 ภาพ แล้วนำไปวิเคราะห์ภาพด้วย Vertical scanning Interferometry ในลำดับถัดไป ด้วยโหมดการถ่ายภาพที่แตกต่างกันเพื่อพิจารณาว่าโหมดใดทำให้ได้ Surface Profile ที่ใกล้เคียงลักษณะของวัสดุที่นำมาทดสอบที่สุด



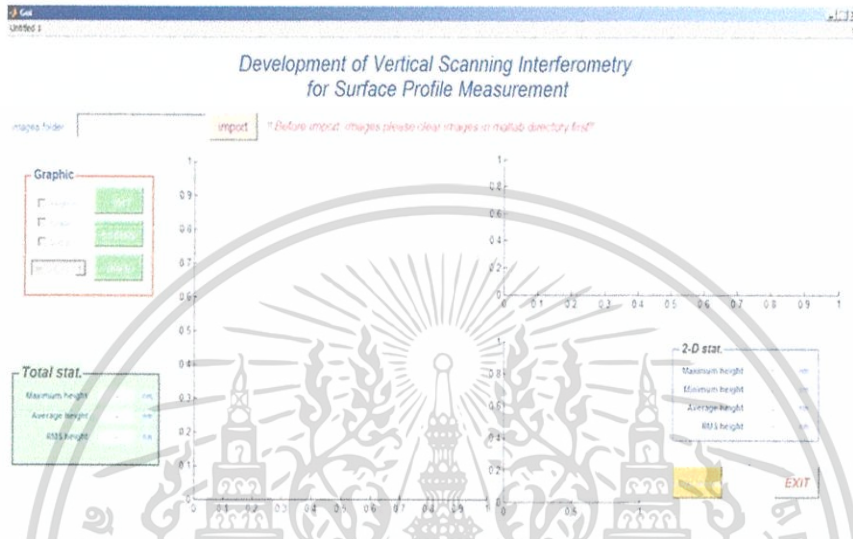
รูปที่ 3.35 ตัวอย่างรีจิวการแทรกสอดของแสง Blue LED ด้วยกระจกที่เคลือบฟิล์มชั้นบันได Step การเลื่อนคือ 100 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์ภาพรีจิสเทรชัน

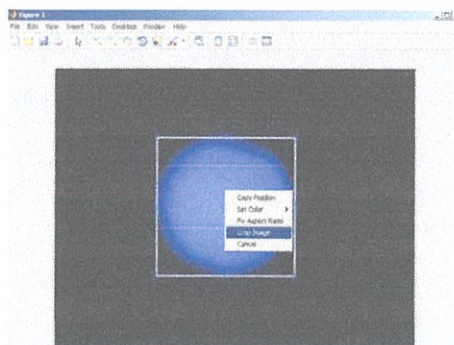


รูปที่ 4.1 หน้าต่างโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์ภาพรีจิสเทรชัน

หลังจากที่โปรแกรมประมวลผลเสร็จจะแสดงภาพ 3 มิติของผิววัสดุที่นำมาตรวจสอบรวมทั้งแสดงค่า maximum height, average eight, root mean square height, minimum height และสามารถดูภาพตัดขวางของกราฟได้

4.1.1 การตัดภาพรีจิสเทรชัน (Crop Image)

การตัดภาพรีจิสเทรชันก็เพื่อตัดเฉพาะในส่วนของรีจิสเทรชันที่จะนำมาวิเคราะห์ และเพื่อลดขนาดของภาพเพื่อให้การประมวลผลทำได้เร็วมากขึ้น



รูปที่ 4.2 หน้าต่างโปรแกรมที่ใช้ตัดภาพรีจิสเทรชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อตัดภาพรีจการแทรกสอดได้เฉพาะส่วนที่ต้องการแล้ว โดยการตัดภาพด้วยโปรแกรมนี้ จะเป็นการตัดภาพที่ตำแหน่งพิกเซลเดียวกันในทุกๆภาพที่เราถ่ายมา จะได้ว่าเมื่อนำภาพรีจการแทรกสอดที่ถ่ายได้มาเช่น 70 ภาพ เมื่อเข้าโปรแกรมตัดภาพนี้ จะได้ภาพรีจการแทรกสอดทั้งหมด 70 ภาพที่มีขนาดเท่ากัน เมื่อได้ภาพรีจการแทรกสอดที่ตัดภาพแล้ว จะนำภาพทั้งหมดนี้มาแปลงสี จากภาพสี (RGB) เป็นภาพเทา (Gray scale)

4.1.2 แปลงภาพสี (RGB) เป็นภาพเทา (Gray scale)

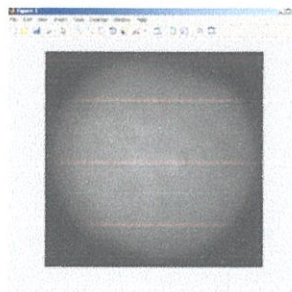
เนื่องจากว่าภาพรีจการแทรกสอดที่ได้เป็นแสงสีฟ้า คือเป็นภาพสี ซึ่งในภาพสีนั้นจะประกอบไปด้วย สีแดง สีฟ้า และสีเขียว แต่ละสีจะมีความเข้มมากหรือน้อยก็ขึ้นกับสีในภาพนั้นๆ ในแต่ละสีก็มีความเข้มตั้งแต่ 0-255 ซึ่งการที่เป็นภาพสีนั้นจะเป็นภาพที่เป็นแบบ 3 มิติ ทำให้การวิเคราะห์ภาพนั้นทำได้ซับซ้อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะแปลงภาพสีที่ได้เป็นภาพเทา ซึ่งภาพเทาจะเป็นภาพ 2 มิติ มีความเข้มตั้งแต่ 0-255 การที่เป็นภาพ 2 มิติจะทำให้การวิเคราะห์ภาพทำได้ง่ายกว่า



