

การพัฒนาต้นแบบไมโครอิลลิปโซมิเตอร์ที่ใช้อินเตอร์เฟอโรเมทรีแบบเลื่อน
โพลาไรเซชันสำหรับการหาคุณสมบัติทางแสงของวัสดุ

DEVELOPMENT OF MICRO-ELLIPSOMETRY PROTOTYPE BASED ON
POLARIZATION SHIFTING INTERFEROMETRY FOR THE DETERMINATION
OF MATERIAL OPTICAL PROPERTIES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-D-018-114

การพัฒนาต้นแบบไมโครอิลลิปโซมิเตอร์ที่ใช้อินเตอร์เฟอโรเมทรีแบบเลื่อน
โพลาไรเซชันสำหรับการหาคุณสมบัติทางแสงของวัสดุ

DEVELOPMENT OF MICRO-ELLIPSOmetry PROTOTYPE BASED ON
POLARIZATION SHIFTING INTERFEROMETRY FOR THE DETERMINATION
OF MATERIAL OPTICAL PROPERTIES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-D-018-114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF MICRO-ELLIPSOmetry PROTOTYPE BASED ON
POLARIZATION SHIFTING INTERFEROMETRY FOR THE DETERMINATION
OF MATERIAL OPTICAL PROPERTIES



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019

KMITL-2019-EN-D-018-114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาต้นแบบไมโครอิลิปโซมิเตอร์ที่ใช้อินเทอร์เฟอโรเมทรีแบบเลื่อนโพลาริเซชันสำหรับการหาคุณสมบัติทางแสงของวัสดุ
นักศึกษา	นายวีระยุทธ คุณรัตนสิริ
รหัสประจำตัว	56601018
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ศิริเดช บุญแสง

บทคัดย่อ

ในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ ตัวชี้วัดคุณภาพการผลิตที่สำคัญตัวหนึ่งคือ ระยะเวลาสูงการบิของหัวอ่าน ซึ่งต้องอยู่ในระดับที่เหมาะสมกับความเร็วรอบฮาร์ดดิสก์และประเภทของหัวอ่าน ปัจจุบันเครื่อง KLA Tencor D6 สามารถนำมาใช้วัดค่าระยะเวลาสูงการบิของหัวอ่าน เครื่องมือวัดชนิดนี้จำเป็นต้องกำหนดคุณสมบัติการสะท้อนแสงของวัสดุในรูปของดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน (Complex Refractive Index) ซึ่งต้องอาศัยเครื่องอิลิปโซมิเตอร์ในการวัดค่าดัชนีดังกล่าว จากข้อจำกัดของเครื่องอิลิปโซมิเตอร์ การวัดค่าระยะเวลาสูงการบิของหัวอ่านแบบเดิมจึงไม่สามารถแสดงค่าผลลัพธ์ได้อย่างถูกต้อง แต่ผลลัพธ์นั้นได้ถูกคำนวณจากค่าเฉลี่ยของดัชนีการหักเหที่ซับซ้อนจากกลุ่มตัวอย่างที่วัดด้วยเครื่องอิลิปโซมิเตอร์ โดยหัวอ่านที่เราต้องการวัดค่าคุณสมบัติทางแสงนี้จะต้องถูกนำมาตัดโครงสร้างของ HGA ให้เรียบ เพื่อให้สามารถนำไปใส่ในเครื่องอิลิปโซมิเตอร์ได้ ดังนั้นการวัดด้วยวิธีเดิมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการสะท้อนแสง และโครงสร้างของ HGA จึงไม่สามารถนำ HGA ที่วัดแล้วไปใช้ทดสอบในงานอื่น ๆ ได้ และที่สำคัญยังส่งผลให้การวัดค่าระยะเวลาสูงการบิของหัวอ่านเกิดความผิดพลาด เนื่องจากผลลัพธ์ไม่ได้เป็นค่าที่แท้จริงของหัวอ่านที่กำลังทำงานอยู่ในขณะนั้น

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการใหม่ในการวัดค่าคุณสมบัติการสะท้อนแสงของวัสดุ โดยใช้การประมวลผลภาพทางแสงจากการอ่านภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์ (Back Focal Plane) ด้วยเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์ร่วมกับอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ทำงานโดยใช้หลักการโพลาไรเซชันทางแสงเพื่อหาค่าความต่างเฟสของแสง โครงสร้างของไมโครอิลิปโซมิเตอร์มีอุปกรณ์สำคัญ คือ เลนส์ใกล้วัตถุซึ่งมีค่ารูปรรับแสงกว้าง (High NA Objective Lens) โดยอุปกรณ์นี้ทำหน้าที่รับแสงที่ตกกระทบและสะท้อนกลับมาที่เลนส์ใกล้วัตถุได้หลายมุมตกกระทบจากคุณสมบัติการรับแสงของเลนส์ใกล้วัตถุ ซึ่งแตกต่างจากการใช้อิลิปโซมิเตอร์ทั่วไปที่สามารถวัดได้ครั้งละหนึ่งมุมตกกระทบเท่านั้น โดยหลังจากที่ได้ค่าคุณสมบัติทางแสงของวัสดุแล้ว ระบบจะทำการส่งข้อมูลไปให้กับผู้เกี่ยวข้อง และเครื่องวัดค่าระยะเวลาสูงการบิของหัวอ่านต่อไป

Thesis	DEVELOPMENT OF MICRO-ELLIPSOMETRY PROTOTYPE BASED ON POLARIZATION SHIFTING INTERFEROMETRY FOR THE DETERMINATION OF MATERIAL OPTICAL PROPERTIES
Student	Mr.Weerayuth Khunrattanasiri
Student ID.	56601018
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Siridech Boonsang

ABSTRACT

In hard disk manufacturing process, one of the important indicators for production quality is the flying height of HDD header that must be well adjusted regarding the rotation speed and the type of the HDD header. Recently, the KLA Tencor D6 has been used to measure the flying height of HDD header. This instrument requires the reflective property in term of the complex refractive index measured by conventional ellipsometers. Due to the limitation of the the ellipsometer, previously proposed techniques for measuring the flying height cannot provide the accurate results for the working HDD header, yet the results have been obtained from the average of the complex refractive indices of a sample of the HDD headers tested by the ellipsometer. In particular, each HGA structure under test must be modified before being inserted into the ellipsometer. As a result, the reflecting properties and HGA structures are distorted, and the measured HGA cannot be reused in other applications. Importantly, the results of flying height of the HDD header are not the actual values for the HDD headers during operation.

This research study proposes a novel technique to measure the refractive properties of materials using the optical image processing of the back focal plane image, which is resulted from a micro-ellipsometer based on a polarization and phase-shifting interferometer. The structure of the micro-ellipsometer consists of high NA objective lens performing light reflection. Unlike conventional ellipsometers, the reflective light from the micro-ellipsometer can be at different incident angles. Finally, the optical properties obtained from our proposed technique can be further used by related processes and flying height measurement.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ศิริเดช บุญแสง ที่ให้แนวคิดในการทำวิจัย ความช่วยเหลือ ตลอดจนคำชี้แนะ และร่วมกันแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างที่ทำการศึกษา นอกจากนี้ยังให้ประการณ์ที่ดีในการทำวิจัยร่วมกับภาคอุตสาหกรรมแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะต่าง ๆ เพื่อแก้ไขและปรับปรุงจนเป็นวิทยานิพนธ์สมบูรณ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และงานบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในเรื่องต่าง ๆ นอกจากนี้ยังต้องขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สันต์ ชวงศ์อินทร์ คณาจารย์ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ทุกคนในห้องปฏิบัติการหุ่นยนต์อุตสาหกรรมและปัญญาประดิษฐ์ (Industrial Robot and AI Laboratory) ของวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง ที่ให้ความช่วยเหลือด้านซอฟต์แวร์และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย ตลอดจนกำลังใจในการทำวิจัยที่ดีตลอดมา เหนือสิ่งอื่นใดต้องขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วรินทร์ สุตคณิง ที่ช่วยปรับแก้ไขบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ และคณาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้กำลังใจและช่วยเหลือในระหว่างช่วงสอบ และจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์ท้ายที่สุดนี้คงลืมนไม่ได้ที่จะขอบคุณภรรยา และลูก ๆ ทุกคนที่ช่วยเป็นกำลังใจ ในระหว่างเรียนและจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่านทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

วีระยุทธ คุณรัตนสิริ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	II
ABSTRACT.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับโพลาริเซชันทางแสง.....	4
2.1.1 โพลาริเซชันโดยการดูดกลืน [1].....	4
2.1.2 โพลาริเซชันโดยการสะท้อน [1].....	5
2.1.3 โพลาริเซชันโดยการหักเหเชิงซ้อน [1].....	5
2.1.4 โพลาริเซชันโดยการกระเจิง [1].....	6
2.2 เมทริกซ์โจนส์.....	6
2.2.1 เวกเตอร์โจนส์ (Jones Vector).....	7
2.2.2 เมทริกซ์โจนส์สำหรับอุปกรณ์โพลาริเซอร์, รีทาร์เตอร์, โรเตเตอร์.....	9
2.3 ความสำคัญของการหาความสูงการบินของหัวอ่านโดยใช้ไมโครอิลิปโซมิเตอร์.....	14
2.4 โปรโตคอลเอ็มคิวทีที.....	17
2.4.1 การทำงานแบบ Publish-Subscribe.....	18
2.4.2 คุณภาพของการให้บริการ (Quality of Service : QoS).....	19
2.4.3 การประเมินประสิทธิภาพโดยใช้ค่ารเวดท์ทริปทาม (Round Trip Time).....	20
2.5 วรรณกรรม หรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review).....	21
2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไมโครอิลิปโซมิเตอร์.....	21
2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความสูงการบินของหัวอ่าน.....	33
2.5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการรับส่งข้อมูลผ่านโปรโตคอลเอ็มคิวทีที.....	37
บทที่ 3 แบบจำลองไมโครอิลิปโซมิเตอร์.....	42
3.1 แบบจำลองภาพการสะท้อนแสงของไมโครอิลิปโซมิเตอร์.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การจำลองภาพความเข้มแสงจากค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน	43
3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของไมโครอิลิปโซมิเตอร์ที่ใช้อินเตอร์เฟอโรเมทรีแบบเลื่อนโพลาไรเซชัน.....	45
บทที่ 4 ไมโครอิลิปโซมิเตอร์ที่ใช้อินเตอร์เฟอโรเมทรีแบบเลื่อนโพลาไรเซชัน.....	51
4.1 ไมโครอิลิปโซมิเตอร์ที่ใช้อินเตอร์เฟอโรเมทรีแบบเลื่อนโพลาไรเซชัน แบบที่ 1	51
4.2 ไมโครอิลิปโซมิเตอร์ที่ใช้อินเตอร์เฟอโรเมทรีแบบเลื่อนโพลาไรเซชัน แบบที่ 2.....	52
4.3 ขั้นตอนและกระบวนการของไมโครอิลิปโซมิเตอร์	55
4.4 ผลการทดสอบหาค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน	62
บทที่ 5 การรับส่งค่าคุณสมบัติทางแสงแผ่นโปรโตคอลเอ็มคิวทีที	65
5.1 การรับส่งค่า n, k จากเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์ผ่านโปรโตคอลเอ็มคิวทีที.....	65
5.2 ผลการทดลองการรับส่งข้อมูลผ่านโปรโตคอลเอ็มคิวทีที	68
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	70
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	70
6.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข	71
6.3 ข้อเสนอแนะในการทำงานวิจัย	71
ภาคผนวก.....	74

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2- 1 ตารางสรุปเวกเตอร์โจนส์พื้นฐานแบบต่าง ๆ.....	9
ตารางที่ 2- 2 ผลการเปรียบเทียบภาพความเข้มแสงทางทฤษฎีเทียบกับทางปฏิบัติ [3].....	26
ตารางที่ 2- 3 การจัดแบ่งหัวเรื่องต่าง ๆ ของ MQTT-Topic สำหรับเมืองอัจฉริยะ [13].....	38
ตารางที่ 2- 4 การเปรียบเทียบข้อมูลในการรับส่งข้อมูลของโปรโตคอลชนิดต่าง ๆ [16].....	41
ตารางที่ 3- 1 ภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับการทดลอง.....	44
ตารางที่ 3- 2 ค่าการสะท้อนแสงที่ได้จากเลนส์ใกล้วัตถุ	48
ตารางที่ 3- 3 การกระจายเทอมของการสะท้อนแสงที่เป็นได้ที่เกิดขึ้นในเลนส์ใกล้วัตถุ	48
ตารางที่ 3- 4 การจัดกลุ่มและแยกเทอมของมุมตกกระทบของแสง	49
ตารางที่ 4- 1 ค่า n , k ที่อ้างอิงเทียบกับค่าที่วัดได้	64



สารบัญญรูป

	หน้า
รูปที่ 2- 1 โพลาริเซชันโดยการดุดกลืน	4
รูปที่ 2- 2 โพลาริเซชันโดยการสะท้อน	5
รูปที่ 2- 3 โพลาริเซชันโดยการหักเหเชิงซ้อน	5
รูปที่ 2- 4 โพลาริเซชันโดยการกระเจิง.....	6
รูปที่ 2- 5 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานเมทริกซ์โจนส์.....	13
รูปที่ 2- 6 ตัวอย่างของสไลเดอร์ที่ถูกติดตั้งบน HGA	16
รูปที่ 2- 7 การรับส่งข้อมูลผ่านโปรโตคอลเอ็มคิวทีที	17
รูปที่ 2- 8 ไดอะแกรมการเชื่อมต่อของโปรโตคอลเอ็มคิวทีทีเข้ากับโบรกเกอร์.....	18
รูปที่ 2- 9 ระดับคุณภาพการให้บริการ ระดับที่ 0 (At Most Once).....	19
รูปที่ 2- 10 ระดับคุณภาพการให้บริการ ระดับที่ 1 (At Least Once).....	20
รูปที่ 2- 11 ระดับคุณภาพการให้บริการ ระดับที่ 2 (Exactly Once).....	20
รูปที่ 2- 12 ผลลัพธ์การหาค่า Round-trip Time โดยใช้คำสั่ง ping.....	21
รูปที่ 2- 13 การสะท้อนกลับของแสงที่ตกกระทบของฟิล์มทดสอบซึ่งมีความหนา d	21
รูปที่ 2- 14 ไดอะแกรมการเชื่อมต่ออุปกรณ์แสงของไมโครสโคปที่ใช้หลักการโพลาไรซ์ [3].....	24
รูปที่ 2- 15 ไดอะแกรมทางแสงในการทดลองโพลาไรซ์ไมโครสโคปพร้อมกับเลนส์ใกล้วัตถุ [3]	25
รูปที่ 2- 16 อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้เลนส์ใกล้วัตถุ โครงสร้างแบบไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์. 27	
รูปที่ 2- 17 พื้นผิวของ Blazed Rating ซึ่งมีความลึกประมาณ 142 นาโนเมตร.....	27
รูปที่ 2- 18 เลนส์ใกล้วัตถุและภาพระนาบโพกัสหลังเลนส์ [5].....	28
รูปที่ 2- 19 ไมโครอิลิปโซมิเตอร์สำหรับการการสแกนทางแสง [5].....	29
รูปที่ 2- 20 มุมเดลต้าที่ได้ ณ มุมตกกระทบต่าง ๆ [5]	29
รูปที่ 2- 21 ภาพ Phase Map ของวัสดุ [6].....	30
รูปที่ 2- 22 มุมเดลต้าที่ได้จาก Phase Map [6].....	31
รูปที่ 2- 23 ภาพความเข้มแสงที่ถูกแยกออกจากกัน โดยเกิดจากการเลื่อนเฟส $-\pi / 2$	31
รูปที่ 2- 24 ไดอะแกรมการเชื่อมต่อ Parallel Two-step Phase-shifting Interferometry	32
รูปที่ 2- 25 การกระจายตัวของเฟสของ Parallel Two-step Phase-shifting Interferometry ...	32
รูปที่ 2- 26 เครื่องทดสอบหาค่าความสูงการบินของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ [8]	33
รูปที่ 2- 27 โครงสร้างการเชื่อมต่อของเครื่องวัดแบบสองลำแสง [9].....	34
รูปที่ 2- 28 ค่าความเข้มแสงและความต่างเฟส	34
รูปที่ 2- 29 ภาพพื้นผิวของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์	35
รูปที่ 2- 30 การวัดค่า n, k โดยเครื่องอิลิปโซมิเตอร์.....	35
รูปที่ 2- 31 โครงสร้างของการวัดความสูงการบินโดยวิธี SCPHI.....	36
รูปที่ 2- 32 พื้นผิวของ Air Bearing Surface ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์.....	36
รูปที่ 2- 33 ค่าการบินของหัวอ่านที่ความเร็วรอบของแผ่นบันทึกข้อมูลที่แตกต่างกัน	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2- 34 การรับส่งข้อมูลซึ่งเกิดการสลับลำดับการส่งข้อความ [12].....	37
รูปที่ 2- 35 โครงสร้างการเชื่อมต่อของ MQTT-Topics Management System [13].....	38
รูปที่ 2- 36 โครงสร้างการเชื่อมต่อและสั่งงานหุ่นยนต์ [14]	39
รูปที่ 2- 37 แบบจำลองการควบคุมและสังเกตการณ์แขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม [15].....	39
รูปที่ 2- 38 ระยะเวลาการรับส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์กับแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม [15].....	40
รูปที่ 2- 39 โครงสร้างการเชื่อมต่อระบบ Health Monitoring [16]	40
รูปที่ 2- 40 การรับส่งข้อมูลของคุณภาพการให้บริการทั้ง 3 แบบ [16]	41
รูปที่ 3- 1 การสะท้อนของแสงที่ทำให้เกิดภาพพระนาบไฟกัสนหลังเลนส์ใกล้วัตถุ.....	42
รูปที่ 3- 2 ตัวชดเชยบาบิเนตโซเลย์.....	45
รูปที่ 3- 3 ภาพการสะท้อนกลับของแสงที่ได้จากแบบจำลอง	50
รูปที่ 4- 1 ไดอะแกรมการเชื่อมต่ออุปกรณ์แสงของไมโครอิลิปโวมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้นในรูปแบบที่ 1 ..	51
รูปที่ 4- 2 ภาพพระนาบไฟกัสนหลังเลนส์ที่ได้จากการปรับควอเตอร์เวฟเพลต	52
รูปที่ 4- 3 ไดอะแกรมการเชื่อมต่ออุปกรณ์แสงของไมโครอิลิปโวมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้นในรูปแบบที่ 2 ..	53
รูปที่ 4- 4 โครงการการเชื่อมต่ออุปกรณ์แสงของเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์.....	53
รูปที่ 4- 5 เลนส์ใกล้วัตถุที่ใช้ในเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์.....	54
รูปที่ 4- 6 ตำแหน่งและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง	54
รูปที่ 4- 7 การปรับมุมของควอเตอร์เวฟเพลตที่มุมต่าง ๆ.....	56
รูปที่ 4- 8 ขั้นตอนการประมวลผลภาพทางแสง	56
รูปที่ 4- 9 เส้นข้อมูลที่ตัดจากภาพความเข้มแสงที่มุม $\phi = 45$	57
รูปที่ 4- 10 การปรับมุมรีทาร์ดเดอร์โดยใช้ควอเตอร์เวฟเพลตที่มุม 1 ถึง 360°	58
รูปที่ 4- 11 การพล็อตเส้นข้อมูลที่ได้จากภาพความเข้มแสงที่มุม 45 องศา.....	58
รูปที่ 4- 12 ขั้นตอนการสร้างภาพความเข้มแสงแบบสแตก	59
รูปที่ 4- 13 ภาพความเข้มแสงแบบสแตกของวัสดุ SiO_2	59
รูปที่ 4- 14 การพล็อตเส้นข้อมูลที่ได้จากภาพความเข้มแสงแบบสแตก	60
รูปที่ 4- 15 ผลการแปลงฟูเรียร์ที่มุมตกกระทบที่ 56 องศา.....	61
รูปที่ 4- 16 เฟสที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์ที่มุมตกกระทบที่ 28 องศา	61
รูปที่ 4- 17 มุมเดลต้าของวัสดุ SiO_2	62
รูปที่ 4- 18 อัลกอริทึมของตัวกรองแบบแบบชายน และโคชายน	63
รูปที่ 4- 19 ภาพความเข้มแสงแบบสแตก (Stacked Intensity Image).....	63
รูปที่ 4- 20 มุมเดลต้า.....	64
รูปที่ 5- 1 โครงสร้างการเชื่อมต่อคลาวด์ภายในหน่วยงานกับระบบการวัดค่าทางแสง.....	65
รูปที่ 5- 2 ไดอะแกรม Node-Red ที่ใช้ในระบบ	66
รูปที่ 5- 3 หน้าจอแสดงผลที่ได้จากการวัด n, k	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 5- 4 ค่าราวด์ทริปทาม (Round-trip Time) ที่ได้จากการโปรโตคอลเอ็มคิวทีที.....	68
รูปที่ 5- 5 ค่า Throughput ที่ได้จากการโปรโตคอลเอ็มคิวทีที	69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในยุคปัจจุบันระบบสารสนเทศเข้ามามีบทบาทมากในการใช้ชีวิตประจำวัน ซึ่งสิ่งต่าง ๆ ที่อยู่รอบตัวมนุษย์คงหนีไม่พ้นอุปกรณ์ไอที ซึ่งต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูล ไม่ว่าจะเป็นบนอุปกรณ์นั้น หรือผ่านเทคโนโลยีคลาวด์ ซึ่งส่งผลให้เกิดการเติบโตของอุตสาหกรรมการผลิตสื่อบันทึกข้อมูลต่าง ๆ ซึ่งฮาร์ดดิสก์ก็เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่ต้องรองรับการขยายตัวของความจุในการจัดเก็บข้อมูลที่มีปริมาณมาก ๆ แต่เนื่องการในขั้นตอนการผลิตฮาร์ดดิสก์มีหลายขั้นตอน ดังนั้นจึงต้องมีกระบวนการในการตรวจสอบคุณภาพในทุก ๆ ขั้นตอนก่อนส่งผลิตภัณฑ์ให้กับลูกค้า ซึ่งในกระบวนการตรวจสอบตรวจสอบคุณภาพนั้น เนื่องจากจำนวนการผลิตที่มีค่อนข้างสูง ส่งผลให้ในขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพจึงทำการตรวจสอบคุณภาพจากกลุ่มตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้น ซึ่งหนึ่งในการตรวจสอบคุณภาพของฮาร์ดดิสก์ ก็คือ การหาระยะการบินของหัวอ่าน ซึ่งต้องอยู่ในระยะที่เหมาะสมกับความเร็วรอบของฮาร์ดดิสก์ และประเภทของหัวอ่าน ซึ่งปัจจุบันการวัดค่าความสูงการบินของหัวอ่าน สามารถทำการตรวจวัดได้จากเครื่อง KLA Tencor D6 ซึ่งเครื่องวัดนี้จะทำการวัดค่าความสูงการบินระหว่างหัวอ่านกับสื่อบันทึกข้อมูล ซึ่งจำเป็นต้องใช้ค่าการคุณสมบัติการสะท้อนแสงของวัสดุที่เรียกว่า ค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน (Complex Refractive Index) ซึ่งต้องทำการวัดโดยใช้เครื่องอิลิปโซมิเตอร์ก่อน ซึ่งเครื่องอิลิปโซมิเตอร์จะทำการวัดค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนจากกลุ่มตัวอย่างในรอบการผลิตฮาร์ดดิสก์นั้น ๆ โดยในการวัดค่าจำเป็นจะต้องติดตั้งโครงสร้างของ HGA (Head Gimbal Assembly) ให้เรียบแบน ไม้มีความโค้งงอก่อนเข้าทำการวัดที่เครื่องอิลิปโซมิเตอร์ ซึ่งทำให้ค่าองค์ประกอบทางแสงเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นวิธีการนี้จึงทำให้ได้ค่าความสูงการบินของหัวอ่านไม่ได้เป็นค่าจริงของหัวอ่านจริง เนื่องจากเป็นวัดค่าคุณสมบัติทางแสงของกลุ่มตัวอย่าง นอกจากนี้ยังทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ HGA ดังนั้นค่าความสูงการบินของหัวอ่านที่วัดได้จึงไม่ได้เป็นค่าจริงจากหัวอ่านที่กำลังทำการทดสอบ