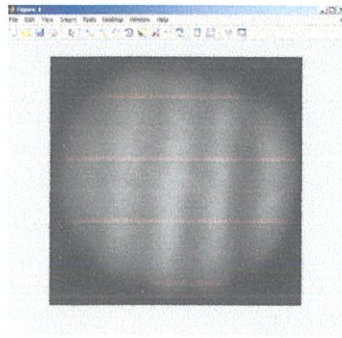
รูปที่ 4.3 ภาพรีจการแทรกสอดที่แปลงภาพสีเป็นภาพเทา

เมื่อวิเคราะห์ภาพจะนำภาพเทาไปวิเคราะห์ แต่เนื่องจากว่าแหล่งกำเนิดแสงนั้นมีความเข้มของแสงเป็นแบบเกาส์เซียน (Gaussian) ดังนั้นก่อนนำภาพรีจการแทรกสอดไปวิเคราะห์จะต้องนำค่าความเข้มที่ได้ไปลบกับค่าความเข้มของภาพที่ยังไม่เกิดรีจการแทรกสอด (Background)

4.1.3 การลบค่าความเข้มของรีจการแทรกสอดออกจากค่าความเข้มแสงเมื่อยังไม่เกิดภาพรีจการแทรกสอด (Background)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

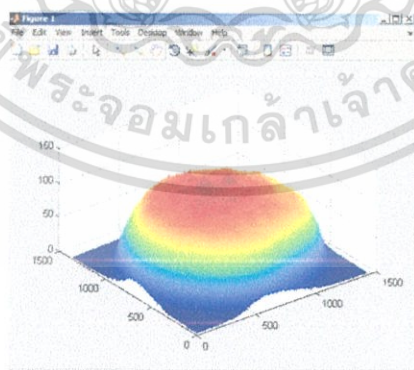


รูปที่ 4.5 ภาพ Gray scale ที่เกิดรี้วการแทรกสอด

โดยจะนำภาพ Gray scale ทั้งที่เกิดรี้วการแทรกสอดและยังไม่เกิดรี้วการแทรกสอดมาดูค่าความเข้มแสง เพื่อทำการลบค่าความเข้มแสง



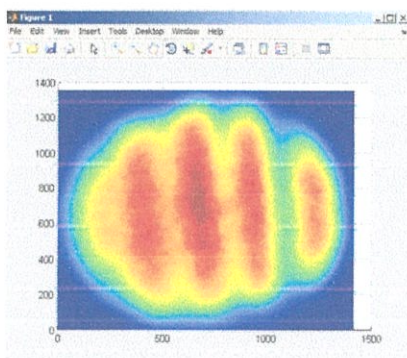
รูปที่ 4.6 ความเข้มแสงของภาพที่ยังไม่เกิดรี้วการแทรกสอด



รูปที่ 4.7 ความเข้มแสงของภาพที่ยังไม่เกิดรี้วการแทรกสอด

รูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงถึงค่าความเข้มของภาพที่ยังไม่เกิดรี้วการแทรกสอด จะเห็นได้ว่าความเข้มของแสงมีลักษณะเป็นเกาส์เซียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

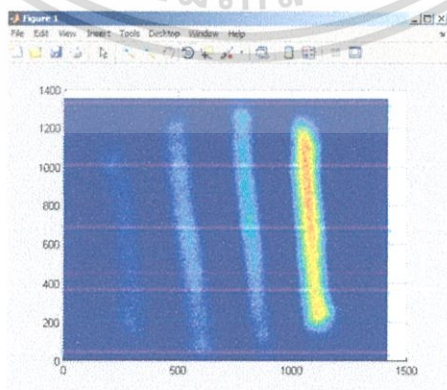


รูปที่ 4.8 ความเข้มแสงของภาพที่เกิดรีวิการแทรกสอด



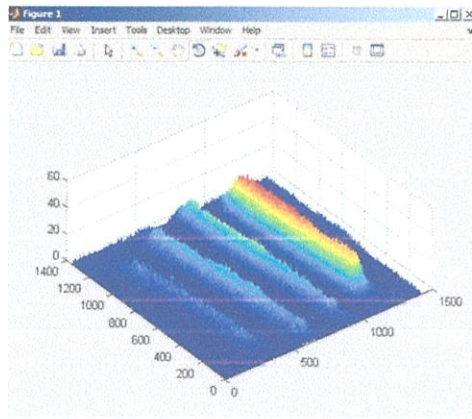
รูปที่ 4.9 ความเข้มแสงของภาพที่เกิดรีวิการแทรกสอด

เมื่อนำค่าความเข้มแสงของภาพที่เกิดรีวิการแทรกสอดและยังไม่เกิดรีวิการแทรกสอด (Background) มาลบกันจะได้ค่าความสูงของรีวิการแทรกสอดที่ได้ในแต่ละตำแหน่งที่เลื่อนไปจริงๆ



รูปที่ 4.10 ความเข้มแสงของภาพที่เกิดรีวิการแทรกสอดลบด้วยความเข้มแสง Background

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

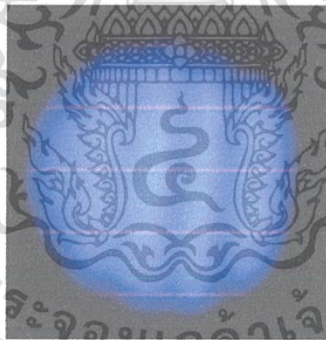


รูปที่ 4.11 ความเข้มแสงของภาพที่เกิดริ้วการแทรกสอดลบด้วยความเข้มแสง Background

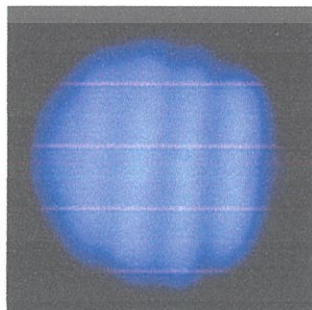
เมื่อทำการนำความเข้มแสงของภาพที่เกิดริ้วการแทรกสอดลบด้วยความเข้มแสง Background กับทุกๆภาพริ้วการแทรกสอดที่ถ่ายมา จากนั้นจะนำภาพที่ได้นี้มาวิเคราะห์ด้วย Vertical scanning Interferometry

4.1.4 ตัวอย่างภาพริ้วการแทรกสอด

4.1.4.1 ตัวอย่างภาพริ้วการแทรกสอดของกระจกกราบมาก

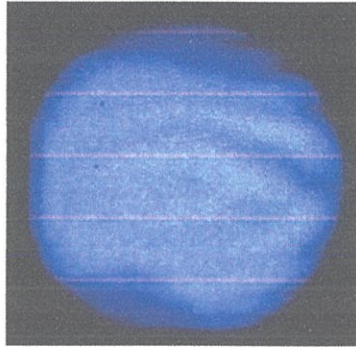


รูปที่ 4.12 ตัวอย่างภาพริ้วการแทรกสอดของกระจกกราบ

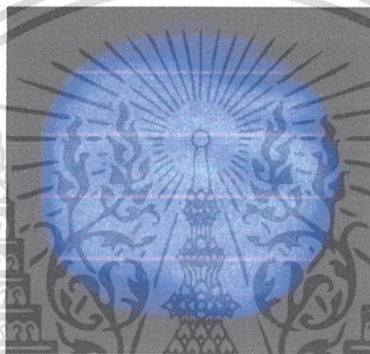


รูปที่ 4.13 ตัวอย่างภาพริ้วการแทรกสอดของกระจกกราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



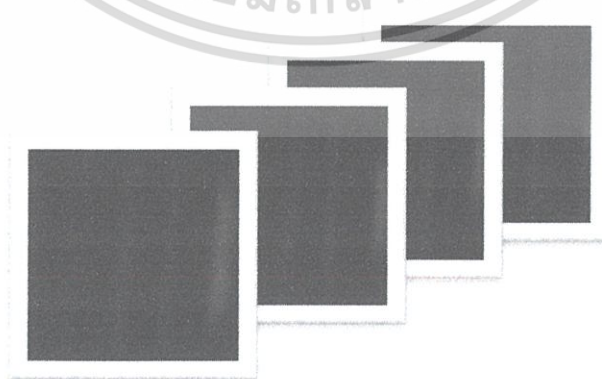
รูปที่ 4.14 ตัวอย่างภาพรีเวิร์กการแทรกสอดของกระจกเคลือบฟิล์มชั้นบันได step



รูปที่ 4.15 ตัวอย่างภาพรีเวิร์กการแทรกสอดของกระจกเคลือบฟิล์มชั้นบันได step

4.1.5 Concatenate gray image

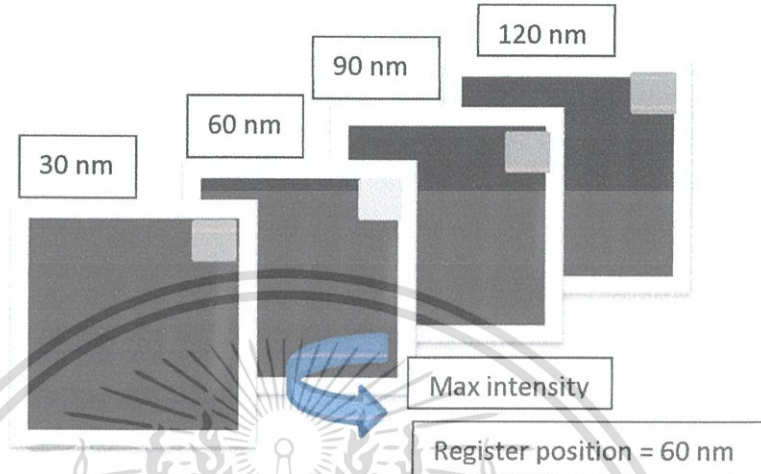
เป็นขั้นตอนการนำภาพรีเวิร์กการแทรกสอดที่จัดการลบ Background แล้ว มาวิเคราะห์แบบกวาดแนวตั้ง โดยนำภาพที่ได้ทั้งหมดนั้นมาซ้อนกัน จากนั้นจะทำการวิเคราะห์แบบแนวตั้งลงไป



รูปที่ 4.20 ตัวอย่างการซ้อนภาพรีเวิร์กการแทรกสอดที่ลบ Background แล้ว เพื่อวิเคราะห์แบบ Vertical scanning interferometry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์นั้นจะเก็บค่าตำแหน่งที่มีความเข้มสูงสุด ในทุกๆพิกเซลของภาพ แล้วจะเก็บค่าตำแหน่งนั้น มาใส่ใน map ใหม่ เพื่อเป็นภาพ 3 มิติ ที่แสดงตำแหน่งพิกเซล ความสูงของพิกเซล และลักษณะ พื้นผิวของวัสดุ