ดังนั้นงานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการวัดค่าคุณสมบัติทางแสงของวัสดุ ซึ่งนำเสนอวิธีการใหม่ในการหาคุณสมบัติทางแสงโดยใช้การประมวลผลภาพทางแสงที่ได้จากการบันทึกภาพจากตำแหน่งภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์ หรือที่เรียกว่า ระนาบฟูเรียร์ (Fourier Plane) ที่ทำงานร่วมกับอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ โดยใช้หลักการโพลาไรเซชันทางแสงเพื่อหาความต่างเฟสของแสง ซึ่งหลังจากที่ได้ค่าคุณสมบัติทางแสงของวัสดุแล้ว ระบบจะทำการส่งข้อมูลไปให้กับผู้เกี่ยวข้อง และเครื่องวัดความสูงการบินของหัวอ่านต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อพัฒนาต้นแบบวิธีการหาค่าคุณสมบัติทางแสงของวัสดุ โดยใช้หลักการของเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์ที่ใช้อินเตอร์เฟอโรเมทรีแบบเลื่อนโพลาริเซชันทางแสง
2. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติทางแสง
3. เพื่อพัฒนาการรับส่งข้อมูลไปสู่ผู้ที่เกี่ยวข้อง และเครื่องวัดการสั่นของหัวอ่านผ่านโปรโตคอลเอ็มคิวทีที

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

จากหลักการของเครื่องอิลิปโซมิเตอร์ เป็นการหาค่าคุณสมบัติทางแสงที่มุมตกกระทบมุมหนึ่ง ซึ่งทำให้ต้องทำการหาค่าคุณสมบัติทางแสง ณ มุมตกกระทบต่าง ๆ ดังนั้นถ้าสามารถวัดค่าคุณสมบัติทางแสงได้โดยทำการวัดค่าเพียงครั้งเดียว จะทำให้สามารถได้ค่าคุณสมบัติทางแสงที่มีความถูกต้อง ซึ่งไมโครอิลิปโซมิเตอร์เป็นเครื่องวัดแบบหนึ่ง ซึ่งมีการใช้งานเลนส์ใกล้วัตถุเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้เกิดแสงสะท้อนกลับที่มุมต่าง ๆ ซึ่งทำให้เกิดภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์ (Back Focal Plane) โดยภาพที่อยู่ด้านหลังของเลนส์ใกล้วัตถุเป็นภาพที่ให้รายละเอียดของภาพที่มากกว่า ภาพระนาบโฟกัสหน้าเลนส์ (Front Focal Plane) ดังนั้นเมื่อนำภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์ไปวิเคราะห์สามารถให้ข้อมูลทางแสงที่มากกว่าเนื่องจากมีขนาดและรายละเอียดของภาพที่มากกว่า นอกจากนี้ผู้วิจัยได้นำเทคนิคการปรับค่าโพลาริเซชันทางแสงโดยใช้ควอเตอร์เวฟเพลต เพื่อให้ปรับบริหารเตอร์ของแสงระหว่าง p-polarized และ s-polarized ซึ่งการปรับบริหารเตอร์จะทำให้เกิดการเลื่อนเฟสทางแสง (Phase Shift) ระหว่าง p-polarized และ s-polarized ซึ่งค่าการเลื่อนเฟสทางแสงนำไปสู่การคำนวณหาค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนต่อไป

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในการออกแบบไมโครอิลิปโซมิเตอร์ซึ่งใช้หลักการอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่มีการเลื่อนเฟสทางแสงนั้น ผู้วิจัยเริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลองภาพความเข้มแสง และแบบจำลองการปรับบริหารเตอร์ของแสงด้วยควอเตอร์เวฟเพลตเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องต้นแบบไมโครอิลิปโซมิเตอร์ซึ่งใช้หลักการอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ โดยในขั้นตอนการประมวลผลภาพความเข้มแสงที่ได้จากเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์เป็นการหาค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน ซึ่งก็คือค่า n , k จากภาพความเข้มแสงแบบสแตกที่สร้างขึ้น และทำการหาค่าองค์ประกอบเชิงความถี่โดยใช้การแปลงฟูเรียร์ ซึ่งจะให้ได้ค่าเดลดต้า ซึ่งนำไปสู่การหาค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนต่อไป ซึ่งเมื่อได้ค่า n , k แล้วก็ทำการส่งข้อมูลผ่านโปรโตคอลเอ็มคิวทีที เพื่อส่งให้เครื่อง KLA Tencor D6 เพื่อทำการหาค่าความสูงการบิ่นของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ โดยการรับส่งข้อมูลจะทำการวัดประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลโดยใช้ค่าราวด์ทริปทาม (Round Trip Time) ทหาระยะเวลาจริงที่ใช้ในการส่ง

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตการวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ การวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติทางแสงของวัสดุ (Complex Refractive Index) โดยใช้หลักการของไมโครอิลิปโซมิเตอร์ ร่วมกับอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ที่มีการเลื่อนโพลาไรเซชันทางแสง โดยนำภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์ใกล้วัตถุ (Back Focal Plane) ที่ได้มาปรับโพลาไรเซชันแสงทางแสง เพื่อหาค่าการเลื่อนเฟสทางแสงซึ่งทำให้เกิดมุมเดลต้าขึ้น จากนั้นทำการคำนวณค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนโดยวิธีการปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting) โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงแบบไม่โพลาไรซ์ ที่ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร โดยในภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์ เลือกใช้ข้อมูลจากภาพในแนวเส้นทแยงมุมที่ 45 องศาของภาพ ในทุก ๆ การปรับมุม Fast Axis ของควอเตอร์เวฟเพลต โดยวัสดุที่ใช้ในการทดสอบมี 3 ชนิด คือ SiO_2 , Au และ AlTiC โดยเมื่อได้ภาพความเข้มแสงแบบสแตกแล้ว จะทำการแปลงภาพที่ได้ให้อยู่ในโดเมนของความถี่ โดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform) โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์จะเป็นมุมเดลต้า ซึ่งในขั้นตอนสุดท้ายทำการหาค่า n , k โดยใช้การปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting) เมื่อได้ค่า n , k แล้ว ข้อมูลต่าง ๆ จะถูกส่งผ่านโปรโตคอลเอ็มคิวทีที โดยทำการวัดประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลจากคาร์ราร์ดทริปตาม(Round Trip Time) เพื่อหาระยะเวลาตั้งแต่การส่งข้อมูลจนถึงเวลาที่ข้อมูลปลายทางตอบกลับมา

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับโพลาไรเซชันทางแสง

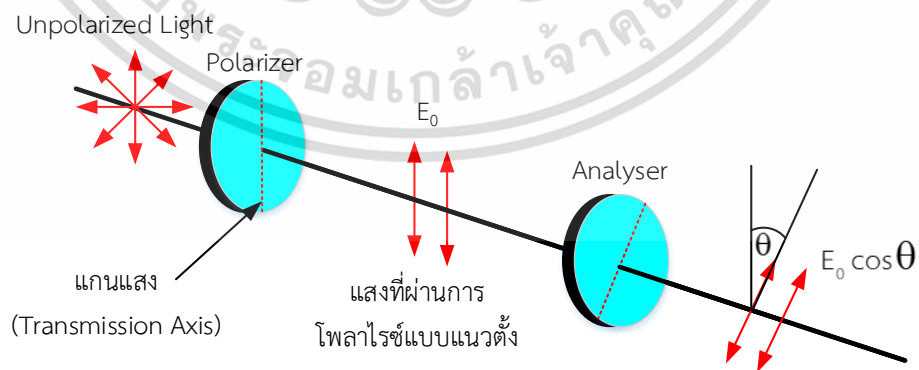
แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบหนึ่ง ซึ่งเมื่อพิจารณาเฉพาะโพลาไรซ์ทางแสงแบบเชิงเส้น หรือระนาบโพลาไรซ์ของแสง (Plane-Polarized Light) จะหมายถึงแสงที่มีทิศทางที่เป็นค่าคงที่ อย่างไรก็ตามขนาดและเครื่องหมายของแสงโพลาไรซ์จะแตกต่างกันออกไปตามเวลา สนามไฟฟ้าหรือสัญญาณรบกวนทางแสง เกิดขึ้นจากการระนาบการสั่นสะเทือน โดยระนาบทางแสงประกอบด้วยเวกเตอร์สนามไฟฟ้า (Electric Field Vector : \vec{E}) โดยทิศทางของสนามไฟฟ้า เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ทิศทางโพลาไรเซชันของคลื่น กรณีที่คลื่นมีสนามไฟฟ้าสั่นอยู่ในหลากหลายทิศทาง จะถูกจัดเป็นคลื่นแบบไม่โพลาไรซ์ (Unpolarized Wave)

แสงที่ไม่โพลาไรซ์ สามารถทำให้เป็นแสงโพลาไรซ์ได้ด้วยกระบวนการดังนี้

- การดูดกลืน (Absorption)
- การสะท้อน (Reflection)
- การหักเห (Refraction)
- การกระเจิง (Scattering)

2.1.1 โพลาไรเซชันโดยการดูดกลืน [1]

เมื่อแสงแบบไม่โพลาไรซ์วิ่งผ่านอุปกรณ์โพลาไรเซอร์ สนามไฟฟ้าของแสงที่ไม่โพลาไรซ์ซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับแกนแสงของอุปกรณ์โพลาไรเซอร์ ก็จะถูกดูดกลืนโดยโพลาไรเซอร์ ส่วนสนามไฟฟ้าที่มีทิศทางขนานกับแกนแสงของโพลาไรเซอร์จะสามารถวิ่งผ่านอุปกรณ์โพลาไรเซอร์ออกมาได้ จากรูปที่ 2- 1 โพลาไรเซอร์ถูกปรับแกนแสงเป็นแนวตั้ง ซึ่งเรียกว่า (Vertical Polarizer) ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อผ่านโพลาไรเซอร์แล้วจะมีเพียงสนามไฟฟ้าที่มีวางตัวเป็นแนวตั้งผ่านไปได้เท่านั้น



รูปที่ 2- 1 โพลาไรเซชันโดยการดูดกลืน

2.1.2 โพลาริเซชันโดยการสะท้อน [1]

แสงไม่โพลาไรซ์เมื่อตกกระทบกับพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งมีดัชนีการหักเหแสง n เช่น กระจก หรือผิวน้ำ เมื่อพิจารณาทิศทางของสนามไฟฟ้าของแสงไม่โพลาไรซ์ สามารถพิจารณาได้ 2 อย่าง คือ แสงที่ตกกระทบ (Incident Light) และแสงที่ตั้งฉากกับแสงที่ตกกระทบจะถูกรเรียกว่าแสงสะท้อน (Refractive Light) โดยแสงที่มีสนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากกับแสงที่ตกกระทบจะเป็นแสงที่สามารถสะท้อนได้ดีกว่า

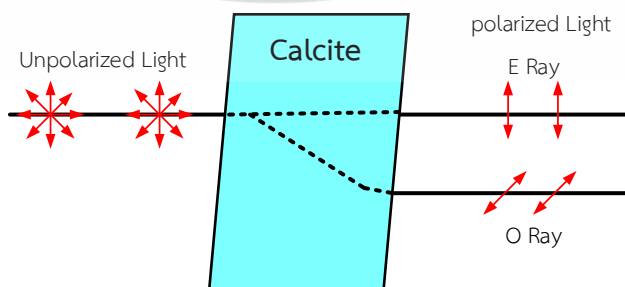
ดังนั้นถ้าทำการเปลี่ยนแปลงมุมของแสงที่ตกกระทบให้มีมุมที่ตั้งฉากกับแสงที่สะท้อน แสงที่สะท้อนจะเป็นแสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นสมบูรณ์ โดยเรียกมุมตกกระทบ θ_B ว่าเป็นมุมโพลาไรซ์หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า มุมบรูสเตอร์ (Brewster 's angle) โดยที่มุมบรูสเตอร์ มีแสงที่ถูกสะท้อนและแสงที่หักเหซึ่งจะมีสนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน โดยแสงที่ถูกหักเหจะเป็นแสงโพลาไรซ์แบบบางส่วน



รูปที่ 2- 2 โพลาริเซชันโดยการสะท้อน

2.1.3 โพลาริเซชันโดยการหักเหเชิงซ้อน [1]

ในวัสดุบางชนิด เช่น แคลไซต์หรือควอตซ์ จะมีคุณสมบัติที่เรียกว่า Birefringent ซึ่งทำให้เกิดค่าดัชนีการหักเหแสง 2 ค่า อันเนื่องมาจากแสงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วได้ไม่เท่ากัน ในแต่ละทิศทางของการเคลื่อนที่ในผลึก ดังนั้นเมื่อมีแสงที่ไม่โพลาไรซ์ผ่านเข้าไปในผลึก จะพบว่าแสงจะเกิดการหักเห และสร้างเป็นแสงโพลาไรซ์ขึ้นดังรูปที่ 2- 3

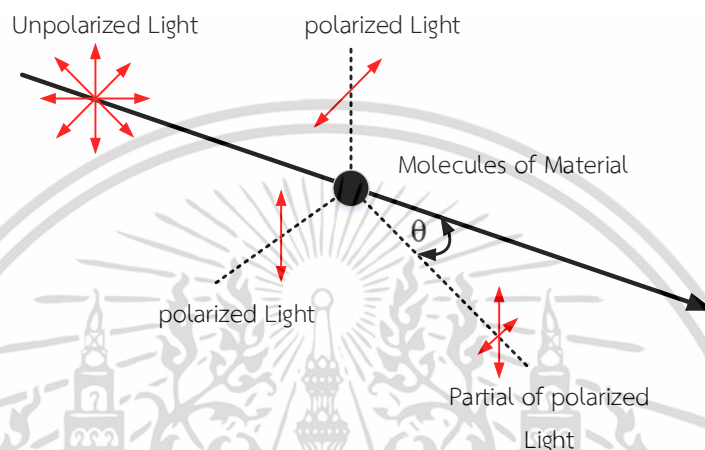


รูปที่ 2- 3 โพลาริเซชันโดยการหักเหเชิงซ้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 โพลาริเซชันโดยการกระเจิง [1]

เมื่อแสงเดินทางไปกระทบกับโมเลกุลของตัวอย่าง อิเล็กตรอนในโมเลกุลของตัวกลางนั้น ๆ จะถูกคลื่นแสงที่ตกกระทบ ส่งผลให้โมเลกุลของตัวกลางนั้น ๆ เกิดการสั่นสะเทือนและปลดปล่อยพลังงานในรูปของแสงออกมาในทุกทิศทาง ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า การกระเจิงแสง ซึ่งการกระเจิงแสงเกิดขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของตัวกลาง เช่น อากาศ มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของแสง เช่น ฝุ่นละอองในอากาศ ดังนั้นเวลามองท้องฟ้า จะพบว่าท้องฟ้ามีสีเป็นสีฟ้านั่นเอง



รูปที่ 2- 4 โพลาริเซชันโดยการกระเจิง

2.2 เมทริกซ์โจนส์

เมทริกซ์โจนส์ [2] ใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมการโพลาไรซ์ของแสงในรูปของแอมพลิจูด (Amplitudes) ซึ่งเมทริกซ์โจนส์จัดเป็นความสำเร็จขั้นหนึ่งของทฤษฎีเรื่องแสง เนื่องจากเป็นทฤษฎีหนึ่งที่ใช้ในการแก้ปัญหาที่เกี่ยวกับสมการคลื่นในรูปของการแปลงไปสู่การโพลาไรซ์แสงแบบวงรี บนพื้นฐานของแอมพลิจูดที่แตกต่างกัน โดยผลลัพธ์สามารถทำความเข้าใจได้ (เช่น การทดลองการแทรกสอดของ Young และแสงโพลาไรซ์แบบวงกลม) อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของแอมพลิจูดก็ตาม แต่ยังมีหลายปัญหาที่ยากที่จะแก้ไขได้ เช่น การที่แสงเดินทางผ่านอุปกรณ์โพลาไรซ์หลาย ๆ อุปกรณ์ เป็นต้น ดังนั้นเพื่อที่จะแก้ปัญหาความซับซ้อนที่เกิดขึ้น ในปี ค.ศ. 1940 คุณ R. Clark Jones ได้พัฒนาสมการเมทริกซ์ขึ้นเพื่อแก้ปัญหา ซึ่งถูกเรียกว่า เมทริกซ์โจนส์ (Jones Matrices) ซึ่งเมทริกซ์โจนส์เหมาะสำหรับการเพิ่มแอมพลิจูดเข้าไปในระบบ โดยที่เมทริกซ์โจนส์กล่าวถึงแอมพลิจูดที่อยู่ในรูปของเมทริกซ์ขนาด 2×1 ซึ่งเป็นเวกเตอร์โจนส์ (Jones Vector) และเมทริกซ์ขนาด 2×2 ซึ่งเป็นเมทริกซ์โจนส์ โดยในช่วงต้นจะเห็นว่าเมทริกซ์โจนส์สามารถใช้งานได้ง่ายกว่าเมทริกซ์มุลเลอร์ (Muller Matrices) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มีการใช้งานเมทริกซ์โจนส์มากขึ้น เนื่องจากการคูณเมทริกซ์ 2×2 หลาย ๆ เมทริกซ์มันเป็นเรื่องที่เสียเวลาในการคำนวณมาก หลังจากที่คำนวณเมทริกซ์เสร็จสิ้นแล้วยังต้องมีขั้นตอนเพิ่มเติม เช่น การแยกค่าจริง (Real Part) และค่าจำนวนเชิงซ้อน (Imaginary Part) เช่น E_x และ E_y นอกจากนั้นยังมีปัญหาอื่น ๆ คือ การคูณระหว่างทรานสโพสที่ซับซ้อน (Complex

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Transpose) ของเวกเตอร์โจนส์กับทรานสโพสที่ซับซ้อน (Complex Transpose) ของเวกเตอร์โจนส์ ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นการคำนวณทางเมทริกซ์ที่มีความซับซ้อน ซึ่งสามารถคำนวณได้ ในขณะที่มูลเลอร์เมทริกซ์มีขนาด 4×4 ทำให้มีความซับซ้อนในการคำนวณที่มากกว่า

มีปัญหาต่าง ๆ ที่ต้องใช้เมทริกซ์โจนส์ในการแก้ปัญหา โดยทั่วไปจะเลือกใช้วิธีการใดในการแก้ปัญหา สามารถสรุปได้ดังนี้ คือ เมทริกซ์โจนส์ใช้กับการแก้ปัญหการวางซ้อนของแอมพลิจูด ส่วนเมทริกซ์มูลเลอร์ใช้สำหรับการแก้ปัญหการวางซ้อนของความเข้มแสง ซึ่งประสบการณ์การใช้งานของเมทริกซ์ทั้งสองจะเป็นสิ่งที่บอกได้ดีที่สุดในการเลือกใช้เมทริกซ์ทั้งสอง ซึ่งเนื้อหาในส่วนต่อไปจะกล่าวถึงพื้นฐานของการใช้งานเมทริกซ์โจนส์

2.2.1 เวกเตอร์โจนส์ (Jones Vector)

องค์ประกอบของระนาบคลื่นแสงสามารถเขียนในรูปแบบจำนวนเชิงซ้อนเชิงปริมาณได้ดังนี้

$$E_x(z, t) = E_{0x} e^{i(\omega t - kz + \delta_x)} \quad (2-1)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} e^{i(\omega t - kz + \delta_y)} \quad (2-2)$$

ถ้ากำจัด $\omega t - kz$ ออกไป สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$E_x = E_{0x} e^{i\delta_x} \quad (2-3)$$

$$E_y = E_{0y} e^{i\delta_y} \quad (2-4)$$

ซึ่งถ้านำสมการที่ 2-3 และ 2-4 มาเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ E สามารถเขียนได้ดังนี้

$$E = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{0x} e^{i\delta_x} \\ E_{0y} e^{i\delta_y} \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

จากสมการที่ 2-5 จะถูกเรียกว่าเมทริกซ์คอลัมน์โจนส์ (Jones Column Matrices) หรือเวกเตอร์โจนส์ (Jones Vector) ซึ่งมีค่าแอมพลิจูดของ E_{0x} และ E_{0y} สูงสุด คือ จำนวนจริง ซึ่งเทอมเอกซ์โพเนนเชียล $e^{i\delta_x}$ และ $e^{i\delta_y}$ ส่งผลให้ E_x และ E_y เป็นจำนวนเชิงซ้อนนั่นเอง ก่อนที่จะทำการหาค่าเวกเตอร์โจนส์ที่โพลาไรซ์สเตท (Polarization State) ทางแสงต่าง ๆ ต้องอธิบายรูปแบบทั่วไปของเวกเตอร์โจนส์ก่อน โดยกำหนดให้ความเข้มแสงรวม (Intensity : I) มีสมการดังนี้

$$I = E_x E_x^* + E_y E_y^* \quad (2-6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2-6 สามารถหาได้จากการคูณเวกเตอร์ทั้งสองเข้าด้วยกันดังนี้

$$I = \begin{bmatrix} E_x^* & E_y^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

โดยที่เมทริกซ์แถว $\begin{bmatrix} E_x^* & E_y^* \end{bmatrix}$ เป็นค่า Complex Transpose ของเวกเตอร์โจนส์ E ซึ่งเขียนแทนได้เป็น E^\dagger

$$I = E^\dagger E \quad (2-8)$$

แทนค่า E และ E^\dagger ในสมการที่ 2-8 จะได้

$$I = E^\dagger E = \begin{bmatrix} E_{0x} e^{-i\delta_x} & E_{0y} e^{-i\delta_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{0x} e^{i\delta_x} \\ E_{0y} e^{i\delta_y} \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

$$I = E_{0x}^2 + E_{0y}^2 = E_0^2$$

โดยทั่วไปแล้วจะกำหนดให้ $E_0^2 = 1$ เพื่อที่จะบอกว่าเวกเตอร์โจนส์อยู่ในรูปทั่วไปแล้ว ซึ่งเงื่อนไขทั่วไปของสมการ 2-7 สามารถเขียนได้เป็น

$$E^\dagger E = 1 \quad (2-10)$$

หมายเหตุ เวกเตอร์โจนส์สามารถใช้อธิบายแสงโพลาไรซ์ได้ทั้งหมด ซึ่งสามารถหาเวกเตอร์โจนส์สำหรับสถานะของแสงโพลาไรซ์ที่สมบูรณ์ได้

- แสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวนอน (Linear Horizontally Polarized Light) โดยในสถานะนี้กำหนดให้ $E_y = 0$ ดังนั้นสมการที่ 2-5 จะเปลี่ยนไปดังนี้

$$E = \begin{bmatrix} E_x \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{0x} e^{i\delta_x} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

จากเงื่อนไขทั่วไปของสมการที่ 2-10 จะเห็นได้ว่า $E_{0x}^2 = 1$ ดังนั้นกำจัด $e^{i\delta_x}$ เพราะมันเป็นยูนิโมดูลาร์ (Unimodular) ดังนั้นรูปแบบทั่วไปของแสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวนอนสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$E = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

• แสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวตั้ง (Linear Vertically Polarized Light) โดยในสถานะนี้กำหนดให้ $E_x=0$ ดังนั้น $E_{0y}^2 = 1$ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$E = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

ตารางที่ 2- 1 ตารางสรุปเวกเตอร์โจนส์พื้นฐานแบบต่าง ๆ

Jones Vector	Jones Vector Form
แสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวนอน (Linear Horizontally Polarized Light)	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
แสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวตั้ง (Linear Vertically Polarized Light)	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
แสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นที่มุม 45 องศาจากแกนแนวนอน	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$
แสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นที่มุม -45 องศาจากแกนแนวนอน	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$
แสงโพลาไรซ์แบบวงกลม ด้านขวา	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}$
แสงโพลาไรซ์แบบวงกลม ด้านซ้าย	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ +i \end{bmatrix}$

2.2.2 เมทริกซ์โจนส์สำหรับอุปกรณ์โพลาไรเซอร์, รีทาร์เดอร์, โรเตเตอร์

เราสามารถหารูปแบบของโพลาไรเซอร์ (Diattenuators), รีทาร์เดอร์ (Phase Shifters), โรเตเตอร์ในรูปของเมทริกซ์โจนส์ โดยตั้งสมมุติฐานว่าองค์ประกอบของแสงเกิดขึ้นจากแสงโพลาไรซ์ที่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีความสัมพันธ์กับแสงที่ตกกระทบ ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$E_x' = j_{xx}E_x + j_{xy}E_y \quad (2-14)$$

$$E_y' = j_{yx}E_x + j_{yy}E_y \quad (2-15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ E_x' และ E_y' เป็นส่วนประกอบของแสงที่เกิดขึ้น และ E_x และ E_y เป็นส่วนประกอบของแสงที่ตกกระทบ (Incident Beam) ซึ่งปริมาณ j_{ik} โดยที่ $i,k = x,y$ เป็นตัวประกอบของการแปลง สมการที่ 2-14 และ 2-15 สามารถเขียนในรูปเมทริกซ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} E_x' \\ E_y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_{xx} & j_{xy} \\ j_{yx} & j_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

$$E' = JE \quad (2-17)$$

โดยที่

$$J = \begin{bmatrix} j_{xx} & j_{xy} \\ j_{yx} & j_{yy} \end{bmatrix} \quad (2-18)$$

เมทริกซ์ขนาด 2x2 ถูกเรียกว่าเมทริกซ์โจนส์ (Jones Matrices) ซึ่งทำให้สามารถหาเมทริกซ์โจนส์สำหรับโพลาไรเซอร์, รีฟาร์เตอร์ และโรเตเตอร์ได้ โดยโพลาไรเซอร์มีคุณสมบัติดังนี้

$$E_x' = p_x E_x \quad (2-19)$$

$$E_y' = p_y E_y \quad (2-20)$$

โดยที่ $p_{x,y}$ มีค่าระหว่าง $0 \leq p_{x,y} \leq 1$

ในกรณีที่มีการส่งสมบูรณ์ $p_{x,y} = 1$ และกรณีที่มีการลดทอน (Attenuation) $p_{x,y} = 0$ เมื่อนำสมการที่ 2-19 และ 2-20 มาเขียนในรูปเมทริกซ์จะได้

$$\begin{bmatrix} E_x' \\ E_y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x & 0 \\ 0 & p_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (2-21)$$

ดังนั้นเมทริกซ์โจนส์ของสมการที่ 2-21 ที่เป็นโพลาไรเซอร์ คือ

$$J_p = \begin{bmatrix} p_x & 0 \\ 0 & p_y \end{bmatrix} \quad 0 \leq p_{x,y} \leq 1 \quad (2-22)$$

ในอุดมคติของโพลาริเซอร์เชิงเส้นแนวนอน ถ้ามีการส่งที่สมบูรณ์ไปแนวแกนอน (แกน x) และมีการลดทอนสัญญาณสมบูรณ์ในแนวแกนตั้ง (แกน y) ดังนั้นจะได้ว่า $p_x = 1$ และ $p_y = 0$ ดังนั้นสามารถเขียนเมทริกซ์โจนส์ของโพลาริเซอร์แนวนอน คือ

$$J_{PH} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-23)$$

$$J_{PV} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-24)$$

ถ้าต้องการทราบว่าเมทริกซ์โจนส์สำหรับการหมุนโพลาริเซอร์ที่มุม θ สามารถหาได้จากสมการการหมุน (Rotation Transformation) ทั่ว ๆ ไป คือ

$$J' = J(-\theta)JJ(\theta) \quad (2-25)$$

โดยที่ $J(\theta)$ เป็นเมทริกซ์สำหรับการหมุน

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2-26)$$

การหมุนโพลาริเซอร์เชิงเส้น ไปที่มุม θ แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$J' = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x & 0 \\ 0 & p_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} p_x \cos^2 \theta + p_y \sin^2 \theta & (p_x - p_y) \sin \theta \cos \theta \\ (p_x - p_y) \sin \theta \cos \theta & p_x \sin^2 \theta + p_y \cos^2 \theta \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

กรณีโพลาริเซอร์แนวนอนในอุดมคติ ค่า $P_x = 1$ และ $P_y = 0$ ดังนั้นถ้าทำการหมุนโพลาริเซอร์แนวนอน โดยใช้สมการการหมุน 2-27 สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$J_p(\theta) = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (2-28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์โพลาริซเซอร์ที่มีความสำคัญอีกอย่างหนึ่งก็คือ รีทาร์เดอร์ ซึ่งสามารถแยกการเลื่อนเฟส ϕ ที่อยู่ระหว่าง 2 คอมโพเนนต์ที่ตั้งฉากซึ่งกันและกันของแสง โดยกำลังเฟส $\phi/2$ ให้กับแกน Fast Axis และรีทาร์เดอร์เฟส $\phi/2$ ตามแนวแกน y ซึ่งพฤติกรรมนี้อธิบายโดยสมการดังนี้

$$E_x' = e^{+i\phi/2} E_x \quad (2-29)$$

$$E_y' = e^{-i\phi/2} E_y \quad (2-30)$$

โดยที่ E_x' และ E_y' เป็นส่วนประกอบหนึ่งของแสง ส่วน E_x และ E_y เป็นส่วนประกอบหนึ่งของแสงตกกระทบ ซึ่งสามารถแสดงสมการที่ 2-29 และ 2-30 ในรูปของเมทริกซ์โจนส์ดังนี้

$$J' = \begin{bmatrix} E_x' \\ E_y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{+i\phi/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\phi/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (2-31)$$

เมทริกซ์โจนส์สำหรับรีทาร์เดอร์ (การเลื่อนเฟส) แสดงดังนี้

$$J_R(\phi) = \begin{bmatrix} e^{+i\phi/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\phi/2} \end{bmatrix} \quad (2-32)$$

โดยที่ ϕ เป็นผลรวมของการเลื่อนเฟสระหว่างฟิล์มคอมโพเนนต์ โดยรีทาร์เดอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมมี 2 ชนิด ได้แก่ ควอเตอร์เวฟเพลต และฮาล์ฟเวฟเพลต

$$J_R\left(\frac{\lambda}{4}\right) = \begin{bmatrix} e^{+i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/4} \end{bmatrix} = e^{+i\pi/4} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/2} \end{bmatrix} = e^{+i\pi/4} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

$$J_R\left(\frac{\lambda}{2}\right) = \begin{bmatrix} e^{+i\pi/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix} = i \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2-34)$$

เมทริกซ์โจนส์สำหรับการหมุน แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$J_R(\phi, \theta) = \begin{bmatrix} e^{+i\phi/2} \cos^2 \theta + e^{-i\phi/2} \sin^2 \theta & (e^{+i\phi/2} - e^{-i\phi/2}) \sin \theta \cos \theta \\ (e^{+i\phi/2} - e^{-i\phi/2}) \sin \theta \cos \theta & e^{+i\phi/2} \sin^2 \theta + e^{-i\phi/2} \cos^2 \theta \end{bmatrix} \quad (2-35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสูตรครึ่งมุม (Half-angle Formulas) ในทางคณิตศาสตร์ กล่าวไว้ว่า $\sin^2 \theta = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\theta)$ และ $\cos^2 \theta = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\theta)$ ดังนั้นนำสมการที่ 2-35 แทนที่ด้วยสมการครึ่งมุมจะได้

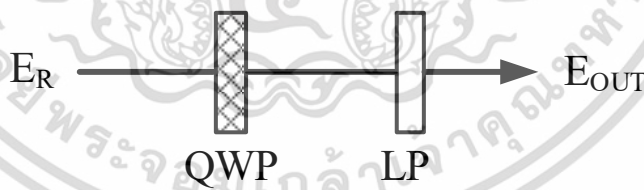
$$J_R(\phi, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \frac{\phi}{2} + i \sin \frac{\phi}{2} \cos 2\theta & i \sin \frac{\phi}{2} \sin 2\theta \\ i \sin \frac{\phi}{2} \sin 2\theta & \cos \frac{\phi}{2} - i \sin \frac{\phi}{2} \cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (2-36)$$

ในกรณีที่ เป็นควอเตอร์เวฟเพลต และฮาล์ฟเวฟเพลต สามารถลดรูปสมการที่ 2-36 ได้ดังนี้

$$J_R\left(\frac{\lambda}{4}, \theta\right) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{i}{\sqrt{2}} \cos 2\theta & \frac{i}{\sqrt{2}} \sin 2\theta \\ \frac{i}{\sqrt{2}} \sin 2\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{i}{\sqrt{2}} \cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (2-37)$$

$$J_R\left(\frac{\lambda}{2}, \theta\right) = i \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (2-38)$$

ตัวอย่าง การใช้งานเมทริกซ์โจนส์ ให้แสงสะท้อน (Electric Vector of Reflection : E_R) ผ่านโพลาไรเซอร์แบบเชิงเส้น และทำการปรับทิศทางด้วยควอเตอร์เวฟเพลต



รูปที่ 2- 5 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานเมทริกซ์โจนส์

วิธีทำ กำหนดให้

$$E_R = \begin{bmatrix} \vec{r}_\pi + \vec{r}_\sigma \\ \vec{r}_\pi - \vec{r}_\sigma \end{bmatrix}$$

โดยเมทริกซ์โจนส์ของโพลาไรเซอร์แบบเชิงเส้นแบบแนวตั้งจะมีสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$LP_{\text{vertical}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

และเมทริกซ์ Jones ของการปรับแกนหมุนของควอเตอร์เวฟเพลตมีสมการดังนี้

$$R_{\text{QWP}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{i \cos(2\gamma)}{\sqrt{2}} & \frac{i \sin(2\gamma)}{\sqrt{2}} \\ \frac{i \sin(2\gamma)}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{i \cos(2\gamma)}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

ดังนั้นในการแก้ต้องการหาเอาต์พุต (E_{out}) ที่ได้ ก็ให้จัดรูปแบบการคูณเมทริกซ์

$$\begin{aligned} \therefore E_{\text{out}} &= LP \times R_{\text{QWP}} \times E_{\text{R}} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{i \cos(2\gamma)}{\sqrt{2}} & \frac{i \sin(2\gamma)}{\sqrt{2}} \\ \frac{i \sin(2\gamma)}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{i \cos(2\gamma)}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{r_{\pi}} + \overline{r_{\sigma}} \\ \overline{r_{\pi}} - \overline{r_{\sigma}} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

2.3 ความสำคัญของการหาความสูงการบินของหัวอ่านโดยใช้ไมโครอิลิปโซมิเตอร์

ในอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (HDD) การวัดความสูงของการบินเป็นกระบวนการที่สำคัญที่ใช้ในการตรวจสอบการออกแบบพื้นผิวของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่เรียกว่า Air Bearing Surface ซึ่งการหาประสิทธิภาพการบินของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์จะทำการวัดและเปรียบเทียบกับการออกแบบแบบเดิมเพื่อให้มั่นใจในความน่าเชื่อถือในการตรวจสอบคุณภาพของฮาร์ดดิสก์ โดยเครื่องวัดอินเตอร์เฟอโรเมทริกซ์โดยทั่วไปแล้วถูกใช้เพื่อการวัดความสูงการบินของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการตั้งค่าให้กับเครื่องมือวัดชนิดนี้ คือ ดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน ซึ่งโดยปกติแล้วค่าการเบี่ยงเบนจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต ความแปรปรวนของค่าดัชนีการหักเหแสงไม่สามารถระบุได้ในระหว่างการวัดความสูงการบินของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ เนื่องจากวิธีการนี้ไม่ได้เป็นวิธีการที่ได้ผลการวัดทันทีทันใด บทความนี้ผู้วิจัยนำเสนอวิธีการใหม่ที่ใช้ในการออกแบบไมโครอิลิปโซมิเตอร์เพื่อทำการวัดค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนร่วมกับการรับส่งข้อมูลบนเครือข่ายคลาวด์ โดยใช้โปรโตคอลเอ็มคิวทีที (Message Queuing Telemetry Transport : MQTT) ดังนั้นการวัดค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนสามารถวัดได้กับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์แต่ละตัวได้ และระบบนี้ยังทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของการวัดความสูงการบินของหัวอ่านอีกด้วย นอกจากนี้ค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนสามารถใช้งานร่วมกับเครื่องวัดความสูงการบินของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์เพื่อแก้ปัญหาความไม่แน่นอนในการวัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์แต่ละตัว แต่ยังคงสามารถใช้ช่วยตรวจสอบความถูกต้องและประสิทธิภาพของการออกแบบพื้นผิว Air-bearing Surface บนสไลเดอร์ซึ่งติดตั้งอยู่บนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ได้อีกด้วย

ในขณะที่ความจุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพิ่มขึ้นแบบทวีคูณ ดังนั้นค่าความสูงการบินของหัวอ่านจึงมีระดับความสูงการบินที่ลดลงเหลือประมาณ 10 นาโนเมตร ในขณะที่ฮาร์ดดิสก์กำลังทำงาน ซึ่งเอกสารนี้ความสูงการบินของหัวอ่านเป็นตัวชี้วัดหนึ่งที่ใช้เป็นรับประกันความน่าเชื่อถือของการผลิตฮาร์ดดิสก์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าสามารถทำงานได้ในระยะเวลาที่ยาวนาน โดยการวัดประสิทธิภาพการบินของหัวอ่าน ยังทำเพื่อตรวจสอบการออกแบบ Air-bearing Surface ว่าทำให้ระดับการสูงการบินของหัวอ่านเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ โดยการวัดค่าความสูงการบินของหัวอ่าน จะถูกทำการวัดโดยเครื่องวัดค่าความสูงการบินของหัวอ่าน ซึ่งต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ทางแสงที่สำคัญในการวัดค่าความสูงการบินของหัวอ่าน คือ ค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน (Complex Refractive Index) ของพื้นผิวของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ซึ่งปัจจุบันในอุตสาหกรรมใช้เครื่องวัดความสูงการบินแบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบมาตรฐาน (KLA Tencor D6) ซึ่งจะทำการวัดระยะห่างระหว่างฮาร์ดดิสก์กับสื่อบันทึกข้อมูล (Media) โดยเครื่อง KLA Tencor D6 เป็นเครื่องทดสอบการบินของหัวอ่านที่รู้จักกันดีในอุตสาหกรรมซึ่งให้ความแม่นยำในการวัดสูงการบินและมีความเที่ยงตรงที่ดี

ก่อนการใช้งานเครื่อง KLA Tencor D6 ต้องทำป้อนค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน (n, k) ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ให้กับเครื่อง KLA Tencor D6 ก่อน โดยค่าพารามิเตอร์นี้จะถูกวัดจากกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งไม่ได้ทำการวัดกับหัวอ่านทุก ๆ ตัว เนื่องจากต้องทำการวัดค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนโดยใช้เครื่องอิลิปโซมิเตอร์ ซึ่งสามารถทำการวัดได้กับวัสดุทดสอบ โดยที่วัสดุที่จะนำไปทดสอบต้องอยู่ในแนวระนาบเท่านั้น ส่งผลให้ต้องทำการตัดโครงสร้างของ HGA ให้เรียบแบนก่อน ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างของ HGA ถูกทำลายไป จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดแนวทางในการพัฒนาการวัดโดยไม่ต้องทำลายโครงสร้างของ HGA และสามารถวัดได้กับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ทุกตัว

โดยค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน ประกอบไปด้วยค่าพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ n ซึ่งเป็นค่าดัชนีการหักเหแสงของวัสดุที่แสดงถึงความเร็วเฟส (Phase Velocity) และ k คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งค่า n, k ถูกใช้ในการคำนวณหาความสูงการบินของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ โดยเครื่อง KLA Tencor D6 ที่ซึ่งเครื่องนี้ไม่สามารถหาค่า n, k ของวัสดุได้ในตัวมันเอง อย่างไรก็ตามค่า n, k สามารถวัดได้โดยใช้เครื่องอิลิปโซมิเตอร์อุตสาหกรรม แต่ด้วยข้อจำกัดเรื่องขนาดของลำแสงที่ใช้ในการวัดซึ่งมีขนาดใหญ่ ซึ่งโดยปกติแล้วค่า n, k ของแต่ละสไลเดอร์ (สไลเดอร์เป็นชิ้นส่วนหนึ่งที่อยู่บน Head gimbal Assembly (HGA)) ไม่สามารถวัดได้ เนื่องจากมีขนาดเล็กและติดตั้งอยู่บน HGA ทำให้ไม่สามารถทำการวัดได้ ซึ่งตัวอย่างของ HGA แสดงดังรูปที่ 1 การวัดหาค่า n, k จึงถูกทำการวัดจากสไลเดอร์บาร์ เพื่อเป็นตัวแทนของค่า n, k ของสไลเดอร์ในรอบการผลิตนั้น ๆ อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะทำการวัดค่า n, k จากกลุ่มตัวอย่างจำนวนหนึ่ง แต่ก็ไม่ได้เป็นค่า n, k จริงที่ได้จากวัสดุ นั้น ๆ ดังนั้นเมื่อนำค่า n, k ซึ่งเป็นตัวแทนไปทำการวัดหาค่าความสูงการบินของหัวอ่านจึงเกิดความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเนื่องจากไม่ได้เป็นค่า n, k ของหัวอ่านที่ทำการวัดจริง (สาเหตุที่ค่า n, k ของหัวอ่านแต่ละตัวไม่เท่ากันนั้น เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตสไลเดอร์ทั้งในขั้นตอนการล้าง ชัด และกัดเซาะเพื่อสร้างพื้นผิว Air Bearing Surface ซึ่งส่งผลให้คุณสมบัติการสะท้อนของแสงของสไลเดอร์เกิดเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ค่า n, k ของหัวอ่านแต่ละตัวมีค่าที่แตกต่างกัน) ดังนั้นการวัดการวัดค่าความสูงการบินของหัวอ่านของเครื่อง KLA Tencor D6 จึงมีความจำเป็นที่ต้องใช้ค่า n, k ที่ได้จากวัสดุจริง

ค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ เป็นค่าที่จำเป็นต่อการวัดความสูงการบินของหัวอ่าน นอกจากนี้วิศวกรยังนำเอาค่าพารามิเตอร์ทางแสงที่ได้ไปใช้ในการออกแบบ พัฒนาพื้นผิว Air Bearing Surface และประเมินประสิทธิภาพของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ซึ่งค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนยังถูกใช้ในหลาย ๆ หน่วยงานของบริษัท เช่น ส่วนของวิจัยและพัฒนา สำนักงานใหญ่ และในสายการผลิตฮาร์ดดิสก์ (ในเครื่อง KLA Tencor D6) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการรับส่งข้อมูลไปยังหน่วยงานต่าง ๆ ภายในบริษัท ซึ่งเลือกใช้การรับส่งข้อมูลผ่านคลาวด์ส่วนบุคคล (Private Cloud)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยนำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตบนทุกสรรพสิ่ง (Internet of Thing : IoT) ซึ่งถูกออกแบบให้สามารถรับส่งข้อมูลระหว่างฮาร์ดแวร์บนคลาวด์ได้ ด้วยเทคนิคนี้เองทำให้สามารถรับส่งข้อมูลค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนไปได้แม้จะอยู่กันคนละสถานที่ โดยโปรโตคอลที่ช่วยผลักดันให้เกิดการรับส่งข้อมูลบนอุปกรณ์ IoT ได้แก่ โปรโตคอลเอ็มคิวทีที (Message Queuing Telemetry Transport : MQTT) ซึ่งเป็นโปรโตคอลที่ถูกออกแบบให้ทำงานบนอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานน้อย นอกจากนี้ยังเป็นโปรโตคอลที่มีรับส่งข้อมูลที่ใช้เพย์โหลด (Payload) ในการรับส่งข้อมูลที่น้อยกว่าโปรโตคอลอื่น ๆ ดังนั้นจึงถูกเรียกว่าเป็น Light-Weight Protocol โดยโปรโตคอลเอ็มคิวทีทีถูกใช้ในหลายอุปกรณ์ IoT เพื่อที่จะทำให้สามารถส่งข้อมูลได้รวดเร็ว และทันที ซึ่งโปรโตคอลเอ็มคิวทีทีถูกออกแบบให้มีคุณภาพของการให้บริการ (QoS : Quality of Service) ของข้อมูลที่มีขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามมันเป็นเรื่องที่ทำหายในการที่จะตรวจสอบว่าการรับส่งข้อมูลเหล่านี้มีความถูกต้อง แม่นยำเมื่อมีจำนวนผู้ส่งข้อมูลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งลำดับของการรับข้อมูลก่อนหรือหลังเป็นสิ่งจำเป็นในสายการผลิต เนื่องจากวิศวกรต้องสามารถทราบค่า n, k ของหัวอ่านแต่ละตัวได้ ดังนั้นในการใช้งานต้องมีการตรวจสอบข้อมูลของค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนซึ่งถูกส่งจากเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์ ไปยังหน่วยงานต่าง ๆ ว่ามีความล่าช้าเกิดขึ้นในกระบวนการรับส่งข้อมูลหรือไม่



รูปที่ 2- 6 ตัวอย่างของสไลเดอร์ที่ถูกติดตั้งบน HGA

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาระบบการวัดค่าคุณสมบัติทางแสงสำหรับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์และทำการรับส่งข้อมูลบนคลาวด์ ซึ่งระบบสามารถวัดค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน (n, k) บน HGA แต่ละตัวได้ทันที ผู้วิจัยได้นำเสนอเทคนิคใหม่โดยใช้ไมโครอิลิปโซมิเตอร์ร่วมกับอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบเลื่อนเฟสเพื่อทำการวัดค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน โดยมีขนาดของลำแสงน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร โดยไมโครอิลิปโซมิเตอร์ใช้คุณสมบัติพิเศษของเลนส์ใกล้วัตถุที่มีค่ารับแสงที่กว้าง (High Numerical Aperture : NA) ซึ่งจากคุณสมบัติของเลนส์ใกล้วัตถุทำให้ได้แสงในมุมตกกระทบที่หลากหลาย โดยเทคนิคการเลื่อนเฟสทางแสงถูกพัฒนาขึ้นโดยการปรับมุม Fast Axis ของควอเตอร์เวฟเพลต เพื่อแยกองค์ประกอบทางแสงระหว่าง s-polarized และ p-polarized ซึ่งได้จากแสงที่เกิดจากการสะท้อนกลับมาที่เลนส์ใกล้วัตถุ โดยที่ไมโครอิลิปโซมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้นจะมีขนาดลำแสงที่เล็ก โดยมีขนาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร ค่า n, k จะถูกส่งจากเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์ไปยังคลาวด์ส่วนบุคคล (Private Cloud) ของบริษัท โดยในคลาวด์ส่วนบุคคลจะใช้โปรโตคอลเอ็มคิวทีที (MQTT :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

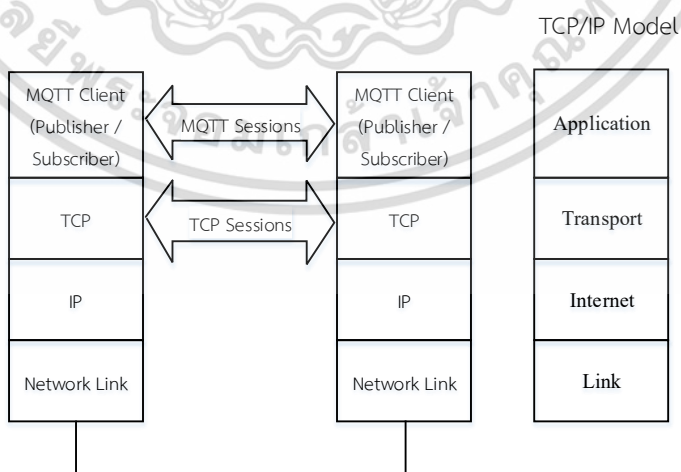
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Message Queuing Telemetry Transport) เพื่อใช้กระจายข้อมูลไปยังผู้ใช้ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งระบบนี้สามารถวัดค่าดัชนีการหักเหแสงที่ได้จากหัวอ่านจริงที่กำลังวัด ซึ่งค่าที่ได้จากเครื่องไมโครออปติคัลมิเตอร์นี้จะทำให้เครื่อง KLA Tencor D6 สามารถวัดค่าความสูงการบินของหัวอ่านได้อย่างถูกต้องมากขึ้น เนื่องจากเป็นค่า n, k จริงของหัวอ่านตัวนั้น ๆ

2.4 โพรโตคอลเอ็มคิวทีที

ในการรับส่งข้อมูลในระบบเครือข่ายที่ต้องการเวลาในการรับส่งข้อมูลในฐานเวลาจริง (Real Time) สิ่งที่ต้องเผชิญหน้าคือ ปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบเครือข่าย เช่น เครือข่ายไร้สายที่ไม่มีเสถียรภาพ มีการหน่วงเวลาในการรับส่งสูง (High Latency) อันเกิดจากสิ่งแวดล้อมในการส่ง เช่น มีจำนวนผู้ใช้งานมาก หรือมีการรบกวนทางความถี่ของอุปกรณ์รอบข้าง เป็นต้น อุปกรณ์บางอย่างใช้พลังงานต่ำ ซึ่งอุปกรณ์บางส่วนมีการใช้แหล่งพลังงานเป็นแบตเตอรี่ โดยปกติแล้วเราสามารถใช้อุปกรณ์ได้ แต่อย่างไรก็ตามมีโพรโตคอลซึ่งถูกออกแบบเพื่อให้มีข้อมูลที่ใช้ในการรับส่งที่น้อยกว่าโพรโตคอล HTTP และสามารถทำการรับส่งข้อมูลได้ดีกว่าเมื่อใช้งานบนระบบเครือข่ายที่ไม่มีเสถียรภาพ (Unreliable Network) ซึ่งส่งผลให้เกิดการเชื่อมต่อที่ต่อเนื่อง โดยโพรโตคอลเอ็มคิวทีที (Message Queuing Telemetry Transport : MQTT) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถรับส่งโดยใช้ข้อมูลที่ลดลง และสามารถทำงานได้บนระบบเครือข่ายที่ไม่มีเสถียรภาพ นอกจากนี้โพรโตคอลเอ็มคิวทีทีที่สามารถรับส่งข้อมูลให้กับหลาย ๆ อุปกรณ์ที่ต้องการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันแบบฐานเวลาจริง และใช้แบนด์วิดท์ของระบบเครือข่ายน้อยที่สุด โดยโพรโตคอลเอ็มคิวทีทีที่เป็นโพรโตคอลสามารถเชื่อมต่อระหว่างเครื่องไปเครื่อง (Machine-to-Machine : M2M)

โพรโตคอลเอ็มคิวทีทีทำงานบนพื้นฐานของ Publish-Subscribe ซึ่งทำงานบนโพรโตคอลที่ซีพี/ไอพี (Transmission Control Protocol / Internet Protocol : TCP/IP) จากภาพแสดงโพรโตคอลเอ็มคิวทีทีบนโพรโตคอลที่ซีพี/ไอพี



รูปที่ 2- 7 การรับส่งข้อมูลผ่านโพรโตคอลเอ็มคิวทีที

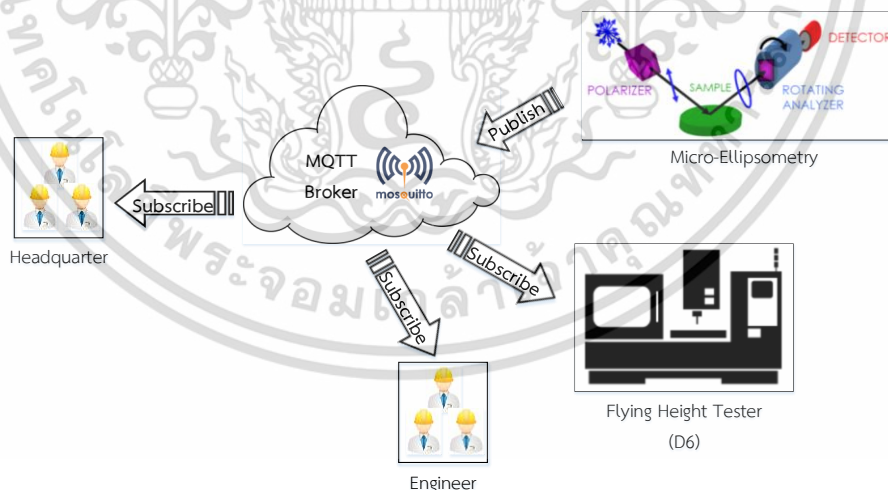
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปแสดงการรับส่งข้อมูลเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ซีพี/ไอพี (TCP/IP Model) ซึ่งเลเยอร์ที่ 1 ถึง 3 ของโปรโตคอลเอ็มคิวทีที่ทำงานอยู่บนโปรโตคอลที่ซีพี/ไอพี แต่ในเลเยอร์ที่ 4 ซึ่งเป็นแอปพลิเคชันเลเยอร์ของโปรโตคอลที่ซีพี/ไอพี จะเปลี่ยนเป็นการทำงานของโปรโตคอลเอ็มคิวทีที่แทน โดยเวอร์ชันของโปรโตคอลเอ็มคิวทีที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ เวอร์ชัน 3.1.1 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ถูกกำกับโดยสมาคม OASIS (Organization for the Advancement of Structured Information Standards) ซึ่งต่อมากลายมาเป็นมาตรฐานของ ISO (ISO/IEC 20922) ในปี ค.ศ. 2016

โปรโตคอลเอ็มคิวทีที่มีการรับส่งข้อมูลที่น้อยกว่าโปรโตคอล HTTP ดังนั้นจึงเป็นโปรโตคอลที่มีความน่าสนใจหนึ่ง เนื่องจากมีการรับส่งข้อมูลเข้าใกล้ฐานเวลาจริง (Real Time) ด้วยแบบจำลอง Publish-Subscribe ซึ่งโปรโตคอลเอ็มคิวทีที่ได้รับความนิยมมากบนอินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง (Internet of Thing : IoT) ,M2M และโปรเจกต์สมองกลฝังตัว (Embedded Projects) นอกจากนี้โปรโตคอลเอ็มคิวทีที่ยังทำให้เว็บแอปพลิเคชัน และแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์เคลื่อนที่มั่นใจว่าการรับส่งข้อมูลมีความมั่นใจและมีประสิทธิภาพในการกระจายข้อมูล

2.4.1 การทำงานแบบ Publish-Subscribe

ก่อนการใช้งานโปรโตคอลเอ็มคิวทีที่ควรเข้าใจหลักการ Publish-Subscribe ก่อนในการรับส่งแบบ Publish-Subscribe ผู้ใช้งาน (Client) เป็นคนที่ส่งข้อความ (Publish) ของตนเอง และผู้ใช้งานทำหน้าที่รับข้อความ โดยที่ผู้ใช้งานไม่รู้เกี่ยวกับผู้ใช้งานรายอื่น ๆ โดยผู้ใช้งานสามารถส่ง (Publish) ข้อความที่ระบุหัวเรื่อง (Topic) ไปยังผู้ใช้งานที่สนใจในหัวเรื่องที่ต้องการให้กับผู้ใช้งานรายอื่น ๆ



รูปที่ 2- 8 ไดอะแกรมการเชื่อมต่อของโปรโตคอลเอ็มคิวทีที่เข้ากับโบรกเกอร์

โดยหลักการ Publish-Subscribe ประกอบด้วยโบรกเกอร์ (MQTT Broker) ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องแม่ข่าย ซึ่งผู้ใช้งานทุกคนจะเชื่อมต่อเข้าไปที่โบรกเกอร์ โดยเมื่อผู้ใช้งานต้องการส่งข้อความผ่านโบรกเกอร์ (ผู้ใช้งานที่ส่งข้อความ จะถูกเรียกว่าเป็น Publisher) โดยโบรกเกอร์จะทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเพื่อกระจายไปยังผู้ใช้งานที่ต้องการรับเอกสารนั้น โดยเอกสารนี้จะไม่ถูกรับรู้โดยผู้ใช้งานที่ส่งข้อความ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

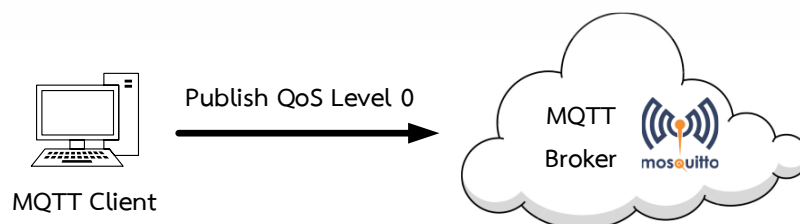
หน้าที่กลั่นกรองข้อความที่เข้ามาและกระจายข้อความต่าง ๆ ไปให้กับผู้ใช้งานคนอื่น ๆ ที่มีความสนใจข้อความในหัวเรื่องนั้น ๆ ซึ่งผู้ใช้งานที่ลงทะเบียนกับโบรกเกอร์และมีความสนใจในหัวเรื่อง (Topic) จะถูกเรียกว่าเป็นสมาชิก (Subscribers) โดยทั้งผู้ส่งข้อความ (Publishers) และสมาชิก (Subscribers) ต้องทำการเชื่อมต่อเข้ามาที่โบรกเกอร์ก่อน ซึ่งไดอะแกรมที่แสดงการเชื่อมต่อระหว่างโบรกเกอร์ ผู้ส่งข้อความ และสมาชิกแสดงดังรูปที่ 2- 8

จากรูปที่ 2- 8 อธิบายหลักการเชื่อมต่อระหว่างผู้ส่งข้อความ (Publisher) สมาชิก (Subscriber) และโบรกเกอร์ (Broker) ซึ่งจากตัวอย่างผู้ส่งข้อความคือเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์ ต้องการส่งข้อมูลค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน ซึ่งก็คือค่า n, k ให้กับบุคลากรที่สำนักงานใหญ่ซึ่งอยู่ต่างประเทศ และวิศวกรประจำโรงงานเพื่อนำข้อมูล n, k ที่ได้ไปใช้ในการตรวจสอบคุณภาพ ซึ่งทั้งวิศวกรและสำนักงานใหญ่ต้องทำการลงทะเบียนหัวเรื่องที่เครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์ส่ง ซึ่งขณะนี้เครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์มีบทบาทเป็นผู้ส่งข้อความ (Publisher) ซึ่งทั้งผู้ส่งและสมาชิกทั้งหมดจะต้องเชื่อมต่อเข้ามาที่โบรกเกอร์ ซึ่งโบรกเกอร์จะทำการกรองข้อความตามที่สมาชิกลงทะเบียนหัวเรื่องอะไรไว้ให้ถูกต้อง เพื่อที่เมื่อผู้ส่งข้อความส่งข้อความหัวเรื่องที่ตรงกับสมาชิก เครื่องโบรกเกอร์ก็จะทำหน้าที่ส่งต่อข้อความให้กับสมาชิกทั้งหมดที่ลงทะเบียนในหัวเรื่องเดียวกัน

2.4.2 คุณภาพของการให้บริการ (Quality of Service : QoS)

คุณภาพของการให้บริการบนโปรโตคอลเอ็มคิวทีที แพ็คเก็ตของสมาชิก 1 คนสามารถร้องขอไปที่โบรกเกอร์เพื่อที่จะลงทะเบียนได้หลายหัวเรื่อง (Many Topics) แต่แพ็คเก็ตที่ลงทะเบียน 1 หัวเรื่อง จะถูกรวมระหว่างหัวเรื่องหนึ่งกับการบริการคุณภาพของการให้บริการไว้ในโปรโตคอลเอ็มคิวทีที โดยลำดับของการรับข้อมูลของค่าการสะท้อนกลับของแสงที่วัดได้เป็นเรื่องสำคัญที่ผู้ใช้งานระบบต้องการเพื่อติดตามข้อมูลการวัดของหัวอ่านทุกตัว ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องพิจารณาระดับคุณภาพของการให้บริการ (Quality of Service : QoS) เพื่อตอบสนองกับลักษณะของการรับส่งข้อมูลประเภทต่าง ๆ รวมถึงความล่าช้า (Latency) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการสื่อสารข้อมูล โปรโตคอลเอ็มคิวทีทีเป็นโปรโตคอลที่ผู้รับและผู้ส่งข้อมูลทำการตกลงกันก่อนการรับส่งข้อมูลเพื่อรับประกันว่าข้อมูลจะต้องถูกส่งได้ ซึ่งระดับคุณภาพการให้บริการ (QoS) ในโปรโตคอลเอ็มคิวทีทีแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ดังนี้

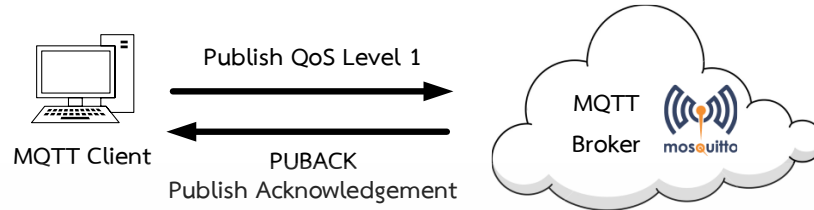
- ระดับที่ 0 (At Most Once) เป็นการส่งข้อมูลจากผู้ส่งเพียงหนึ่งครั้ง และไม่รอต่อกลับ ดังนั้นหากเกิดการสูญหายของข้อมูล โปรโตคอลจะไม่ทำการส่งข้อมูลซ้ำอีกครั้ง



รูปที่ 2- 9 ระดับคุณภาพการให้บริการ ระดับที่ 0 (At Most Once)

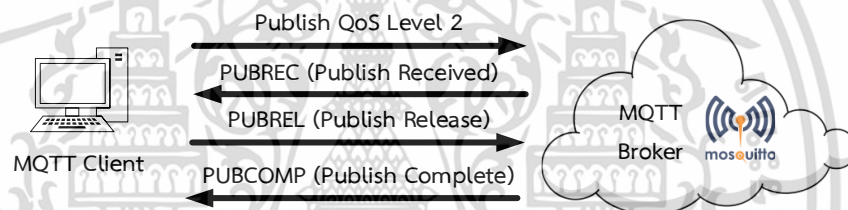
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระดับที่ 1 (At Least Once) เป็นการส่งข้อมูลจากผู้ส่งเพียงหนึ่งครั้ง โดยจะรอการตอบกลับจากโบรกเกอร์ โดยถ้าโบรกเกอร์แจ้งว่าเกิดการสูญหาย ระบบจะทำการส่งข้อมูลใหม่ ดังนั้นเป็นการรับประกันว่าส่งข้อมูลถึงผู้รับ



รูปที่ 2- 10 ระดับคุณภาพการให้บริการ ระดับที่ 1 (At Least Once)

- ระดับที่ 2 (Exactly Once) เป็นการส่งข้อมูลจากผู้ส่งเพียงหนึ่งครั้ง โดยใช้หลักการของ 4-Way Handshake



รูปที่ 2- 11 ระดับคุณภาพการให้บริการ ระดับที่ 2 (Exactly Once)

2.4.3 การประเมินประสิทธิภาพโดยใช้ราวด์ทริปตาม (Round Trip Time)

Round Trip Time : RTT เป็นระยะเวลาที่มีหน่วยเป็น มิลลิวินาที ซึ่งทำการวัดระยะเวลาตั้งแต่การร้องขอใช้งานเครือข่ายจากต้นทางไปถึงปลายทาง และกลับมาที่ต้นทางอีกครั้งหนึ่ง ซึ่ง RTT มีความสำคัญมาในระบบเครือข่ายเนื่องจากมันสิ่งที่ใช้ในการหาประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อเครือข่ายบนเครือข่ายท้องถิ่น (Local Area Network : LANs) หรือเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ซึ่งค่า RTT นั้นผู้ดูแลระบบเครือข่ายนิยมใช้ในการหาความน่าเชื่อถือหรือประสิทธิภาพของเครือข่าย เช่น การวัดความเร็ว และความน่าเชื่อถือของการเชื่อมต่อระบบเครือข่าย เป็นต้น ซึ่งการลดค่า RTT เป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบระบบเครือข่าย เนื่องจากมัน RTT เป็นตัวบอกลถึงระยะเวลาที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลต่อหนึ่งแพ็คเก็ต ดังนั้นถ้ามีค่า RTT มาก จะหมายถึงแพ็คเก็ตจะต้องใช้ระยะเวลาในการเดินทางที่ยาวนานขึ้น

```

Command Prompt
(c) 2018 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\weerayuth>ping www.google.co.th

Pinging www.google.co.th [172.217.31.67] with 32 bytes of data:
Reply from 172.217.31.67: bytes=32 time=32ms TTL=49
Reply from 172.217.31.67: bytes=32 time=30ms TTL=49
Reply from 172.217.31.67: bytes=32 time=29ms TTL=49
Reply from 172.217.31.67: bytes=32 time=30ms TTL=49

Ping statistics for 172.217.31.67:
    Packets: Sent = 4, Received = 4, Lost = 0 (0% loss),
    Approximate round trip times in milli-seconds:
        Minimum = 29ms, Maximum = 32ms, Average = 30ms

```

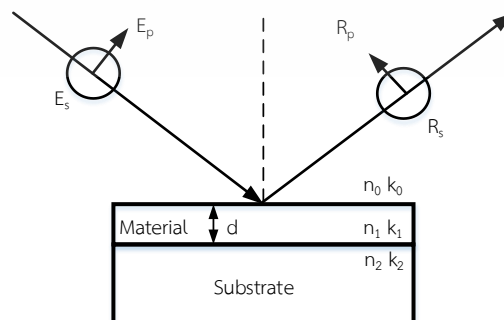
รูปที่ 2- 12 ผลลัพธ์การหาค่า Round-trip Time โดยใช้คำสั่ง ping

โดยปกติแล้วระบบปฏิบัติการส่วนใหญ่จะมีเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการเชื่อมต่อหนึ่งนั่นคือ คำสั่ง “ping” ซึ่งทำงานอยู่บนโปรโตคอลไอซีเอ็มพี (Internet Control Message Protocol: ICMP) โดยปกติแล้วคำสั่ง “ping” เป็นคำสั่งพื้นฐานที่มีอยู่ในทุก ๆ ระบบปฏิบัติการ โดยคำสั่ง “ping” สามารถประมาณเวลาของการส่งแพ็กเก็ตจนถึงผู้รับตอบกลับมาที่ผู้ส่ง โดยใช้ค่า RTT ซึ่งตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2- 12 ซึ่งแสดงผลการใช้คำสั่ง “ping” เพื่อทำการทดสอบการเชื่อมต่อไปที่เว็บไซต์ www.google.co.th ซึ่งพบว่ามีค่า RTT สูงสุด คือ 32 มิลลิวินาที ซึ่งก็หมายถึงเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากเครื่องคอมพิวเตอร์ไปที่เว็บไซต์กูเกิลและผู้รับตอบกลับมาที่เครื่องคอมพิวเตอร์ของผู้ส่งอีกครั้งใช้เวลาไปทั้งสิ้น 32 มิลลิวินาที

2.5 วรรณกรรม หรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไมโครอิลิปโซมิเตอร์

อิลิปโซมิเตอร์เป็นเครื่องวัดคุณสมบัติทางแสงของวัสดุที่มีการใช้งานในภาคอุตสาหกรรม ตั้งแต่ปี ค.ศ.1960 โดยหลักการทำงานของอิลิปโซมิเตอร์ คือ การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงของโพลาไรเซชันทางแสงที่ถูกสะท้อนกลับจากวัสดุ