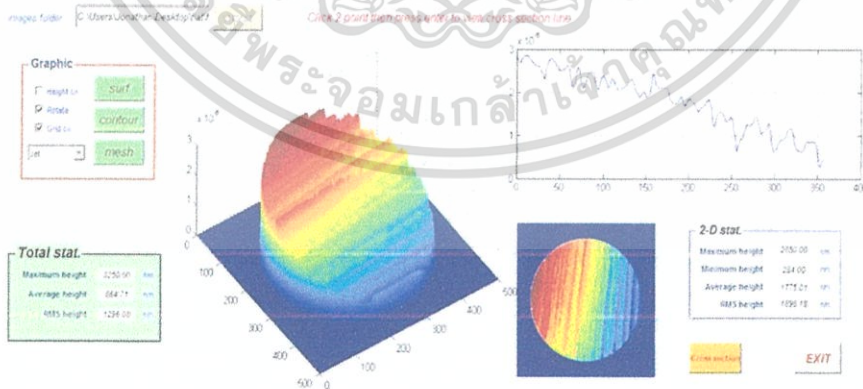


รูปที่ 4.21 ภาพจำลองการวิเคราะห์แบบ vertical scanning

4.1.7 Surface roughness profile

4.1.7.1 Surface roughness profile ของกระจกกราบ

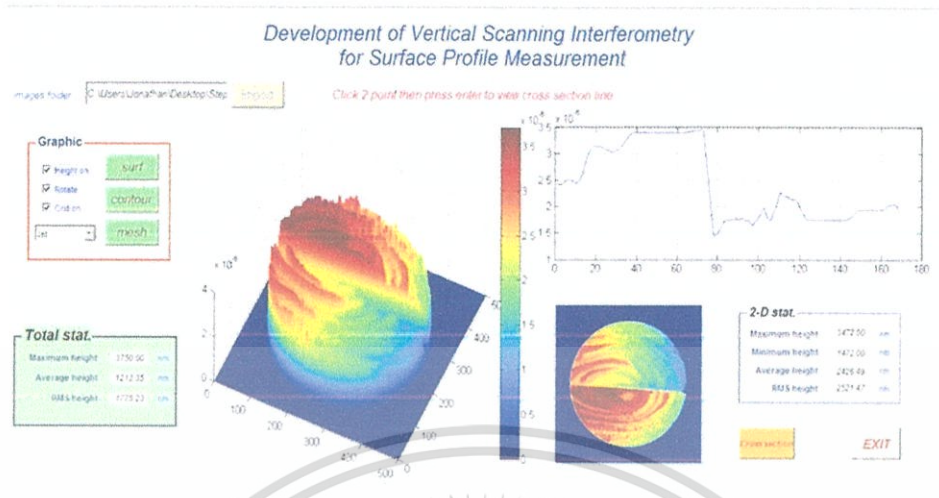
*Development of Vertical Scanning Interferometry
for Surface Profile Measurement*



รูปที่ 4.22 Surface roughness profile of flat mirror

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.7.2 Surface roughness profile ของกระจกที่เคลือบฟิล์มชั้นบนได้



รูปที่ 4.23 Surface roughness profile of step mirror ที่ Smooth แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้ ผู้ทดลองได้ทำการศึกษาการสร้างภาพโครงร่าง 3 มิติของวัสดุด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้หลักการแทรกสอดของแสง Michelson interferometry เมื่อกระจกทั้ง 2 ด้านของระบบการแทรกสอดมีระยะห่างจากตัวแยกแสงเท่ากันจะทำให้เกิดริ้วการแทรกสอดของแสงที่เข้มที่สุด ดังนั้นเมื่อมีกระจกอ้างอิง 1 ด้าน และอีกด้านหนึ่งเป็นกระจกที่เคลือบด้วยฟิล์มมาทำการทดสอบจะทำให้ได้ภาพริ้วการแทรกสอดที่สามารถนำไปวิเคราะห์เป็นรูปโครงร่าง 3 มิติได้ โดยจะใช้เฟียโซอิเล็กทริกในการขยับกระจก เพื่อให้ได้ภาพริ้วการแทรกสอดที่ตำแหน่งต่างๆ แล้วบันทึกภาพริ้วการแทรกสอดที่ตำแหน่งต่างๆนั้นไว้ ซึ่งการขยับเฟียโซอิเล็กทริกนั้นสามารถใช้โปรแกรมในการควบคุมโวลต์เตจสูงสุดที่ให้กับผลึกเฟียโซและ step ในการขยับผลึกเฟียโซไป จากการสอบเทียบอุปกรณ์พบว่า เมื่อใช้ขีดจำกัดสูงสุด 150 V และ step ในการขยับเป็น 30 nm นั้นจะทำให้ได้ค่าจากการสอบเทียบที่ใกล้เคียงค่าที่ถูกต้องมากที่สุด

การสร้างภาพริ้วการแทรกสอดจากกระจกราบด้วย step การเลื่อนผลึกเฟียโซ 50 nm และ 100 nm จำนวน 84 ภาพและ 61 ภาพตามลำดับ และการสร้างภาพริ้วการแทรกสอดจากกระจกที่เคลือบฟิล์มบางด้วย step การเลื่อนผลึกเฟียโซ 100 nm เป็นจำนวน 80 ภาพ จากนั้นจะนำภาพทั้งหมดมาวิเคราะห์โดย Vertical scanning interferometry ในการวิเคราะห์ภาพริ้วการแทรกสอดแบบกวาดแนวตั้ง คือพิจารณาความเข้มแสงสูงสุดใน 1 พิกเซลของทุกๆภาพ ว่าที่ตำแหน่งพิกเซลเดียวกันนี้ ที่ตำแหน่งใดมีความเข้มแสงสูงสุด แล้วทำการเก็บค่าตำแหน่งนั้นไว้ เมื่อพิจารณาแบบนี้ในทุกๆพิกเซลของภาพริ้วการแทรกสอดจะทำให้ได้ภาพโครงร่าง 3 มิติของพื้นผิวที่นำมาทดสอบคือเป็นรูปพื้นผิวระจกราบและรูปพื้นผิวของฟิล์มชั้นบนได้