รูปที่ 2- 13 การสะท้อนกลับของแสงที่ตกกระทบของฟิล์มทดสอบซึ่งมีความหนา d เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการชื้อหาเท่านั้น เมื่อผู้ยูเอชเห็นใบเซอร์โชนหาในการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการคำนวณสัมพัทธ์ระหว่างแอมพลิจูดและเฟสของแสงสะท้อนและแสงที่ตกกระทบ จะถูกเรียกว่าพารามิเตอร์อีลิปโซเมทริกซ์ (Ellipsometry Parameter) เพื่อที่จะหาค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนและความหนาของฟิล์มทดสอบ ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2-39

$$E_p = E_{0p} e^{i\alpha_p} \quad (2-39)$$

$$E_s = E_{0s} e^{i\alpha_s} \quad (2-40)$$

ซึ่งสมการของแสงสะท้อนก็สามารถเขียนได้ในลักษณะเดียวกันดังนี้

$$R_p = R_{0p} e^{i\beta_p} \quad (2-41)$$

$$R_s = R_{0s} e^{i\beta_s} \quad (2-42)$$

โดยจากสมการที่ 2-39 ถึง 2-42 ให้ทำการกำจัดเทอมของ $\omega t - kz$ ออกไป โดยการวัดค่า R_p และ R_s ว่ามีความสัมพันธ์ E_p และ E_s ซึ่งโดยทั่วไปแล้ววัสดุจะมีการดูดกลืนแสง ซึ่งแสงที่ตกกระทบจะถูกลดทอนและเกิดการเลื่อนเฟสทางแสงขึ้น ซึ่งในการอธิบายพฤติกรรมนี้จะกำหนดค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนเป็น ρ_p และ ρ_s ดังสมการ

$$R_p = \rho_p E_p \quad (2-43)$$

$$R_s = \rho_s E_s \quad (2-44)$$

โดยทั่วไปแล้ว

$$\rho_m = \frac{R_m}{E_m} \quad m = p, s \quad (2-45)$$

แทนที่สมการ 2-39 ถึง 2-42 ในสมการที่ 2-45 จะได้

$$\rho_m = \left(\frac{R_{0m}}{E_{0m}} \right) e^{i(\beta_m - \alpha_m)} \quad m = p, s \quad (2-46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูง และขอแจ้งให้ทราบว่ากรมฯ ไม่สามารถรับผิดชอบต่อความเสียหายใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho = \left(\frac{\rho_p}{\rho_s} \right) = \left(\frac{R_{0p}/E_{0p}}{E_{0s}/R_{0s}} \right) e^{i(\beta-\alpha)} \quad (2-47)$$

โดยที่ $\alpha = \alpha_p - \alpha_s$ และ $\beta = \beta_p - \beta_s$ โดยปริมาตรหรือขนาดของ α และ β สามารถอธิบายเฟสก่อนและหลังการสะท้อนของแสงตามลำดับ ซึ่งตัวประกอบในสมการที่ 2-47 สามารถเขียนในรูปของ \tan ของมุม ψ ดังนี้

$$\tan \psi = \frac{R_{0p}/E_{0p}}{E_{0s}/R_{0s}} \quad (2-48)$$

และมุมเฟส (Phase Angle)

$$\Delta = \beta - \alpha = (\beta_p - \beta_s) - (\alpha_p - \alpha_s) \quad (2-49)$$

จากสมการที่ 2-48 ถึง 2-49 สามารถอธิบายสมการ 2-50 ได้ดังนี้

$$\rho = \tan \psi e^{i\Delta} \quad (2-50)$$

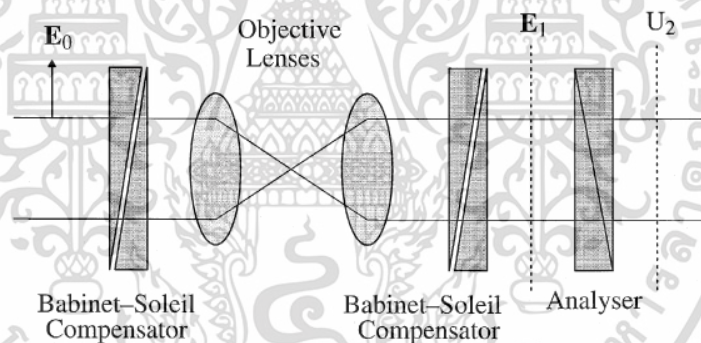
ดังนั้นอิลิปโซมิเตอร์เกี่ยวข้องกับการวัดการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดที่อยู่ในรูปของ $\tan \psi$ และ Δ การเปลี่ยนแปลงเฟส ขนาดของ ψ และ Δ เป็นฟังก์ชันของค่าคงที่ทางแสงของตัวกลาง ฟิล์มบาง และซับสเตรท ความยาวคลื่นของแสง มุมตกกระทบ และความหนาหรือบางของฟิล์ม เป็นปัจจัยที่ส่งผลกับสมการที่ 2-51

$$\rho = \tan \psi e^{i\Delta} = f(n, k, d) \quad (2-51)$$

ซึ่งสมการที่ 2-51 ถูกเรียกว่าเป็น สมการพื้นฐานของอิลิปโซมิเตอร์ ซึ่งในอุดมคติแล้วการวัด ψ และ Δ ค่า n, k และ d สามารถคำนวณหาได้ ซึ่งจากสมการที่ 2-51 ทำให้ทราบว่าเราสามารถนำค่า ψ และ Δ เพื่อไปหาค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน ซึ่งประกอบไปด้วยค่า n และ k โดยที่ค่า n เป็นค่าดัชนีการสะท้อนแสง (Refractive Index) ซึ่งเป็นจำนวนจริง ส่วนค่า k เป็นค่าสัมประสิทธิ์การสูญหาย (Extinction Coefficient) ของวัสดุ ซึ่งอยู่ในเทอมของจำนวนเชิงซ้อน (Complex Number) ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการหาค่า n, k ของวัสดุ เพื่อนำไปใช้หาค่าความสูงการบิ่นของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ โดยใช้เครื่อง KLA Tencor D6 ซึ่งเป็นเครื่องวัดหาค่าความสูงการบิ่นของหัวอ่านซึ่งมีประสิทธิภาพสูง และใช้ในภาคอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัจจุบัน ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิชาการหาค่า n, k โดยตรง ซึ่งไม่ต้องทำการหาค่าพารามิเตอร์อีลิปโซเมตริกซ์ ψ (Ellipsometric Parameter) ก่อน แต่นำเสนอเทคนิคที่ในการหาค่าเดลต้า (Δ : Delta) โดยใช้ไมโครอีลิปโซมิเตอร์ ร่วมกับการเลื่อนเฟสทางแสง ซึ่งถ้ากล่าวถึงไมโครอีลิปโซมิเตอร์ มีบทความที่นำเสนอ คือ “On the General Properties of Polarized Light Conventional and Confocal Microscopes” [3] ซึ่งกล่าวถึงการพัฒนาไมโครอีลิปโซมิเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์สำหรับ คือ เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้เลนส์ใกล้วัตถุที่มีค่ารับแสงมาก (High Numerical Aperture) ซึ่งสาเหตุหนึ่งที่มีการเลือกใช้เลนส์ใกล้วัตถุที่มีค่ารับแสงมาก เนื่องจากทำให้แสงตกกระทบที่ถูกสะท้อนกลับเข้ามาที่เลนส์ใกล้วัตถุ มีมุมตกกระทบของแสงที่หลากหลายมุมตั้งแต่มุม 0 องศา (ซึ่งเป็นมุมที่ตั้งฉากกับวัสดุทดสอบ) จนถึงมุมซึ่งแปรผันตามขนาดของรูปรับแสงของเลนส์ใกล้วัตถุ นอกจากนี้ในบทความยังกล่าวถึงหลักการของ Vectorial Ray-tracing ซึ่งอธิบายการทำงานของอุปกรณ์ทางแสง โดยใช้การสร้างแบบจำลองแสงด้วยเมทริกซ์โจนส์ (Jones Matrices) ซึ่งเริ่มต้นจากการกำหนดให้เวกเตอร์สนามไฟฟ้า คือ $E_0 = (1,0,0)$ หลังจากนั้นได้อธิบายโครงสร้างของตัวชดเชยบาบินต์โซเลย์ (Babinet-soleil Compensator) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2- 14 ซึ่งประกอบด้วยเลนส์ใกล้วัตถุ และอุปกรณ์ชดเชยที่วางอยู่ด้านหน้าและด้านหลังเลนส์ใกล้วัตถุ



รูปที่ 2- 14 ไดอะแกรมการเชื่อมต่ออุปกรณ์แสงของไมโครสโคปที่ใช้หลักการโพลาไรซ์ [3]

จากรูปที่ 2- 14 เมื่อเวกเตอร์สนามไฟฟ้า E_0 วิ่งผ่านตัวชดเชยบาบินต์โซเลย์ และผ่านเลนส์ใกล้วัตถุจนมาถึงตำแหน่งของสนามไฟฟ้า E_1 สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$E_1 = BS_2 \cdot R^{-1} \cdot L^{-1} \cdot I_2 \cdot R \cdot R^{-1} \cdot I_1 \cdot L \cdot R \cdot BS_1 \cdot E_0 \quad (2-39)$$

โดยที่ BS เป็นอุปกรณ์แยกลำแสง (Beam Splitter)

R เป็นเมทริกซ์สำหรับการหมุน

L เป็นการเปลี่ยนแปลงเวกเตอร์ไฟฟ้าเมื่อผ่านเลนส์ใกล้วัตถุ

I เป็นเมทริกซ์แสดงค่ามุมและโพลาไรเซชันของแสงเมื่อผ่านเลนส์ใกล้วัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

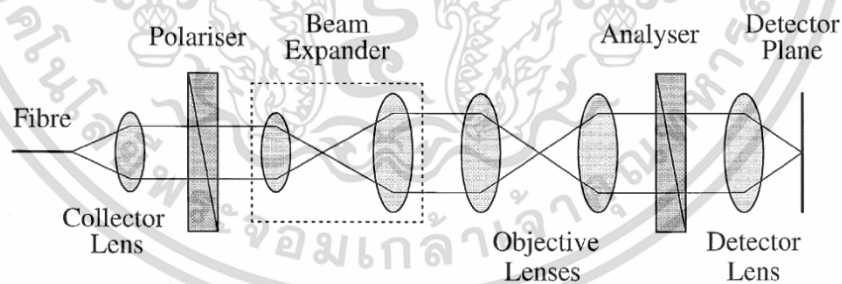
โดยที่ $R = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi & 0 \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, $L = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}$ และ $I = \sqrt{\cos\theta} \begin{bmatrix} \tau_p & 0 & 0 \\ 0 & \tau_s & 0 \\ 0 & 0 & \tau_p \end{bmatrix}$

โดยที่ r, θ, ϕ เป็นพารามิเตอร์ที่อยู่ในพิกัดทรงกลม (Spherical Polar Coordinates) และ τ_p, τ_s เป็นค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของเฟรเนล (Fresnel Transmission Coefficients) ซึ่งผลลัพธ์สุดท้ายของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าของแสงที่ถูกสะท้อนกลับ E_R แสดงดังสมการที่ 2-40

$$E_R = \begin{bmatrix} K^- + K^+ \cos 2\phi \\ K^+ \sin 2\phi \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2-40}$$

โดยที่ $K^+ = (\tau_{p1}\tau_{p2}\Gamma_p + \tau_{s1}\tau_{s2}\Gamma_s) \cos\theta$
 $K^- = (\tau_{p1}\tau_{p2}\Gamma_p - \tau_{s1}\tau_{s2}\Gamma_s) \cos\theta$

โดยจากสมการแสงที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยได้ทำการทดลองจริง โดยทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์แสง ดังไดอะแกรมต่อไปนี้

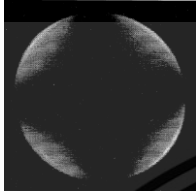
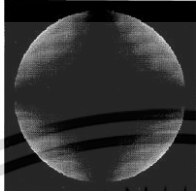
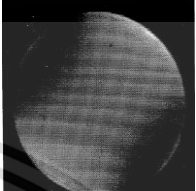
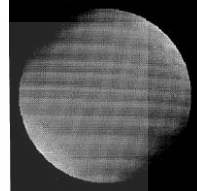

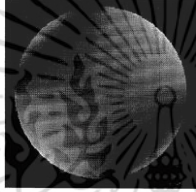
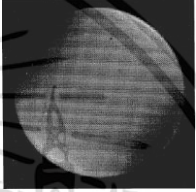
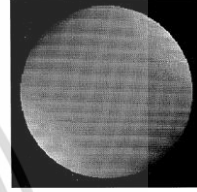



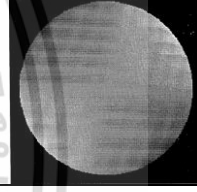


รูปที่ 2- 15 ไดอะแกรมทางแสงในการทดลองโพลาไรซ์ไมโครสโคปร่วมกับเลนส์ใกล้วัตถุ [3]

จากรูปที่ 2- 15 เมื่อแสงเลเซอร์ต้นกำเนิด (Laser Source) วิ่งผ่านคอลเลคเตอร์เลนส์แล้วจะแปลงเป็นแสงโพลาไรซ์โดยโพลาไรเซอร์ จากนั้นแสงที่ถูกโพลาไรซ์จะถูกขยายลำแสงให้มีขนาดใหญ่ขึ้นก่อนเข้าเลนส์ใกล้วัตถุ เหตุผลที่ต้องขยายลำแสงก่อนที่จะเข้าเลนส์ใกล้วัตถุ เพื่อที่จะทำให้ลำแสงเมื่อผ่านเลนส์ใกล้วัตถุมีขนาดเล็กลงมากตามหลักการหักเหแสงของเลนส์ ส่งผลให้ลำแสงที่ได้มีขนาดเล็ก (Small Spot Size) ซึ่งมีประโยชน์ คือ แสงที่มีขนาดเล็กจะสามารถส่องลงบนวัสดุที่มี

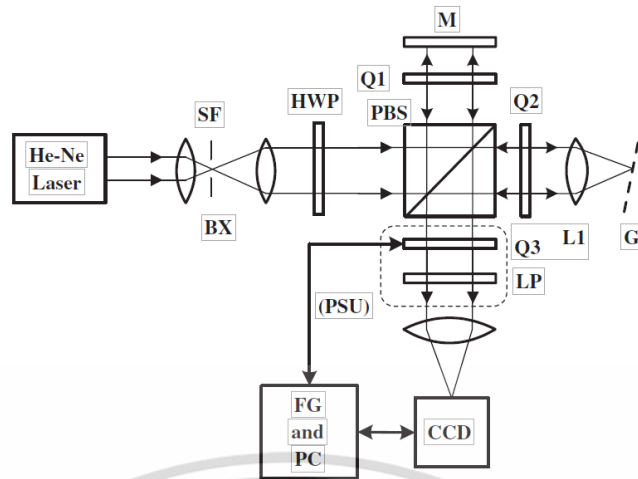
ขนาดเล็กได้ โดยตารางที่ 2- 2 แสดงการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลอง กับค่าที่ได้จากโครงสร้างของอุปกรณ์แสง โดยทำการปรับมุมของ Analyser ไปที่มุมต่าง ๆ

ตารางที่ 2- 2 ผลการเปรียบเทียบภาพความเข้มแสงทางทฤษฎีเทียบกับทางปฏิบัติ [3]

มุม	ผลการทดลอง	ผลการการคำนวณตามทฤษฎี		ผลการทดลอง	ผลการการคำนวณตามทฤษฎี
90°			82.5°		
87.5°			80°		
85°			75°		

ซึ่งงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นภาพการสะท้อนแสงที่ได้จากภาพระนาบโพกัสหลังเลนส์ของเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์ ทั้งแบบจำลองที่ได้กับการทดลอง ต่อยังไม่ได้ต่อยอดไปใช้ในการหาค่าคุณสมบัติทางแสงอื่น ๆ ต่อ เช่น ค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน (n, k) แต่โครงสร้างในส่วนของไมโครอิลิปโซมิเตอร์ และการสมการของแสงสะท้อนกลับมายังเลนส์ใกล้วัตถุ เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ได้ภาพความเข้มแสงซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าการเลื่อนเฟสทางแสง ก่อนที่จะทำการหาค่า n, k ต่อไป ซึ่งมีบทความที่ศึกษาเกี่ยวกับการเลื่อนเฟสทางแสง ซึ่งก็คือ บทความเรื่อง “Polarization shifting interferometric profilometer” [4] ซึ่งผู้วิจัยนำเสนอวิธีการวัดค่าคุณสมบัติทางแสงโดยใช้อินเตอร์เฟอริเตอร์ที่มีการเลื่อนเฟสทางแสง ซึ่งงานวิจัยนี้ออกแบบขึ้นเพื่อแก้ไขข้อเสียของเครื่องวัดแบบ PZT ซึ่งสามารถวัดหาระดับความลึกของพื้นผิวของวัสดุ ในระดับนาโนเมตรได้ ดังนั้นบทความนี้จึงได้นำเสนอเทคนิคการเลื่อนเฟสทางแสงขึ้น โดยใช้ควอเตอร์เวฟเพลต Q_3 เพื่อทำการปรับรีเฟรเตอร์ทางแสง โดยรูปที่ 2- 16 แสดงโครงสร้างการเชื่อมต่ออุปกรณ์แสง ที่ใช้การต่อเครื่องวัดแบบอินเตอร์เฟอริเตอร์ร่วมกับการปรับรีเฟรเตอร์ขององค์ประกอบทางแสง การหาค่าอิลิปโซเมตริกซ์พารามิเตอร์จากค่าความเข้มแสงของพื้นผิว เลือกใช้มุมอะซิมุสที่ $\pi/4$ โดยคำนวณได้จากสมการที่ 2-41 ซึ่งผลทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทางแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

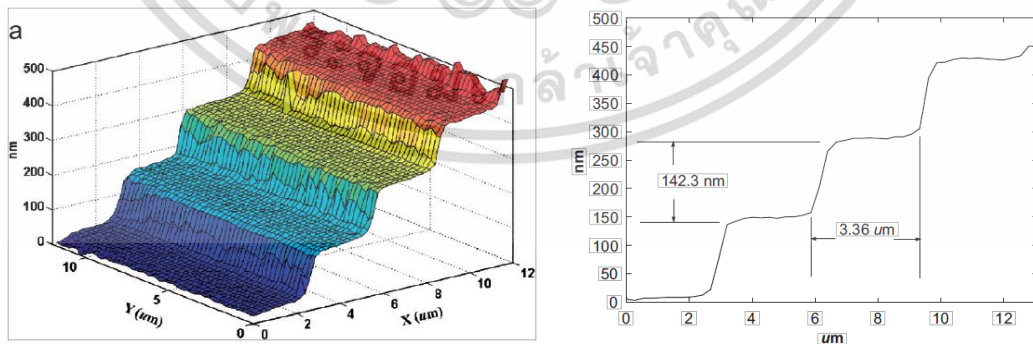


รูปที่ 2- 16 อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้เลนส์ใกล้วัตถุ ซึ่งมีโครงสร้างแบบไมเคิลสัน
อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ [4]

ในการทดลองผู้วิจัยได้ทำการปรับมุม Fast Axis ของควอเตอร์เวฟเพลต Q3 ไปที่มุม $\frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{8}, \frac{3\pi}{4}$ ตามลำดับ ซึ่งทำให้ได้ภาพความเข้มแสง I_1, I_2, I_3 และ I_4 ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการคำนวณหาค่าเดลต้าจากสมการที่ 2-41

$$\Delta \left(\phi = \frac{\pi}{4} \right) = \tan^{-1} \left[\frac{I_2 - I_4}{2(I_1 - I_3)} \right] \quad (2-41)$$

ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากสมการนำไปสู่การหาระดับความลึกของพื้นผิว Blazed Rating ซึ่งมีความลึกประมาณ 142 นาโนเมตร ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2- 17

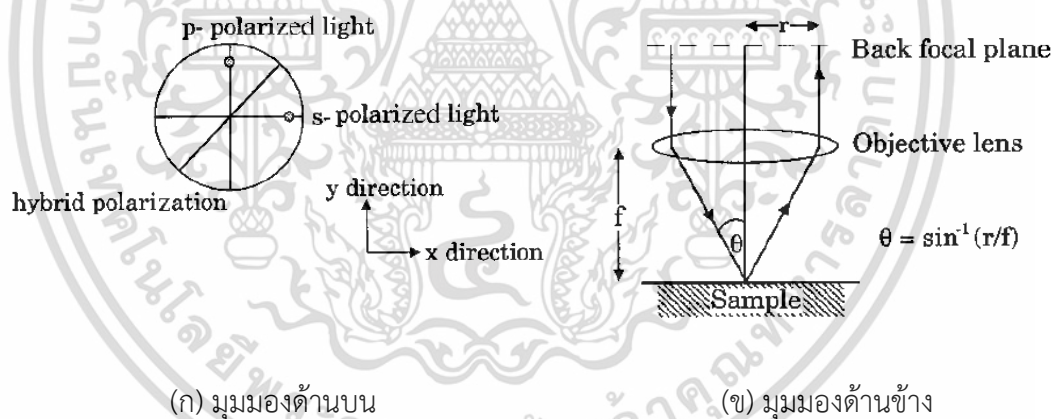


รูปที่ 2- 17 พื้นผิวของ Blazed Rating ซึ่งมีความลึกประมาณ 142 นาโนเมตร [4]

ซึ่งงานวิจัยนี้แสดงการหาค่าเดลต้า ซึ่งเกิดจากการเลื่อนเฟสทางแสง โดยการปรับ Fast Axis ของควอเตอร์เวฟเพลต นอกจากนี้ผู้วิจัยอธิบายข้อดีของการทดลองนี้ คือ ให้ความละเอียดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

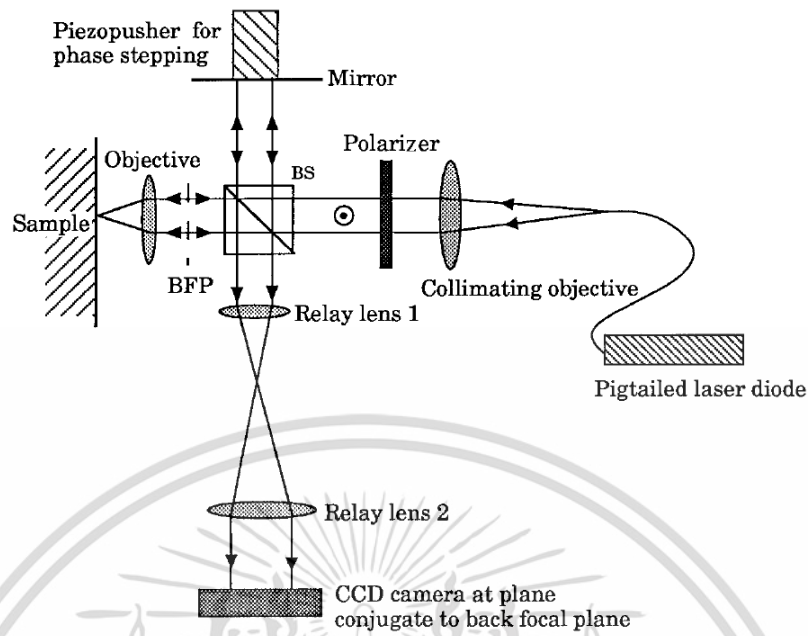
ในการวัดที่สูง (High Resolution) เมื่อเปรียบเทียบการการใช้ PZT ซึ่งจากบทความนี้ผู้วิจัยนำเสนอหลักการเลื่อนเฟสทางแสงโดยอุปกรณ์รีทาร์เดอร์ โดยใช้ควอเตอร์เวฟเพลต เพื่อปรับแกน Fast Axis ซึ่งทำให้สามารถหาค่าเดลต้าได้ ซึ่งค่าเดลต้านี้เองเป็นค่าที่จะนำไปสู่การหาค่าดัชนีการหักเหแสงของวัสดุ ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเทคนิคการเลื่อนเฟสทางแสงเพื่อหาค่าเดลต้ามารวมเข้ากับไมโครอิลิปโซมิเตอร์