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. การสอบเทียบเครื่องมือด้วยแหล่งกำเนิดแสงที่ต่างกันจะทำให้ได้ผลที่ได้แตกต่างกัน แต่เนื่องจากแหล่งกำเนิดที่ใช้คือ Blue LED นั้นมีความยาวโคฮีเรนที่สั้นจะทำให้เมื่อการสแกนข้อมูลเพื่อสอบเทียบนั้นได้จำนวนครั้งไม่มากนัก ทำให้ไม่สามารถสรุปผลได้ว่าการสอบเทียบด้วยเงื่อนไขใดดีที่สุด ซึ่งไม่ได้มีผลกับการคำนวณอยู่แล้ว แต่พิจารณาว่าเงื่อนไขใดใกล้เคียงค่าที่ถูกต้องมากที่สุด จึงเลือกใช้ HeNe Laser ในการสอบเทียบจะได้ข้อมูลการสแกนที่มาก จะสามารถสรุปผลเงื่อนไขที่ดีที่สุดได้

2. ส่วนโปรแกรมของการวิเคราะห์ภาพริ้วการแทรกสอด หากทำการจัดการภาพมากขึ้นจะส่งผลให้ภาพที่แสดงโครงร่าง 3 มิติ มีสัญญาณรบกวนน้อยลง และภาพที่ได้จะชัดมากขึ้นส่งผลให้ภาพจากการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงลักษณะของพื้นผิววัสดุจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชาญณรงค์ น้อยบางยาง และถาวร สุวรรณกิจ. 2552. “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกและประยุกต์ใช้งาน.” *วิทยาศาสตร์ประยุกต์*. 8(1) : 3,10.
- [2] วชิระ มีทอง,ผู้ช่วยศาสตราจารย์. n.d . [Online]. Available : <http://digital.lib.kmutt.ac.th/magazine/issue5/articles/article3.html>
- [3] W. Laopornpichayanuwat et al,3-D Surface roughness profile of 316-stainless steel using vertical scanning interferometry with a superluminescent diode. *Measurement* 45 (2012) 2400–2406.
- [4] Olszak A. Lateral scanning white-light interferometer. *Appl Opt* 2000; 39:3906–13
- [5] C.J. Tay, C. Quan, M. Li, Investigation of a dual-layer structure using vertical scanning interferometry, *Optics and Lasers in Engineering* 45 (2007) 907–913.
- [6] M.D. Duncan, M. Bashkansky, Subsurface defect detection in materials using optical coherence tomography, *Optics Express*.2 (13) (1998) 540–545.
- [7] P. Pavlek, Height profile measurement by means of white light interferometry, *Proceedings of the SPIE* 5259 (2003) 139–144.
- [8] R. Onodera, H. Wakaumi, Y. Ishii, Measurement technique for surface profiling in low-coherence interferometry, *Optics Communications* 254 (2005) 52–57.
- [9] D. Huang, E.A. Swanson, C.P. Lin, J.S. Shuman, W.G. Stington, W. Chang, M.R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C.A. Puliafito, J.G. Fujimoto, Optical coherence tomography, *Science* 254 (5035) (1991) 1178–1181

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีใช้งานโปรแกรม

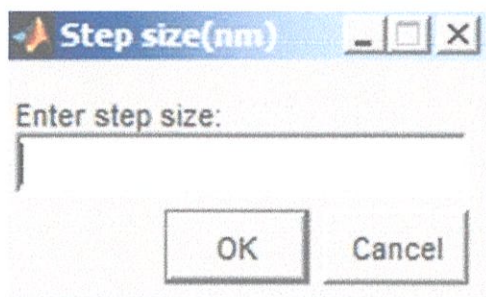
1. เปิดโปรแกรม Matlab แล้วพิมพ์คำว่า 'Gui' ที่หน้าต่าง command
2. โปรแกรมจะขึ้นข้อความเตือนให้ผู้ใช้ลบรูปภาพที่อยู่ใน matlab directory ทั้งหมดก่อน ให้เรากด OK



3. ใส่ที่อยู่ไฟล์เดอร์รูปภาพที่จะทำการวิเคราะห์ในช่อง images folder จากนั้นกดปุ่ม import

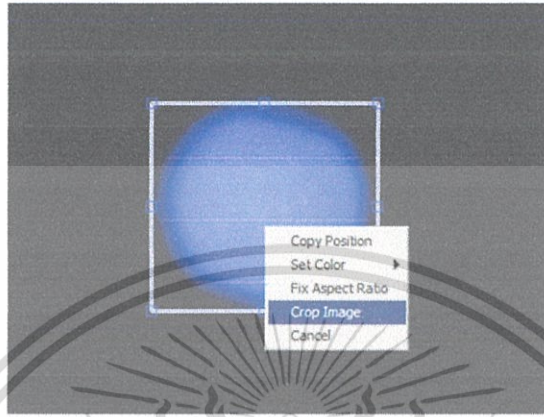


4. โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างขึ้นมาให้ผู้ใช้กรอกค่า step ที่ใช้การเลื่อนเพียร์โซ่แต่ละครั้ง ให้กรอก step แล้วกด ok

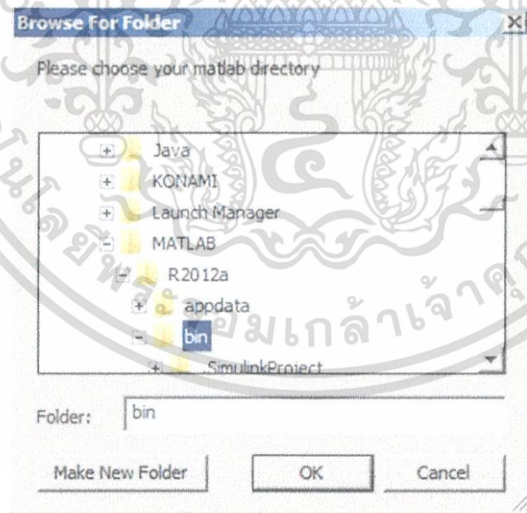


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. โปรแกรมจะแสดงภาพเพื่อให้ผู้ใช้ตัดภาพที่เหลือแค่ส่วนที่ต้องการจะวิเคราะห์ โดยคลิกและลากเมาส์ให้กรอบสี่เหลี่ยมครอบภาพที่ต้องการจะตัด จากนั้นคลิกขวาแล้วเลือกคำว่า 'Crop Image'

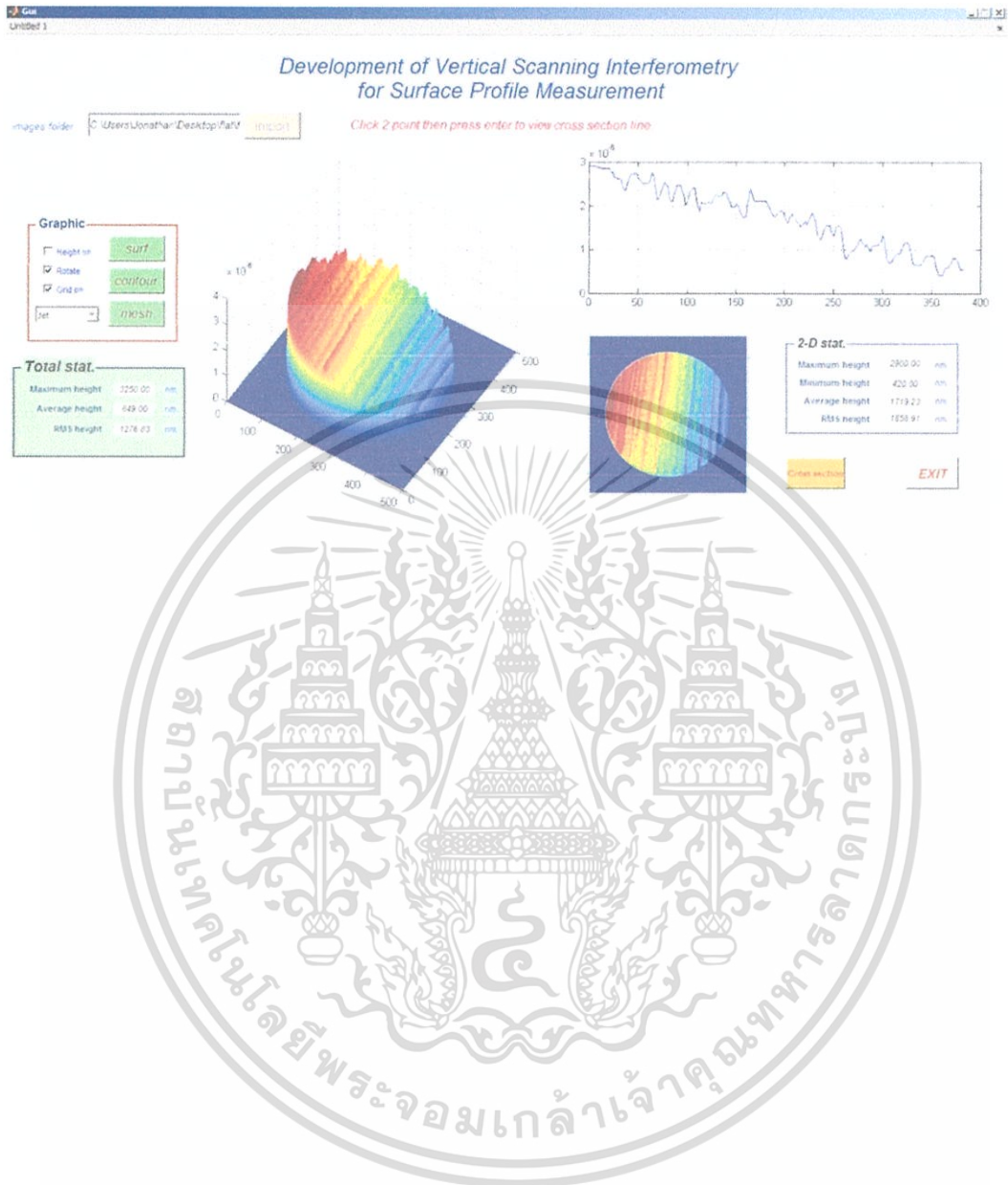


6. รอโปรแกรมประมวลผลภาพ
7. โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างที่ให้ผู้เลือกใช้ที่อยู่ของโปรแกรมแมทแลป (matlab directory) เมื่อเลือกแล้วกดที่ปุ่ม OK



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. โปรแกรมจะสร้างภาพโครงร่างพื้นผิวของวัสดุที่นำมาตรวจสอบรวมถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

```
function varargout = Gui(varargin)
% GUI MATLAB code for Gui.fig
%   GUI, by itself, creates a new GUI or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = GUI returns the handle to a new GUI or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   GUI('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in GUI.M with the given input arguments.
%
%   GUI('Property','Value',...) creates a new GUI or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before Gui_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to Gui_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Gui

% Last Modified by GUIDE v2.5 30-May-2015 21:00:40

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Gui_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Gui_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

```

```

% --- Executes just before Gui is made visible.
function Gui_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to Gui (see VARARGIN)

% Choose default command line output for Gui
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Gui wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

```

```

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Gui_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

clear all

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
warndlg('!! Before import images please clear images in matlab directory first!!','!! Warning !!','modal')
```

```
% --- Executes on button press in push_import.
```

```
function push_import_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject handle to push_import (see GCBO)
```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
x = get(handles.edit_folder,'String'); %edit1 being Tag of ur edit box
```