นอกเหนือจากบทความที่กล่าวมายังมีบทความที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ไมโครอิลิปโซมิเตอร์ คือ บทความเรื่อง “Scanning Optical Micro-ellipsometer for Pure Surface profiling” [5] ซึ่งบทความนี้นำเสนอการใช้งานไมโครอิลิปโซมิเตอร์ร่วมกับอินเตอร์เฟโรมิเตอร์ โดยทำการวิเคราะห์ภาพที่เรียกว่า ภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์ (Back Focal Plane) ซึ่งเป็นภาพความเข้มแสง ซึ่งอยู่บริเวณด้านหลังของเลนส์ใกล้วัตถุ ซึ่งถูกเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าภาพระนาบฟูเรียร์ (Fourier Plane) ซึ่งโดยปกติภาพส่วนใหญ่ที่ใช้ในการวิเคราะห์ภาพจะเป็นภาพที่อยู่บริเวณระนาบหน้าเลนส์ (Front Focal Plane) ซึ่งภาพในตำแหน่งนี้จะมีขนาดเล็ก ทำให้มีรายละเอียดของภาพน้อย (Low Resolution) ที่จะนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป ดังนั้นในบทความนี้จึงเลือกใช้ภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์แทน โดยทำการบันทึกภาพด้วยกล้อง CCD พร้อมทำการหาค่าค่าคุณสมบัติทางแสงโดยใช้หลักการหาความต่างเฟสทางแสง (Phase Difference) ระหว่าง p-polarized และ s-polarized ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2- 18



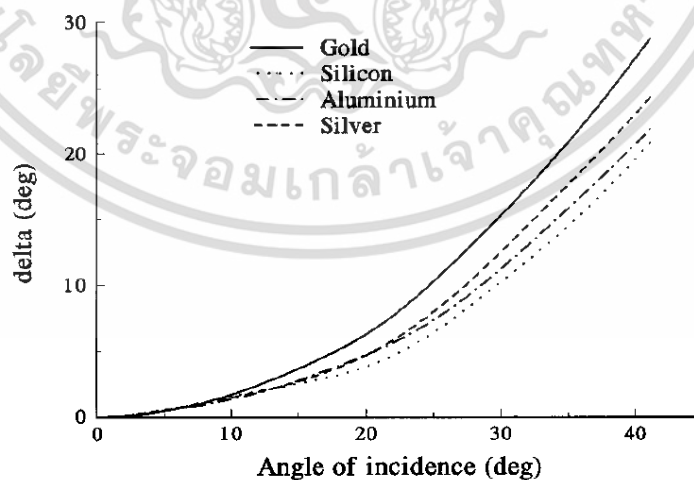
รูปที่ 2- 18 เลนส์ใกล้วัตถุและภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์ [5]

จากรูปที่ 2- 18(ก) แสดงทิศทางการโพลาไรเซชันของแสง ตามแนวแกนนอน (แกน x) และตามแนวแกนตั้ง (แกน y) ของภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์ ซึ่งเกิดจากการกระจายตัวของแสงที่สะท้อนกลับเข้ามาที่หลังเลนส์ใกล้วัตถุ ซึ่งภาพที่ระนาบโฟกัสหน้าเลนส์จะถูกแปลงฟูเรียร์ทางแสงเพื่อเป็นภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งของระนาบคลื่น (Plane-wave) ที่ตกกระทบบนวัสดุทดสอบซึ่งถูกแยกออกจากกัน



รูปที่ 2- 19 ไมโครอิลิปโซมิเตอร์สำหรับการสแกนทางแสง [5]

รูปที่ 2- 19 แสดงไดอะแกรมการเชื่อมต่อที่ใช้ในการทดลอง โดยในบทความนี้เลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงแบบเลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร และเลนส์ใกล้วัตถุมีขนาดรูรับแสง NA=0.95 ซึ่งรูปที่ 2- 20 แสดงค่ามุมเดลต้ามาตรฐานของวัสดุทดสอบ 4 ชนิด ได้แก่ ทอง (Au), ซิลิกา หรือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂), อลูมิเนียม (Al) และ เงิน (Ag) ซึ่งแกนนอนเป็นมุมตกกระทบของแสง แกนตั้งเป็นมุมเดลต้า



รูปที่ 2- 20 มุมเดลต้าที่ได้ ณ มุมตกกระทบต่าง ๆ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

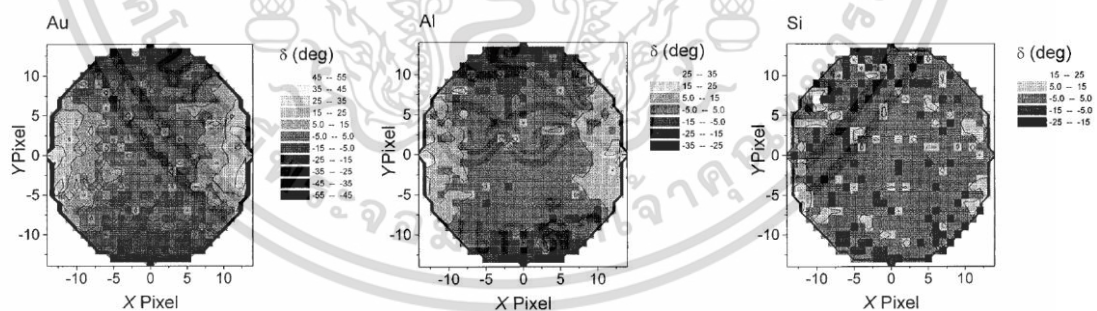
ซึ่งผลการทดลองผู้วิจัยทำการเลื่อนเฟสทางแสงครึ่งละ $\frac{\pi}{2}$ องศา ซึ่งในการเลื่อนเฟส

ทางแสงจะทำให้เกิดภาพความเข้มแสงขึ้น โดยทำการเลื่อนเฟสทางแสงเพื่อสร้างภาพความเข้มแสงทั้งสิ้น 7 ภาพ โดยกำหนดให้เป็น $I_{-3}, I_{-2}, I_{-1}, I_0, I_1, I_2, I_3$ จากนั้นนำภาพทั้ง 7 มาคำนวณตามสมการที่ 2-42

$$\tan \phi = \frac{7(I_{-1} - I_1) - (I_{-3} - I_3)}{-4(I_{-2} - I_2) + 8I_0} \quad (2-42)$$

ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ จะเกิดภาพที่เรียกว่า ภาพ Phase Map ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2- 21 ซึ่งแสดงค่าภาพ Phase Map ซึ่งได้จากวัสดุ 3 ชนิด ได้แก่ ทอง (Au), อลูมิเนียม (Al) และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) โดยในขั้นตอนต่อมาผู้วิจัยจะนำภาพ Phase Map ที่ได้มาหาจุดกึ่งกลางของภาพ จากนั้นทำการลากเส้นไปยังขอบของภาพ Phase Map ซึ่งทำให้ได้เส้นโค้งความชัน ซึ่งก็คือ มุมเดลต้า ซึ่งเกิดจากแสงที่ตกกระทบตั้งแต่มุม 0 (ซึ่งก็คือจุดกึ่งกลางของภาพ) ไปจนถึงมุมของแสงที่ตกกระทบซึ่งแปรผันตามกับสมการของรูรับแสงนั่นเอง ซึ่งมุมเดลต้า ก็คือ ความต่างเฟสระหว่าง p-polarized และ s-polarized ขององค์ประกอบของแสงนั่นเอง

ซึ่งบทความนี้อธิบายและทดลองให้เห็นว่าการใช้ภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์จะทำให้ได้ความละเอียดของภาพมากกว่าการใช้ภาพระนาบหน้าเลนส์ (Front Focal Plane) ซึ่งมีขนาดเล็ก และการหามุมเดลต้าจากภาพ Phase Map ซึ่งในบทความนี้จึงทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอบทความ “An interferometric back focal plane microellipsometry for the determination of optical properties of a slider's air bearing surface” ซึ่งถูกอธิบายไว้ในบทที่ 4



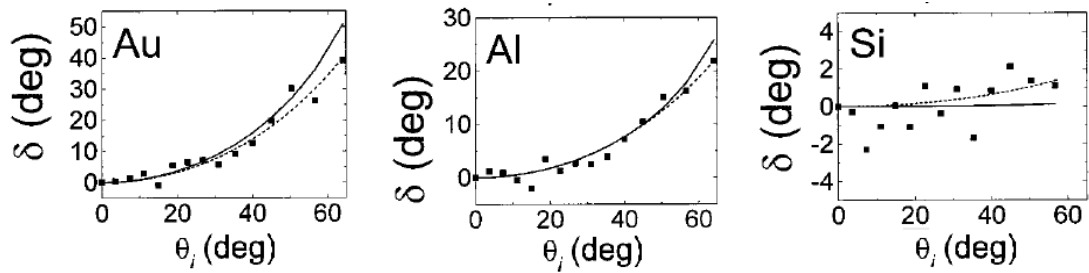
ก) ทอง (Au)

ข) อลูมิเนียม (Al)

ค) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)

รูปที่ 2- 21 ภาพ Phase Map ของวัสดุ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ทอง (Au)

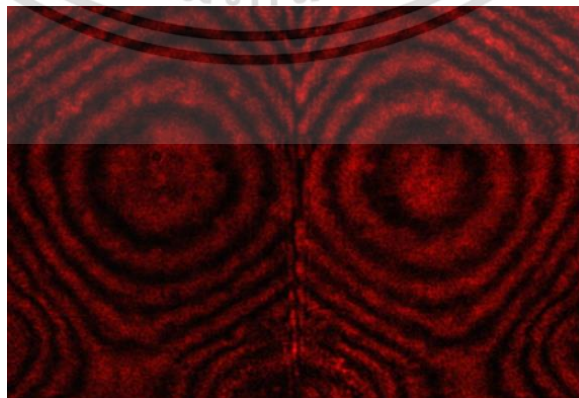
ข) อลูมิเนียม (Al)

ค) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂)

รูปที่ 2- 22 มุมเดลด้าที่ได้จาก Phase Map [6]

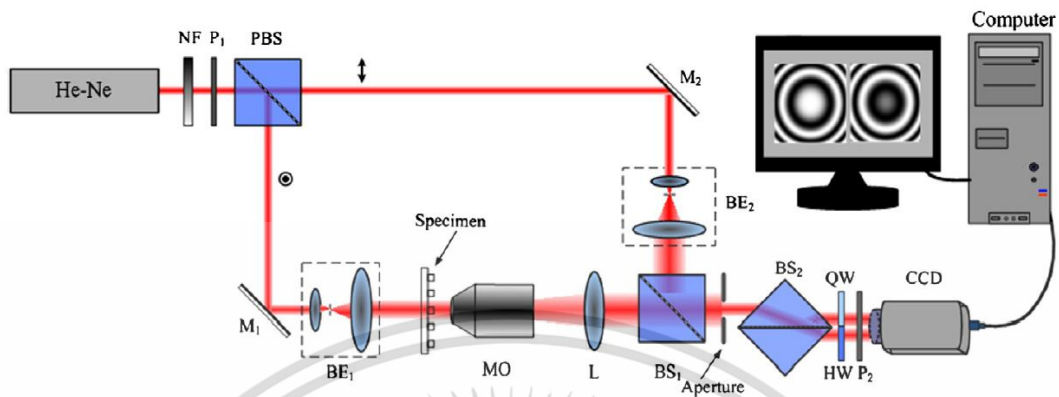
รูปที่ 2- 22 ซึ่งในรูปแบบนอนแสดงมุมตกกระทบของแสง แกนตั้งแสดงมุมเดลด้า โดยที่เส้นประแสดงที่ถูกค่าพล็อตจาก Phase Map และเส้นทึบแสดงผลที่ได้จากการนำข้อมูลที่ได้จากเส้นประมาทำการปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการปรับเส้นโค้ง คือ ค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน (Complex Refractive Index)

นอกจากนี้ยังมีบทความที่กล่าวถึงการใช้งานไมโครอิลิปโซมิเตอร์ร่วมกับภาพระนาบโพกัสหลังเลนส์อีก ก็คือ บทความ “Interferometric back focal plane microellipsometry” [6] ซึ่งมีหลักการใกล้เคียงกับบทความที่ผ่านมา คือ มีการใช้งานไมโครอิลิปโซมิเตอร์ร่วมกับอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ในการหาค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน ซึ่งในการทดลองนี้เลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงแบบมัลติโหมดเลเซอร์ไดโอดซึ่งมีความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร และใช้เลนส์ใกล้วัตถุที่มีค่า NA=0.9 โดยผู้วิจัยทำการทำการเลื่อน และอีกงานวิจัยซึ่งนำเสนอเกี่ยวกับการเลื่อนเฟสทางแสง อีกบทความหนึ่ง ก็คือ บทความ “Parallel Two-step Phase-shifting Microscopic Interferometry Based on a Cube Beamsplitter” [7] นำเสนอการทำการหาค่าการเลื่อนเฟสทางแสงโดยใช้การแสงลำแสงออกเป็น 2 ลำแสง โดยใช้อุปกรณ์แยกลำแสง (Beam Splitter) เพียงตัวเดียว ซึ่งผลการทดลองเพื่อพิจารณาว่าการเป็นการแยกเป็น 2 ลำแสง คือ การที่ภาพความเข้มแสงที่ได้ต้องความเข้มแสงที่ใกล้เคียงกันดังรูปที่ 2- 23

รูปที่ 2- 23 ภาพความเข้มแสงที่ถูกแยกออกจากกัน โดยเกิดจากการเลื่อนเฟส $-\pi/2$ [7]

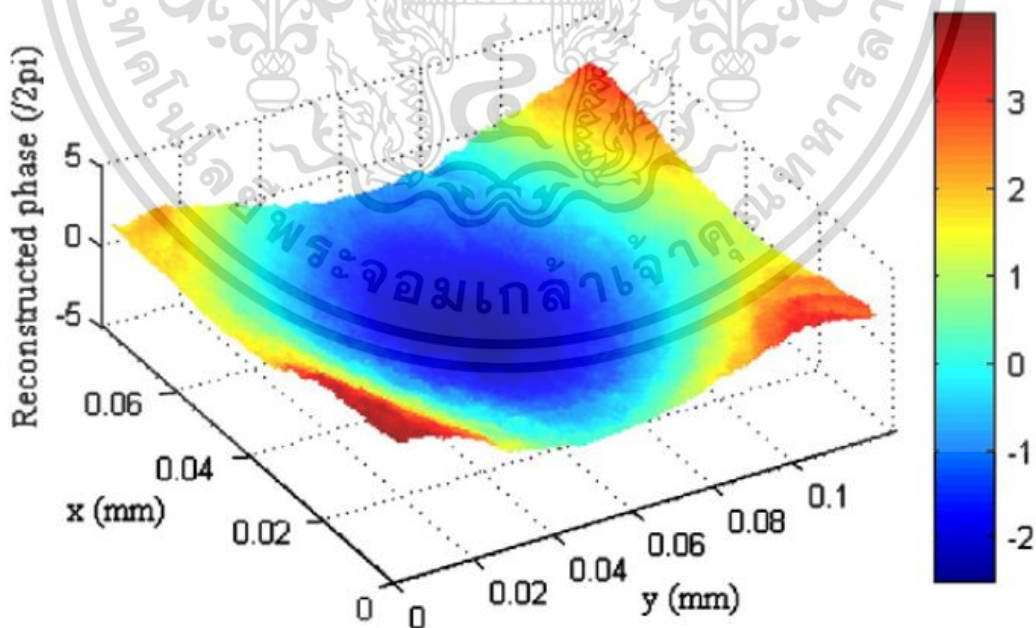
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้ทำการทดลองตามโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2- 24 ซึ่งมีโครงสร้างการต่อแบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ซึ่งใช้อุปกรณ์การแยกลำแสง 2 แบบ คือแบบทั่วไป กับแบบโพลาไรเซชัน



รูปที่ 2- 24 ไดอะแกรมการเชื่อมต่อ Parallel Two-step Phase-shifting Interferometry [7]

ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของลำแสงที่เรียกว่า Phase Distribution แสดงดังรูปที่ 2- 25 ซึ่งแกนตั้งเป็นค่าเรเดียน ซึ่งมีค่าระหว่าง $-\pi$ ถึง π ซึ่ง Phase Distribution ที่ได้นี้ก็คือภาพสามมิติที่ถูกพล็อตจากมุมเดลต้า ก่อนกระบวนการนำเส้นโค้งที่ได้จากมุมเดลต้าไปทำการปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting) เพื่อหาค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนในกระบวนการต่อไป



รูปที่ 2- 25 การกระจายตัวของเฟส (Phase Distribution) ของ Parallel Two-step

Phase-shifting Interferometry [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความสูงการบินของหัวอ่าน

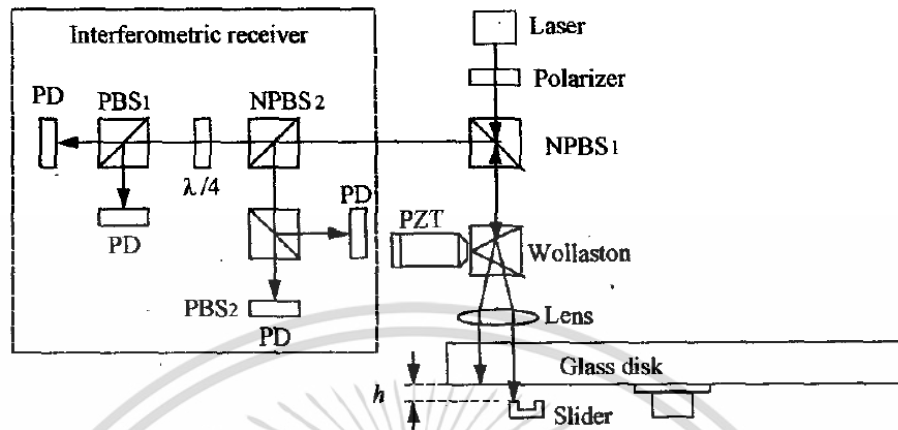
ในการการหาค่าความสูงการบินของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ซึ่งปัจจุบันใช้เครื่อง KLA Tencor D6 ในการวัดหาค่าการสูงการบินของหัวอ่าน ซึ่งในกระบวนการคำนวณหาค่านั้นจะต้องนำค่าคุณสมบัติทางแสง ซึ่งก็คือค่าดัชนีการหักเหที่ซับซ้อน ซึ่งจะได้จากเครื่องอิลิปโซมิเตอร์ก่อน ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงทำการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการหาค่าความสูงการบินของหัวอ่านที่มีอยู่ ซึ่งเริ่มต้นที่บทความ “Tribological Testing Technology for Sub- 10 nm Flying Height Recording System” [8] ซึ่งเป็นการทดสอบกับหัวอ่านซึ่งมีขนาดประมาณ 10 นาโนเมตร ซึ่งระบบการหาค่าความสูงการบินแบบเดิมจะใช้การวัดโดยใช้หลักการ LDV ซึ่งไม่สามารถวัดค่าความสูงของฮาร์ดดิสก์ที่มีขนาด 10 นาโนเมตร ผู้วิจัยได้กล่าวถึงการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากเครื่องวัดค่าความสูงการบิน ซึ่งได้แก่ CSS, L/UL, AE, TA เป็นต้น ซึ่งเครื่องทดสอบค่าความสูงการบินแสดงดังรูปที่ 2- 26



รูปที่ 2- 26 เครื่องทดสอบหาค่าความสูงการบินของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ [8]

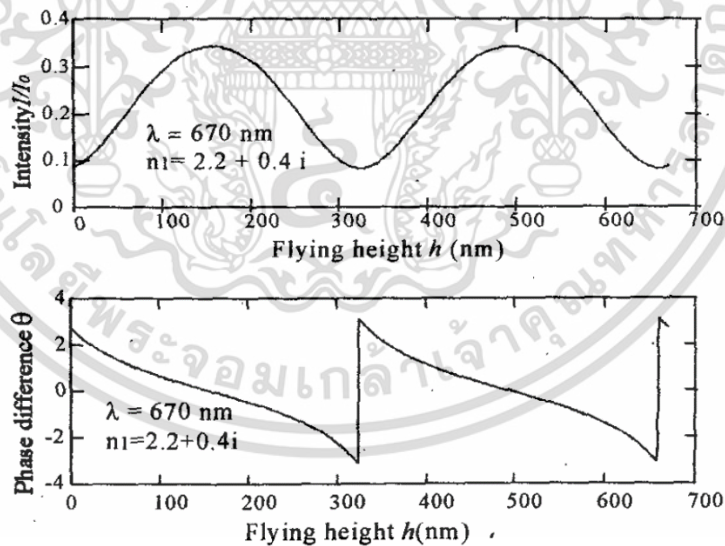
จากบทความที่กล่าวมาทำให้เห็นหน้าตาของเครื่องทดสอบวัดค่าความสูงการบินของหัวอ่าน ซึ่งในกระบวนการวัดค่าความสูงการบินของหัวอ่านมีผู้วิจัยได้นำเสนอบทความ “Normal Incidence Polarization Interferometer for Measuring Flying Height of Magnetic Heads” [9] เป็นการรวบรวมวิธีการที่ใช้ในการหาค่าความสูงการบินของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ โดยใช้อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ความเข้มแสง (Intensity Interferometry) และแบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์โพลาไรเซชัน โดยเครื่องวัดแบบ Dual-beam normal Incidence Polarization Interferometry ได้รวมเอาข้อดีของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในวงกว้างโดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคทั้งสองแบบมารวมเข้าด้วยกัน ซึ่งเครื่องวัดนี้สามารถวัดค่า Pitch และ Roll ของหัวอ่านได้ ซึ่งไดอะแกรมการเชื่อมต่อของเครื่องวัดแบบสองลำแสงแสดงดังรูปที่ 2- 27



รูปที่ 2- 27 โครงสร้างการเชื่อมต่อของเครื่องวัดแบบสองลำแสง [9]