```
if isempty(x)
```

```
    errordlg('Please enter your folder first.','File Error');
```

```
    beep
```

```
    return
```

```
else
```

```
    filenames = dir(fullfile(get(handles.edit_folder,'String'), '*.jpg'));
```

```
    numfiles = length(filenames);
```

```
end
```

```
if numfiles == 0
```

```
    errordlg('File not found: Try to change your folder.','File Error');
```

```
    beep
```

```
    return
```

```
end
```

```
set(handles.push_import,'enable','off');
```

```
set(handles.push_exit,'enable','off');
```

```
% waiting text
```

```
set(handles.text11, 'String','Loading...');
```

```
set(handles.text_warning, 'String','');
```

```
pause(1)
```

```
%Step
```

```
STEP = inputdlg({'Enter step size:','Step size(nm)');
```

```
step = str2num(STEP{1});
```

```
STR = sprintf('Surface height');
```

```
pause(2)
```

```
%crop images
```

```
Full_name = fullfile(get(handles.edit_folder,'String'), filenames(1).name);
```

```
set(handles.text11, 'String','Please crop your image');
```

```
imfirst = imread(Full_name);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

axes(handles.axes1);
[F rect] = imcrop(imfirst);
GRY = rgb2gray(F);
K = medfilt2(GRY,[4 4]);
RG = imresize(K,[500,500]);
set(handles.text11, 'String','Computing Data Please Wait');
pause(1)

% computing
for n = 2:numfiles
% specify images names with full path and extension
full_name = fullfile(get(handles.edit_folder,'String'), filenames(n).name);
images = imread(full_name); % Read images
crop = imcrop(images,rect); % crop images
Gray = rgb2gray(crop); % convert rgb to gray scale
J = medfilt2(Gray,[4 4]);
resize = imresize(J,[500,500]); % resize images
gray = RG - resize;
Max = max(gray);
gray(gray<min(Max)) = 0;
imwrite(gray,['G,num2str(n),.jpg']); % write images
end
imagefolder = uigetdir('C:\','Please choose your matlab directory');
%imagefolder = 'C:\Program Files\MATLAB\R2012a\bin';

% read all images
filename = dir(fullfile(imagefolder, '*.jpg'));

% count total number of photos present in that folder
numfile = length(filename);
for m = 2:numfile
full_name = fullfile(imagefolder, filename(m).name); % it will specify images
names with full path and extension
image{m} = imread(full_name); % Read images
end

```

```
% cat
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

[r,c] = size(image{m});
imagescat = cat(3, image{:});
new = zeros(r,c);
for R = 1:r;
    for C = 1:c;
        Cat = imagescat(R,C,:);
        [Val position] = max(Cat);
        POSITION = position*(step*10.^(-9)); %แต่ละภาพมีstepห่างกัน 50nm
        new(R,C) = POSITION;
    end
end
handles.new = new;
%imagescat = cat(3, image{:});
%[max_val, position] = max(imagescat, [], 3);
%handles.position = position;
%%%%%%%%%%circle crop%%%%%%%%%%circle crop%%%%%%%%%%circle
crop%%%%%%%%%%circle crop%%
imageSize = size(new);
ci = [250, 250, 200];
[xx,yy] = ndgrid((1:imageSize(1))-ci(1),(1:imageSize(2))-ci(2));
mask = double((xx.^2 + yy.^2)<ci(3)^2);
croppedImage = double(zeros(size(new)));
croppedImage = new.*mask;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
handles.croppedImage = croppedImage;
New = zeros(r,c);
for R = 1:r;
    New(R,:) = smooth(croppedImage(R,:),'moving');
end

New2 = zeros(r,c);
for C = 1:c;
    New2(:,C) = smooth(New(:,C),'moving');
end
handles.New2 = New2;
handles.h = surf(handles.New2);
set(handles.h, 'edgecolor','none');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

grid off
shading interp
%title('Surface Profile');
%xlabel('Pixel x');
%ylabel('Pixel y');
%zlabel(STR);
M = (max(max(handles.croppedImage(:)))));

```

```

% mean&rms
total = 0;
[r,c] = size(New2);
for i=1:size(New2,1)
    for j=1:size(New2,2)
        total = total + New2(i,j);
    end
end

```

```

Position = (New2.^2);
Total = 0;
for i=1:size(Position,1)
    for j=1:size(Position,2)
        Total = Total + Position(i,j);
    end
end
RMS = (sqrt(Total./(r.*c)));
mean = (total/(r.*c));

```

```

% max text
text = sprintf('%0.2f', M*10.^9);
set(handles.max2_text, 'String', text);

```

```

% rms text
text1 = sprintf('%0.2f', RMS*10.^9);
set(handles.rms2_text, 'String', text1);

```

```

% mean text
text2 = sprintf('%0.2f', mean*10.^9);
set(handles.avg2_text, 'String', text2);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% end text
set(handles.text11, 'String','Done');
pause(1)
set(handles.text11, 'String','');
guidata(hObject, handles);

% enable progame
set(handles.push_surf,'enable','on');
set(handles.push_contour,'enable','on');
set(handles.push_mesh,'enable','on');
set(handles.check_grid,'enable','on');
set(handles.check_rotate,'enable','on');
set(handles.check_color,'enable','on');
set(handles.colormap_popup,'enable','on');
set(handles.push_2d,'enable','on');
set(handles.push_exit,'enable','on');
function edit_folder_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit_folder (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit_folder as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit_folder as a double
get(hObject,'String');