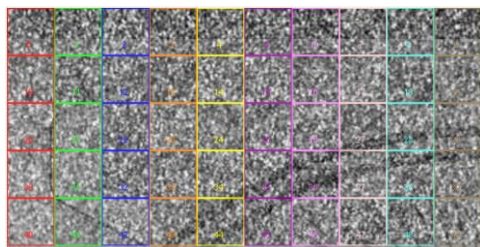
โดยในการทดลองหาค่าความเข้มแสง (Intensity) และความต่างเฟสของแสง (Phase Difference) ทำได้โดยการใช้ค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนของสไลเดอร์ซึ่งอยู่บนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ที่มีค่า $nk = 2.2 + 0.4i$ ซึ่งค่าความเข้มแสงและความต่างเฟสของแสงแสดงดังรูปที่ 2- 28



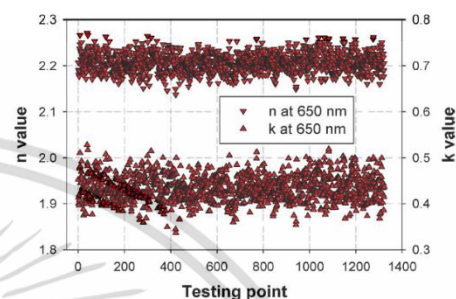
รูปที่ 2- 28 ค่าความเข้มแสงและความต่างเฟส [9]

จากรูปที่ 2- 28 แกนนอนแสดงค่าความสูงการบินของหัวอ่านมีหน่วยเป็นนาโนเมตร แกนตั้งประกอบด้วยค่าความเข้มแสง และค่าความต่างเฟสของแสง ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร โดยงานวิจัยได้สรุปไว้ว่าการใช้วิธีวัดแบบอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์โพลาไรเซชันสามารถหาค่าความสูงการบินของหัวอ่านได้ขณะที่ทำการทดสอบหาการบินของหัวอ่านได้ นอกจากนี้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังมีผู้วิจัยรายอื่นที่นำเสนอวิธีการวัดค่าความสูงการบินของหัวอ่าน คือ บทความ “Slider Optical Constant Distribution, and Correlation, and FH Measurement Accuracy” [10] กล่าวถึงเครื่องวัดความสูงการบินของหัวอ่านปัจจุบันใช้ค่าเฉลี่ยของ n , k เพื่อทำการคำนวณหาค่าความสูงการบินของหัวอ่าน ซึ่งงานวิจัยนี้อธิบายถึงความแตกต่างค่า n , k ที่วัดในแต่ละจุดบนพื้นผิวของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ซึ่งเมื่อนำไปหาค่าความสูงการบินจะส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของค่าความสูงการบินที่จะคำนวณได้



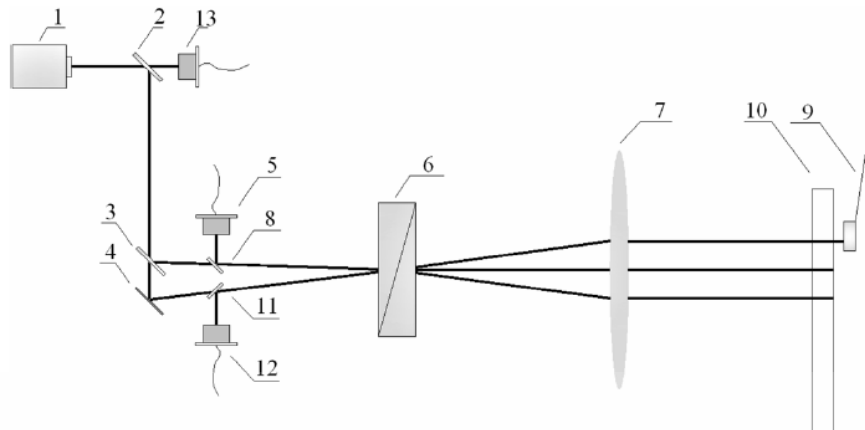
รูปที่ 2- 29 ภาพพื้นผิวของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ [9]



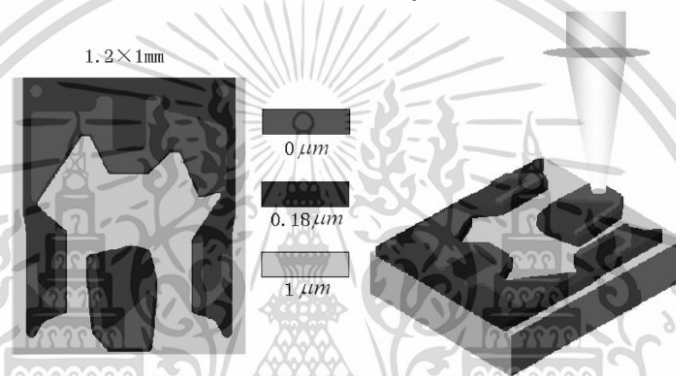
รูปที่ 2- 30 การวัดค่า n, k โดยเครื่องอิลิปโซมิเตอร์ [9]

จากรูปที่ 2- 29 แสดงภาพพื้นผิวของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ซึ่งถ่ายภาพจากกล้อง CCD ซึ่งขนาดเท่ากับ 25×25 ไมโครเมตร โดยผู้วิจัยทำการแบ่งภาพออกเป็น 5×10 ส่วนในการวัดค่า n , k ของพื้นผิวของหัวอ่าน จากรูปที่ 2- 30 เป็นการวัดค่า n , k โดยใช้เครื่องอิลิปโซมิเตอร์ซึ่งมีความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร

ซึ่งงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการวัดค่าความสูงการบินของหัวอ่านโดยใช้วิธี Laser Phase Detection ทำให้เพิ่มความเที่ยงตรงในการวัดค่าความสูงการบินอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการวัดค่า n, k จึงมีความสัมพันธ์มากถ้าต้องการวัดค่าความสูงการบินที่แม่นยำขึ้น นอกจากนี้ยังมีผู้เสนอหลักการหาค่าความสูงการบินในรูปแบบการวัดแบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ เช่น บทความ “Flying-Height Measurement With a Symmetrical Common-Path Heterodyne Interferometry Method” [11] ซึ่งนำเสนอการความสูงการบินโดยใช้วิธี Symmetrical Common-Path Heterodyne Interferometry ซึ่งสามารถวัดความสูงการบินของหัวอ่านได้ประมาณ 10 นาโนเมตร ซึ่งโครงสร้างของการวัดความสูงการบินโดยวิธี SCPHI แสดงดังรูปที่ 2- 31

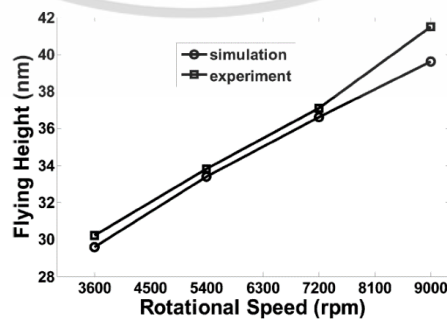


รูปที่ 2- 31 โครงสร้างของการวัดความสูงการบินโดยวิธี SCPHI [11]



รูปที่ 2- 32 พื้นผิวของ Air Bearing Surface ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ [11]

รูปที่ 2- 32 แสดงพื้นผิวของ Air Bearing Surface และตำแหน่งในการวัดซึ่งอยู่ที่บริเวณ Pole Trip ซึ่งแสดงดังรูป ซึ่งบริเวณ Pole Trip เป็นบริเวณที่เหมาะสมในการวัดเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีพื้นผิวที่เรียบ แล้วเป็นบริเวณที่ถูกออกแบบให้ใช้ในการทดสอบการวัดค่าความสูงการบินของหัวอ่าน ซึ่งบทความนี้แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการวัดความสูงการบินของหัวอ่านในความเร็รรอบที่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 2- 33



รูปที่ 2- 33 ค่าการบินของหัวอ่านที่ความเร็รรอบของแผ่นบันทึกข้อมูลที่แตกต่างกัน [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการรับส่งข้อมูลผ่านโปรโตคอลเอ็มคิวทีที

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นอกจากกล่าวถึงการหาค่าคุณสมบัติทางแสงแล้ว ยังกล่าวถึงกระบวนการในการรับส่งข้อมูลคุณสมบัติทางแสงจากเครื่องไมโครออปโตเมเตอร์ไปยังผู้ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีทั้งสำนักงานใหญ่ ซึ่งใช้ค่าคุณสมบัติทางแสงในการออกแบบและทดสอบพื้นผิว Air Bearing Surface และวิศวกรที่เชี่ยวชาญการวัดการบิดของหัวอ่าน ซึ่งในการรับส่งข้อมูลในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้งานโปรโตคอลเอ็มคิวทีที ซึ่งมีบทความที่กล่าวถึงการใช้งานโปรโตคอลเอ็มคิวทีที เริ่มต้นด้วยบทความ “Design and Implementation of a Reliable Message Transmission System Based on MQTT Protocol in IoT” [12] โดยงานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและใช้งานการรับส่งผ่านโปรโตคอลเอ็มคิวทีทีที่มีความน่าเชื่อถือ โดยการใช้งานโปรโตคอลเอ็มคิวทีทีในการดูแลเรื่องการลำดับข้อความที่ถูกจัดส่ง โดยมีการใช้งานลำดับการส่งข้อมูล (Sequence Number) โดยในทุครั้งการรับส่งข้อมูลจะทำการจัดเก็บลำดับการส่งข้อมูลเก็บไว้ในฐานข้อมูล ซึ่งผู้รับจะทำการตรวจสอบลำดับข้อมูลก่อนการประมวลผล ซึ่งถ้าเกิดการสลับลำดับการส่งระบบจะทำการเรียงลำดับใหม่ก่อนการประมวลผลต่อไป โดยในการพัฒนาเลือกใช้ Mosquitto MQTT ในการทำหน้าที่เป็นโบรกเกอร์ในการบริหารจัดการการรับส่งในโปรโตคอลเอ็มคิวทีที ซึ่งงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นความสามารถของโปรโตคอลเอ็มคิวทีทีที่สามารถประยุกต์ใช้กับการจัดลำดับข้อมูลในการรับส่งก่อนหลัง ซึ่งปัญหาดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2- 34



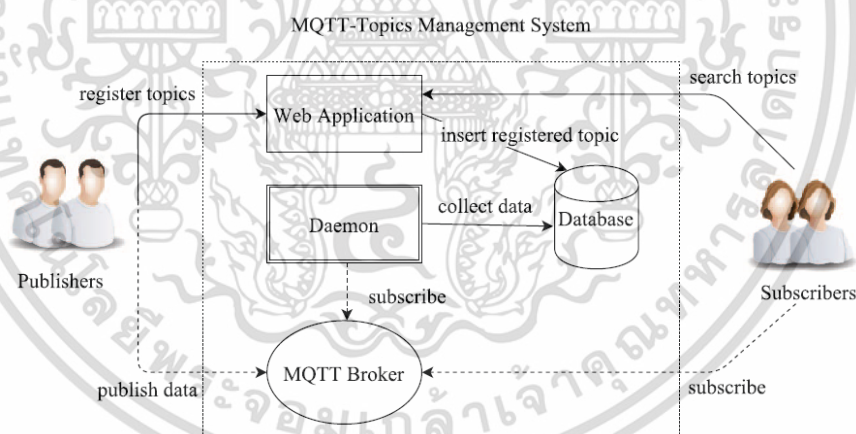
รูปที่ 2- 34 การรับส่งข้อมูลซึ่งเกิดการสลับลำดับการส่งข้อความ [12]

นอกจากนี้ยังมีบทความเกี่ยวกับการใช้งานโปรโตคอลเอ็มคิวทีทีซึ่งกล่าวถึงการแยกหัวเรื่องโดยการจัดกลุ่มของหัวเรื่อง ในบทความ “MQTT-Topics Management System for Sharing of Open Data” [13] ซึ่งผู้วิจัยได้นำเสนอการใช้ระบบจัดการข้อเรื่องผ่านโปรโตคอลเอ็มคิวทีที (MQTT-Topics Management System : MTMS) ซึ่งทำการจัดการหัวเรื่องที่จะถูกแชร์ โดยการจัดกลุ่มหัวเรื่องหลัก และหัวเรื่องรอง ดังตารางที่ 2- 3

ตารางที่ 2- 3 การจัดแบ่งหัวเรื่องต่าง ๆ ของ MQTT-Topic สำหรับเมืองอัจฉริยะ [13]

Main Objective	Sub Objective	Main Objective	Sub Objective
Environment	Air	Human	Birth
	Water		Death
	Soil		Population
	Waste		Dint
	Forest	Living	Transport
Energy	Electric		Emergency
	Gas		Healthcare
	Oil		Education
	Light	Safety	

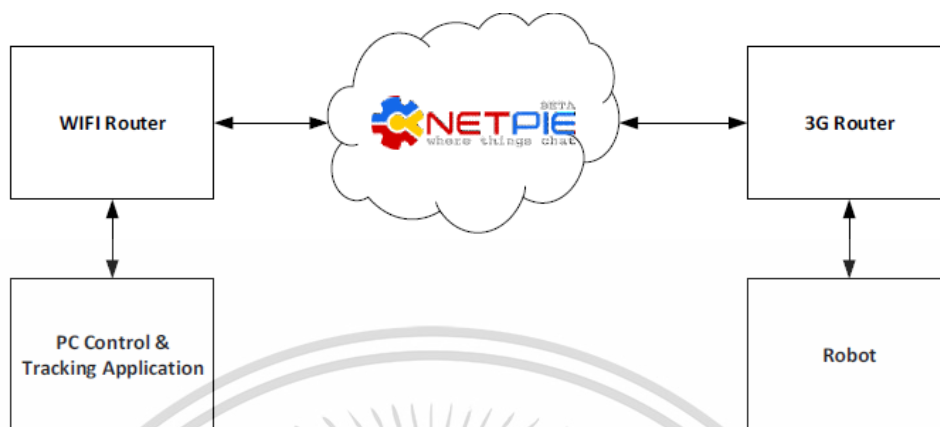
จากรูปที่ 2- 35 แสดงโครงสร้างการเชื่อมต่อของ MQTT-Topics Management System ซึ่งมีโครงสร้างเช่นเดียวกับการเชื่อมต่อทั่วไปของโปรโตคอลเอ็มคิวทีที ซึ่งจะประกอบด้วย Publisher, Subscriber และ MQTT Broker แต่ในงานวิจัยนี้เพิ่มเติมในส่วนของการจัดเก็บหัวเรื่อง (Topics) ไว้ในฐานข้อมูลเพื่อใช้ในการแยกแยะหัวเรื่องหลัก และหัวเรื่องรอง พร้อมเพิ่มเติมส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานที่เป็นเว็บอินเตอร์เฟส



รูปที่ 2- 35 โครงสร้างการเชื่อมต่อของ MQTT-Topics Management System [13]

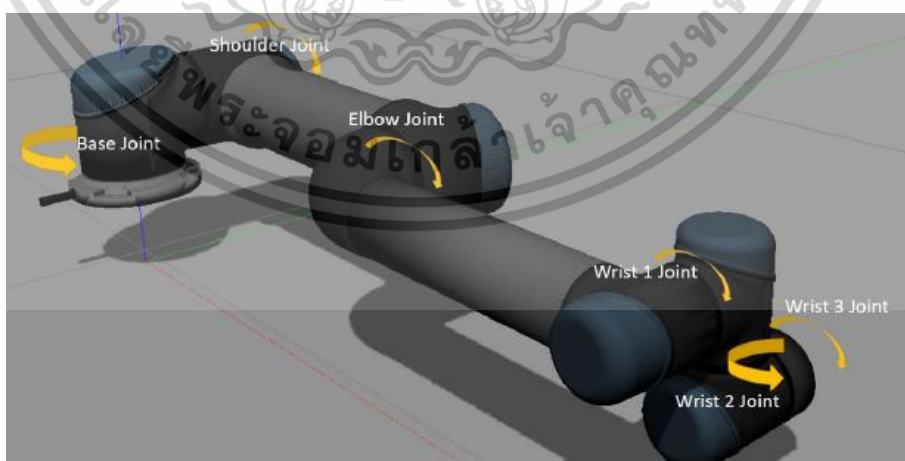
นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้งานโปรโตคอลเอ็มคิวทีทีที่ร่วมกับการควบคุมหุ่นยนต์ในบทความ “Study of using MQTT Cloud Platform for Remotely Control Robot and GPS Tracking” [14] นำเสนอการใช้งานโปรโตคอลเอ็มคิวทีทีสำหรับการควบคุมและสั่งงานหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่และติดตามการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยข้อมูลจากจีพีเอส ซึ่งจากผลการทดลองผู้วิจัยได้ทำการวัดขนาดของคำสั่งที่ใช้ในการส่งและเวลาที่ใช้ในการส่งจากเครื่องคอมพิวเตอร์พกพาไปยังหุ่นยนต์ ซึ่งขนาดของคำสั่งมีขนาด 37 ไบต์ ใช้เวลาส่ง 0.32 ไมโครวินาที ในขณะที่ข้อมูล GPS มีขนาด 113 ไบต์ ใช้เวลาในการส่ง 5.62 ไมโครวินาที ซึ่งผู้วิจัยเลือกใช้งานโปรโตคอลเอ็มคิวทีทีเนื่องจากมีขนาดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแพ็คเกจที่เล็กกว่า ซึ่งส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการส่งน้อยตามขนาดแพ็คเกจที่เล็กลง ซึ่งโครงสร้างการเชื่อมต่อและสั่งงานหุ่นยนต์แสดงดังรูปที่ 2- 36



รูปที่ 2- 36 โครงสร้างการเชื่อมต่อและสั่งงานหุ่นยนต์ [14]

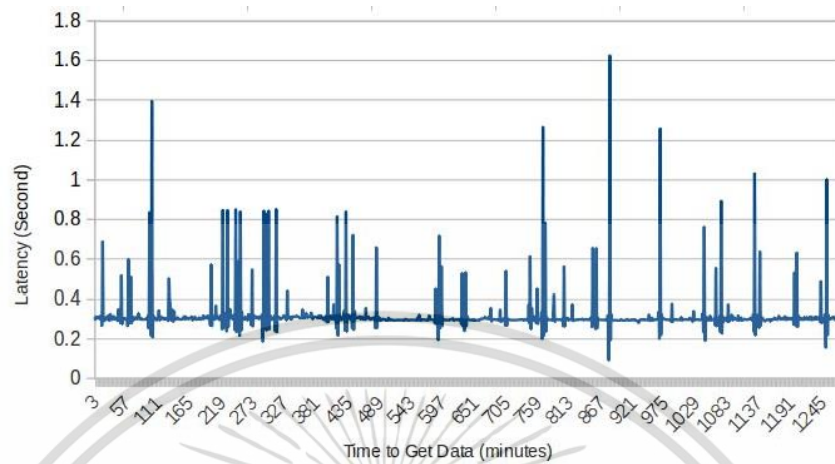
ส่วนอีกบทความที่น่าสนใจ คือ การควบคุมแขนกลอุตสาหกรรม ในบทความ “Online Monitoring & Controlling Industrial Arm Robot Using MQTT Protocol” [15] ซึ่งผู้วิจัยนำเสนอการควบคุมแล้วสังเกตการณ์แขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมผ่านโปรโตคอลเอ็มคิวทีที ซึ่งผู้วิจัยพัฒนาส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานผ่านเว็บอินเตอร์เฟส โดยการควบคุมแขนกลอุตสาหกรรมทำการควบคุมผ่านระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์ (Robot Operating System : ROS) ซึ่งในการควบคุมแสดงให้เห็นถึงการควบคุมการหมุนของแต่ละแกนของแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม โดยงานวิจัยนี้ทำการจำลองแขนหุ่นยนต์และรับส่งข้อมูลผ่านโปรโตคอลเอ็มคิวทีที



รูปที่ 2- 37 แบบจำลองการควบคุมและสังเกตการณ์แขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม [15]

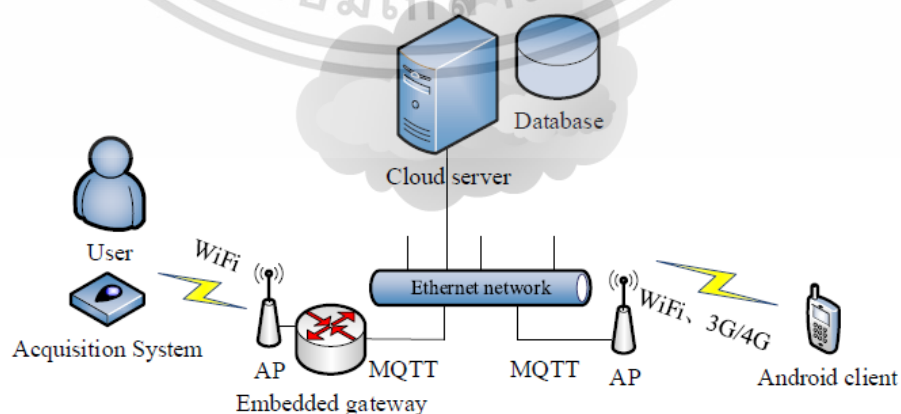
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2- 37 แสดงแผนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่มีข้อต่อ 6 ข้อต่อ (6 DOF) ซึ่งจำลองการทำงานผ่าน ROS Industrial Environment



รูปที่ 2- 38 ระยะเวลาการรับส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์กับแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม [15]

จากรูปที่ 2- 38 แสดงระยะเวลาที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์และแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม โดยผู้วิจัยทำการทดสอบส่งข้อมูลที่เหมือนกันต่อเนื่องเป็นเวลา 1248 นาที โดยทำการส่งข้อมูลทุก ๆ 1 นาที พบว่าค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลประมาณ 0.3196 วินาที และในบทความสุดท้ายกล่าวถึงการเปรียบเทียบการรับส่งข้อมูลอื่น ๆ กับการใช้งานโปรโตคอลเอ็มคิวทีที ในบทความ “Design and Implementation of Mobile Health Monitoring System based on MQTT Protocol” [16] นำเสนอการรับส่งข้อมูลสุขภาพ สัญญาณเตือนต่าง ๆ ภายในสถานพยาบาล โดยข้อมูลที่รับส่งได้แก่ อุณหภูมิ สัญญาณชีพ และสัญญาณ ECG ซึ่งข้อมูลทั้ง 3 จะถูกส่งโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F101C6 ซึ่งโครงสร้างการเชื่อมต่อแสดงดังรูปที่ 2- 39