%--- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit_folder_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit_folder (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

end

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function images_folder_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to images_folder (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% --- Executes on button press in push_exit.
function push_exit_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to push_exit (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
close(ancestor(hObject,'figure'));
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function max2_text_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to max2_text (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% --- Executes on button press in push_surf.
function push_surf_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to push_surf (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
set(handles.text11, 'String','Please wait...');
set(handles.text_warning, 'String','');
axes(handles.axes1);
surf(handles.New2);
shading interp
if handles.check_grid == 1;
    grid on
else
    grid off
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if handles.check_color == 1;
    colorbar
else
    colorbar off
end
if handles.rotate == 1;
    rotate3d on
else
    rotate3d off
end
guidata(hObject, handles);
pause(0.25)
set(handles.text11, 'String,');

```

```

% --- Executes on button press in push_contour.
function push_contour_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to push_contour (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
set(handles.text11, 'String','Please wait...');
set(handles.text_warning, 'String,');
axes(handles.axes1);
contour(handles.New2);
if handles.check_grid == 1;
    grid on
else
    grid off
end
if handles.check_color == 1;
    colorbar
else
    colorbar off
end
if handles.rotate == 1;
    rotate3d on
else
    rotate3d off
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
guidata(hObject, handles);
pause(0.25)
set(handles.text11, 'String');
```

```
% --- Executes on button press in push_mesh.
function push_mesh_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to push_mesh (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
set(handles.text11, 'String','Please wait...');
set(handles.text_warning, 'String','');
axes(handles.axes1);
mesh(handles.New2);
if handles.check_grid == 1;
    grid on
else
    grid off
end
if handles.check_color == 1;
    colorbar
else
    colorbar off
end
if handles.rotate == 1;
    rotate3d on
else
    rotate3d off
end
guidata(hObject, handles);
pause(0.25)
set(handles.text11, 'String');
```

% --- Executes on button press in check_grid.
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
function check_grid_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to check_grid (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of check_grid
```

```
axes(handles.axes1);
check_grid = get(hObject,'Value');
if check_grid == 1;
```

```
    grid on
```

```
else
```

```
    grid off
```

```
end
```

```
handles.check_grid = get(hObject,'Value');
guidata(hObject, handles);
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function text11_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject    handle to text11 (see GCBO)
```

```
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function axes1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject    handle to axes1 (see GCBO)
```

```
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes1
```

```
handles.output = hObject;
```

```
% Update handles structure
```

```
guidata(hObject, handles);
```

```
% --- Executes on button press in check_rotate.
```

```
function check_rotate_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
% hObject handle to check_rotate (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of check_rotate
axes(handles.axes1);
rotate = get(hObject,'Value');
if rotate == 1;
    rotate3d on
else
    rotate3d off
end
handles.rotate = rotate;
guidata(hObject, handles);
```

```
% --- Executes on button press in check_color.
function check_color_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to check_color (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of check_color
axes(handles.axes1);
color = get(hObject,'Value');
if color == 1;
    colorbar
else
    colorbar off
end
handles.check_color = color;
guidata(hObject, handles);
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function avg2_text_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to avg2_text (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function rms2_text_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to rms2_text (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% --- Executes on button press in check_edge.
function check_edge_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to check_edge (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of check_edge

```

```

% --- Executes on selection change in colormap_popup.
function colormap_popup_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to colormap_popup (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns colormap_popup contents as
cell array

```

```

%     contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from colormap_popup
contents = get(hObject,'value');

```

```

switch contents

```

```

    case 1

```

```

        a = colormap('Jet');

```

```

    case 2

```

```

        a = colormap('HSV');

```

```

    case 3

```

```

        a = colormap('Hot');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
case 4
    a = colormap('Cool');
```

```
case 5
    a = colormap('Spring');
```

```
case 6
    a = colormap('Summer');
```

```
case 7
    a = colormap('Autumn');
```

```
case 8
    a = colormap('Winter');
```

```
case 9
    a = colormap('Gray');
```

```
case 10
    a = colormap('Bone');
```

```
case 11
    a = colormap('Copper');
```

```
case 12
    a = colormap('Pink');
```

```
case 13
    a = colormap('Lines');
```

```
otherwise
```

```
end
```

```
guidata(hObject, handles);
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function colormap_popup_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject handle to colormap_popup (see GCBO)
```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
```

```
% See ISPC and COMPUTER.
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
```

```
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
```

```
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

```
end
```

```
% --- Executes when user attempts to close figure1.
```

```
function figure1_CloseRequestFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject handle to figure1 (see GCBO)
```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
% Hint: delete(hObject) closes the figure
```

```
answer = questdlg('Do you want to exit?','Exit','yes','no','no');
```

```
switch answer
```

```
    case 'yes'
```

```
        delete(hObject);
```

```
    case 'no'
```

```
    otherwise
```

```
end
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function text_warning_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject handle to text_warning (see GCBO)
```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% --- Executes on button press in push_2d.
```

```
function push_2d_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject handle to push_2d (see GCBO)
```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```
Text4 = sprintf('%0.2f', RMS*10.^9);  
set(handles.text27, 'String', Text4);
```

```
guidata(hObject, handles);
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function axes5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject    handle to axes5 (see GCBO)
```

```
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes5
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function axes6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject    handle to axes6 (see GCBO)
```

```
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes6
```

```
% --- Executes on key press with focus on push_import and none of its controls.
```

```
function push_import_KeyPressFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject    handle to push_import (see GCBO)
```

```
% eventdata  structure with the following fields (see UICONTROL)
```

```
% Key: name of the key that was pressed, in lower case
```

```
% Character: character interpretation of the key(s) that was pressed
```

```
% Modifier: name(s) of the modifier key(s) (i.e., control, shift) pressed
```

```
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function text24_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject    handle to text24 (see GCBO)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function text25_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject handle to text25 (see GCBO)
```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function text26_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject handle to text26 (see GCBO)
```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function text27_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้