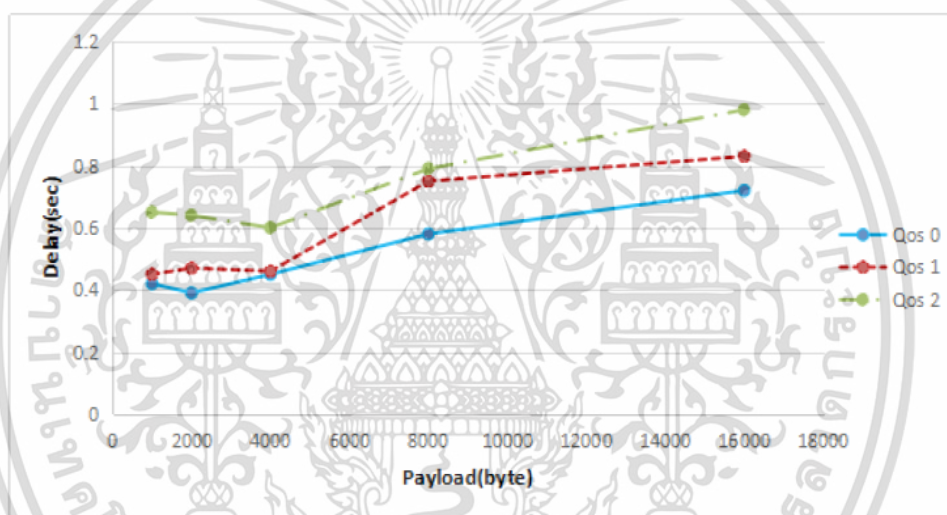


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ โดยรูปที่ 2- 39 โครงสร้างการเชื่อมต่อระบบ Health Monitoring [16] โยชนด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ในบทความนี้ได้อธิบายเปรียบเทียบการรับส่งข้อมูลของ โพรโตคอลเอ็มคิวทีที กับเอชทีทีพี และ เอ็กซ์เอ็มพีทีที ซึ่งอธิบายดัง ตารางที่ 2- 4 ซึ่งผู้วิจัยยังทำการเปรียบเทียบการรับส่งข้อมูลบนโพรโตคอลเอ็มคิวทีทีโดยกำหนดให้ขนาดของข้อมูลที่ส่งน้อยกว่า 4 กิโลไบต์ โดยทำการเปรียบเทียบกับ การรับคุณภาพการให้บริการ (Quality of Service) ทั้ง 3 แบบ ของโพรโตคอลเอ็มคิวทีที ซึ่งผลลัพธ์ของระยะเวลาที่ใช้แสดงดังรูปที่ 2- 40

ตารางที่ 2- 4 การเปรียบเทียบข้อมูลในการรับส่งข้อมูลของโพรโตคอลชนิดต่าง ๆ [16]

Protocol	Packets	Bytes	Packets/s	Bytes/s
HTTP	424	196471	0.654	332.35
XMPP	426	63558	0.647	96.689
MQTT	428	49912	0.335	35.947



รูปที่ 2- 40 การรับส่งข้อมูลของคุณภาพการให้บริการทั้ง 3 แบบ [16]

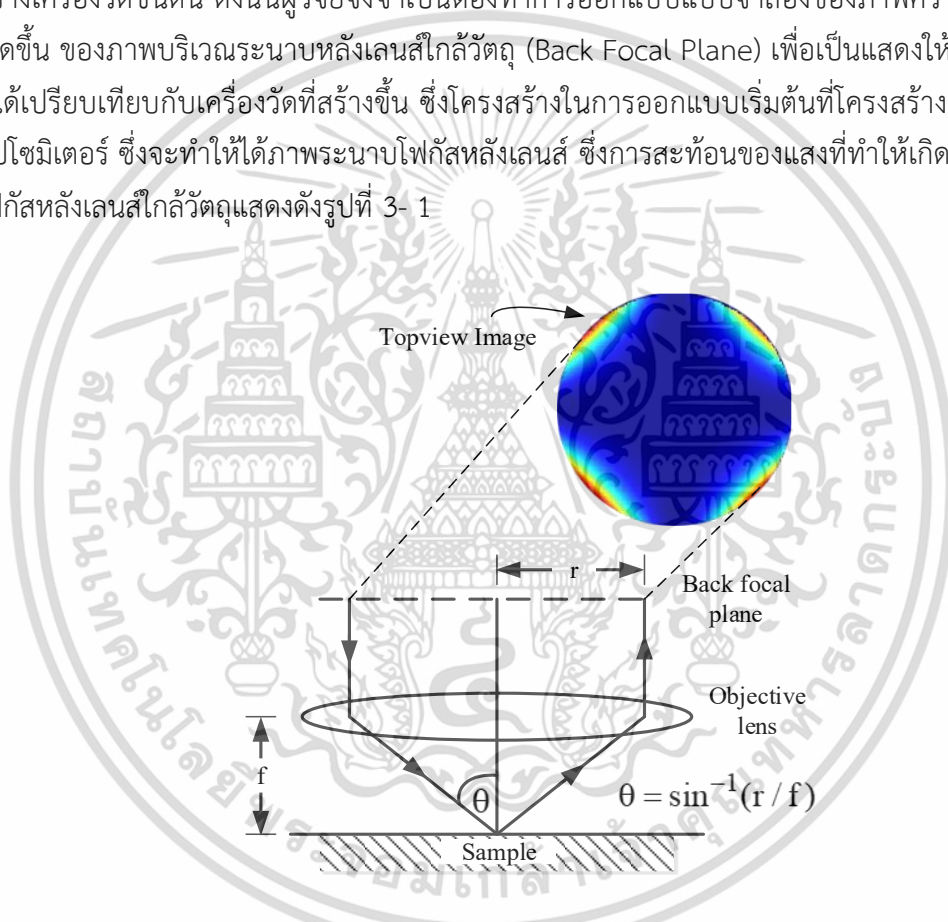
จากบทความทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับโพรโตคอลเอ็มคิวทีทีที่กล่าวมาแล้วข้างต้นพบว่าในทุกบทความนำเสนอข้อดีของการใช้งานโพรโตคอลเอ็มคิวทีที ซึ่งมีการขนาดของแพ็กเกตที่เล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโพรโตคอลอื่น ๆ และยังสามารถอยู่บนโพรโตคอลทีซีพีทีที ซึ่งมีคุณสมบัติในการรับประกันการส่งข้อมูลจากต้นทางไปถึงปลายทาง โดยในการทดสอบประสิทธิภาพของการรับส่งข้อมูลในงานวิจัยต่าง ๆ จะเป็นการทดสอบเวลาในการรับส่งข้อมูลซึ่งใช้การจับเวลา ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้การจับเวลา แต่เป็นการจับเวลาที่ได้จากการดักจับแพ็กเกต (Packet Sniffer) สื่อสารจริง โดยใช้โปรแกรมดักจับข้อมูล (Wireshark Packet Sniffer) ซึ่งค่าระยะเวลาที่ใช้ในการตรวจสอบเลือกใช้ค่าราวด์ทริปทาม (Round Trip Time : RTT) เนื่องจากเป็นเวลาที่ใช้ในการกระบวนการส่งจากต้นทางไปจนถึงปลายทาง และปลายทางต้นข้อมูลตอบกลับมาที่ต้นทาง ซึ่งถือเป็นการครบกระบวนการสื่อสารจริงที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 แบบจำลองไมโครอิลิปโซมิเตอร์

3.1 แบบจำลองภาพการสะท้อนแสงของไมโครอิลิปโซมิเตอร์

ก่อนการสร้างเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์ ซึ่งผู้วิจัยนำเสนอแนวคิดใหม่ในการหาค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน โดยใช้ไมโครอิลิปโซมิเตอร์ และการเลื่อนเฟสทางแสง ร่วมกับการแปลงฟูเรียร์ เพื่อนำไปใช้คำนวณหาค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน แต่เนื่องจากการนำเสนอแนวคิดใหม่ในการสร้างเครื่องวัดชนิดนี้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องทำการออกแบบแบบจำลองของภาพความเข้มแสงที่เกิดขึ้น ของภาพบริเวณระนาบหลังเลนส์ใกล้วัตถุ (Back Focal Plane) เพื่อเป็นแสดงให้เห็นผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบกับเครื่องวัดที่สร้างขึ้น ซึ่งโครงสร้างในการออกแบบเริ่มต้นที่โครงสร้างของไมโครอิลิปโซมิเตอร์ ซึ่งจะทำให้ได้ภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์ ซึ่งการสะท้อนของแสงที่ทำให้เกิดภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์ใกล้วัตถุแสดงดังรูปที่ 3- 1



รูปที่ 3- 1 การสะท้อนของแสงที่ทำให้เกิดภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์ใกล้วัตถุ

จากรูปที่ 3- 1 แสดงภาพที่เกิดจากแสงที่ถูกสะท้อนกลับจากวัสดุผ่านเลนส์ใกล้วัตถุ ซึ่งคุณสมบัติหนึ่งของเลนส์ใกล้วัตถุ คือ แสงที่ผ่านเลนส์ใกล้วัตถุจะถูกสะท้อนตั้งแต่มุมที่ตั้งฉากจนถึงมุม θ ที่คำนวณภาพค่ารับแสง (NA) ซึ่งมุมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองนี้อ้างอิงกับอุปกรณ์จริงที่ใช้ในการสร้างเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์ ซึ่งมีค่ารับแสงที่ $NA=0.95$ ดังนั้นเมื่อแทนค่าในสมการที่ 3-1 ทำให้ได้ค่ามุม θ ที่ 71.8051 องศา

$$NA = n \sin(\theta) \tag{3-1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ NA คือ ขนาดของรูรับแสง
 θ คือ มุมตกกระทบ

ซึ่งแสงที่ตกกระทบกับวัสดุในทุก ๆ มุมตกกระทบจะถูกสะท้อนกลับมาที่เลนส์ใกล้วัตถุและเกิดเป็นภาพการสะท้อนของแสง ณ ตำแหน่งภาพระนาบโฟกัสหน้าเลนส์ (Front Focal Plane) ซึ่งเป็นภาพที่มีขนาดเล็กจึงทำให้ได้รายละเอียดของภาพที่น้อย แต่เมื่อพิจารณาภาพที่อยู่ด้านหลังของเลนส์ใกล้วัตถุซึ่งถูกเรียกว่า ภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์ (Back Focal Plane) บางครั้งถูกเรียกว่า ระนาบฟูเรียร์ (Fourier Plane) ซึ่งภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์นี้จะมีขนาดและรายละเอียดของภาพได้มากกว่า โดยภาพความเข้มแสงที่ได้ ณ ตำแหน่งนี้จะถูกนำไปประมวลผลในขั้นตอนการหาค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนต่อไป ซึ่งภาพการสะท้อนแสงนี้เป็นสิ่งหนึ่งที่ต้องมีการสร้างขึ้นเพื่อให้เป็นภาพต้นแบบเพื่อใช้เปรียบเทียบว่าเครื่องไมโครออปติคัลที่สร้างขึ้นมีภาพความเข้มแสงที่ถูกต้องหรือไม่ เพื่อที่จะดำเนินการสร้างในขั้นตอนต่อไป

3.2 การจำลองภาพความเข้มแสงจากค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน

ในการจำลองภาพการสะท้อนของแสง ผู้วิจัยจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Matlab โดยใช้สมการ r_p และ r_s เพื่อหาการเลื่อนเฟสทางแสงระหว่างองค์ประกอบทั้งสองซึ่งแสดงดังสมการที่ 3-2 และ 3-3 [17] [18]

$$r_p = \frac{nk^2 \cos \theta - \sqrt{nk^2 - \sin^2 \theta}}{nk^2 \cos \theta + \sqrt{nk^2 - \sin^2 \theta}} \quad (3-2)$$

$$r_s = \frac{\cos \theta - \sqrt{nk^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{nk^2 - \sin^2 \theta}} \quad (3-3)$$

โดยที่

θ คือ มุมตกกระทบ

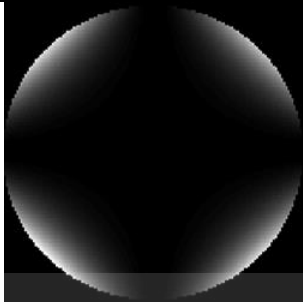
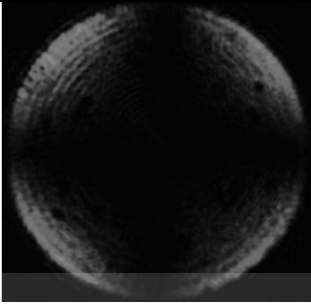
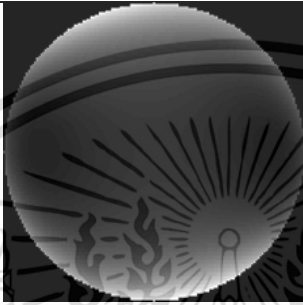
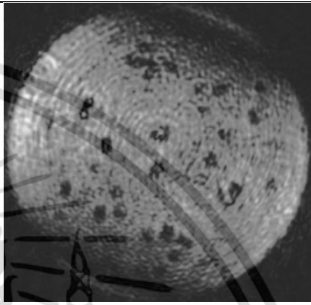



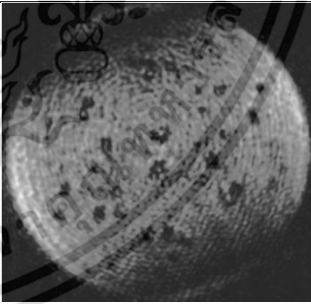
nk คือ ค่าดัชนีการหักเหแสงของวัสดุ

r_p คือ ค่าการสะท้อนของ p-polarized

r_s คือ ค่าการสะท้อนของ s-polarized

ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นแสดงดังตารางที่ 3-1 ซึ่งทำการเปรียบเทียบภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์ที่ได้ระหว่างแบบจำลองเทียบกับผลการทดลองที่ได้

ตารางที่ 3- 1 ภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับการทดลอง

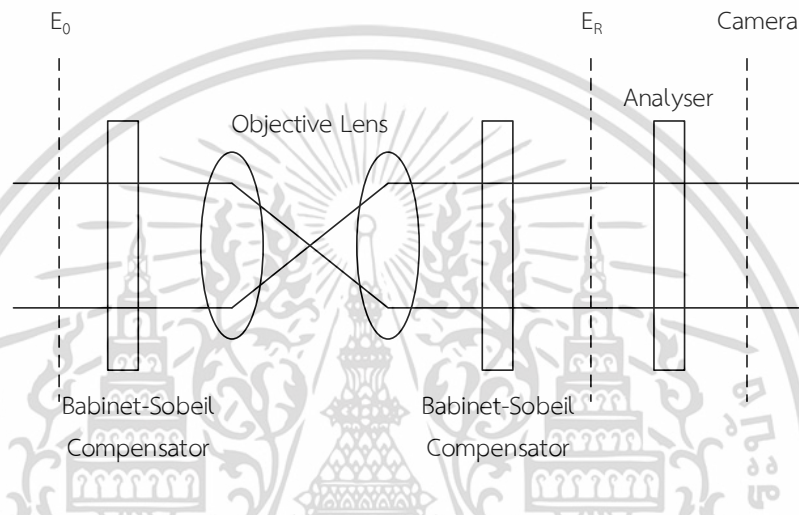
มุม	แบบจำลอง (Model)	การทดลองจริง (Experimental)
0 องศา		
45 องศา		
90 องศา		
135 องศา		

ในการบันทึกผลผู้วิจัยเลือกบันทึกเฉพาะมุมทั้ง 4 มุมนี้เนื่องจากทั้ง 4 มุมให้ผลลัพธ์ของภาพที่ชัดเจน เมื่อเทียบกับภาพอื่น ๆ และใน 4 มุมนี้ถูกนำมาใช้วิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไปในการสร้างเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของไมโครอิลิปโซมิเตอร์ที่ใช้อินเตอร์เฟอโรเมทรีแบบเลื่อนโพลาไรเซชัน

หลังจากที่ได้ภาพความเข้มแสงที่ได้จากภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์แล้ว ผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองไมโครอิลิปโซมิเตอร์ที่ใช้อินเตอร์เฟอโรเมทรีแบบเลื่อนโพลาไรเซชัน โดยอ้างอิงกับโครงสร้างของฮาร์ดแวร์ของเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์ที่จะทำการสร้างขึ้น โดยงานวิจัยนี้มีการต่ออุปกรณ์ร่วมกับเลนส์ใกล้วัตถุในรูปแบบตัวชดเชยบาบินเนตโซเลย์ (Babinet-Soleil Compensator) แสดงดังรูปที่ 3- 2



รูปที่ 3- 2 ตัวชดเชยบาบินเนตโซเลย์

จากรูปที่ 3- 2 อุปกรณ์ Analyser ในที่นี้ใช้ควอเตอร์เวฟเพลต ซึ่งทำหน้าที่ปรับรีตาร์ดเดอร์ (Retarder) ของแสง เพื่อให้ค่า R_s และ R_p เกิดการเลื่อนเฟสทางแสง (Phase Shift) ออกจากกัน โดยในโครงสร้างฮาร์ดแวร์ของเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้น ในส่วนของตัวชดเชยบาบินเนตโซเลย์ จะประกอบด้วยเลนส์ใกล้วัตถุและอุปกรณ์แยกลำแสง (Beam Splitter) จำนวน 2 ตัว เพื่อแยกลำแสงจากต้นกำเนิดแสงให้ไปตกกระทบที่วัสดุทดสอบ และเมื่อแสงถูกสะท้อนกลับจากวัสดุทดสอบจะถูกแยกอีกครั้งเพื่อส่งไปยังควอเตอร์เวฟเพลตต่อไป โดยอุปกรณ์แยกลำแสงสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์โจนส์ ดังสมการต่อไปนี้

$$BS_n = \begin{bmatrix} A_n^+ & iB_n & 0 \\ iB_n & A_n^- & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

$$\text{โดยที่ } A_n^\pm = \cos \frac{\delta_n}{2} \pm i \cos 2\phi_{B_n} \sin \frac{\delta_n}{2}$$

$$B_n = \sin \frac{\delta_n}{2} \sin 2\phi_{B_n}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ϕ_B คือ มุมที่ทำการหมุน

δ_n คือ รีทาร์ดเดอร์ของตัวขดเชยบาบินेटโซเลย์

ซึ่งเมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดแสงผ่านเลนส์ใกล้วัตถุ และตกกระทบที่วัสดุทดสอบแล้ว แสงจะถูกสะท้อนกลับจากวัสดุทดสอบกลับมาที่เลนส์ใกล้วัตถุอีกครั้ง ซึ่งแสง ณ จุดนี้ถูกกำหนดให้เป็นเวกเตอร์ไฟฟ้าของแสงที่ถูกสะท้อน (Electric Vector Reflection : E_R) โดยสมการ E_R แสดงดังสมการที่ 3-5

$$E_R = \begin{pmatrix} R^- + R^+ \cos 2\phi \\ R^+ \sin 2\phi \end{pmatrix} \quad (3-5)$$

โดยที่ $R^+ = \frac{\vec{r}_\pi}{r_\pi} + \frac{\vec{r}_\sigma}{r_\sigma} e^{i\pi}$
 $R^- = \frac{\vec{r}_\pi}{r_\pi} - \frac{\vec{r}_\sigma}{r_\sigma} e^{i\pi}$
 ϕ คือ มุมอะซิมูทที่วัดจากแกน x

จากสมการที่ 3-5 เมื่อพิจารณามุมอะซิมูทที่ 45 องศา (ซึ่งในฮาร์ดแวร์ของเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์ จะทำการเลือกใช้แสงในแนวเส้นทแยงมุมที่ 45 องศา ซึ่งนำมาใช้สร้างภาพความเข้มแสงแบบสแตก ซึ่งกล่าวในบทที่ 4 ซึ่งทำให้แทนค่ามุม $\phi = \frac{\pi}{4}$ และแทนค่า R^+ และ R^- จะได้ว่า

$$E_R = \begin{pmatrix} R^- + R^+ \cos\left(\frac{2\pi}{4}\right) \\ R^+ \sin\left(\frac{2\pi}{4}\right) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R^- \\ R^+ \end{pmatrix}$$

$$E_R = \begin{pmatrix} \frac{\vec{r}_\pi}{r_\pi} - \frac{\vec{r}_\sigma}{r_\sigma} e^{i\pi} \\ \frac{\vec{r}_\pi}{r_\pi} + \frac{\vec{r}_\sigma}{r_\sigma} e^{i\pi} \end{pmatrix} \quad (3-6)$$

จากคุณสมบัติเอกลักษณ์ของออยเลอร์ (Euler's Identity) กล่าวไว้ว่า $e^{i\pi} + 1 = 0$ ดังนั้น $e^{i\pi} = -1$ แทนลงในสมการจะได้ว่า

$$E_R = \begin{pmatrix} \frac{\vec{r}_\pi}{r_\pi} + \frac{\vec{r}_\sigma}{r_\sigma} \\ \frac{\vec{r}_\pi}{r_\pi} - \frac{\vec{r}_\sigma}{r_\sigma} \end{pmatrix} \quad (3-7)$$

โดยที่ $\frac{\vec{r}_\pi}{r_\pi} = r_\pi e^{i\phi}$
 $\frac{\vec{r}_\sigma}{r_\sigma} = r_\sigma e^{i\phi}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้ง \vec{r}_π และ \vec{r}_σ เป็นจำนวนเชิงซ้อน (Complex Form) ซึ่งองค์ประกอบของแสงเมื่อแสงผ่านเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) แล้วจะมีรูปแบบดังสมการที่ 3-8

$$E_R = \begin{bmatrix} \text{Obj_x_1} \\ \text{Obj_y_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{r}_\pi + \vec{r}_\sigma \\ \vec{r}_\pi - \vec{r}_\sigma \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

จากเมทริกซ์โจนส์ (Jones Matrices) ของโพลาไรเซอร์เชิงเส้น (Linear Polarizer) ตามแนวแกนตั้ง (Y- Axis) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3-9)

$$LP = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

และสมการการปรับแกน Fast Axis ของควอเตอร์เวฟเพลต ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้เมทริกซ์โจนส์ โดยสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 3-10

$$R_{QWP} = \begin{bmatrix} \cos^2(\gamma) * A_1 + \sin^2(\gamma) * A_2 & \frac{1}{2} \sin(2\gamma) * (A_1 - A_2) \\ \frac{1}{2} \sin(2\gamma) * (A_1 - A_2) & \sin(\gamma) * A_1 + \cos(\gamma) * A_2 \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

โดยที่

$$A_1 = e^{\frac{\pi}{2}i} = \sqrt{2} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}i \right)$$

$$A_2 = e^{-\frac{\pi}{2}i} = \sqrt{2} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2}i \right)$$

γ คือ การปรับมุม Fast Axis ของควอเตอร์เวฟเพลต

θ คือ มุมตกกระทบ ซึ่งถูกกำหนดโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (NA = 0.95)

ϕ คือ มุมโพลาไรซ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ที่ 45 องศา

แทนค่า A_1 และ A_2 ลงในสมการที่ (3-10) จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$R_{QWP} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}i \right) \cos^2(\gamma) + \sqrt{2} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2}i \right) \sin^2(\gamma) & \frac{\sqrt{2} \sin(2\gamma)i}{2} \\ \frac{\sqrt{2} \sin(2\gamma)i}{2} & \sqrt{2} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2}i \right) \cos^2(\gamma) + \sqrt{2} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}i \right) \sin^2(\gamma) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{i\sqrt{2} \cos(2\gamma)}{2} & \frac{i\sqrt{2} \sin(2\gamma)}{2} \\ \frac{i\sqrt{2} \sin(2\gamma)}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{i\sqrt{2} \cos(2\gamma)}{2} \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore R_{QWP} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{i \cos(2\gamma)}{\sqrt{2}} & \frac{i \sin(2\gamma)}{\sqrt{2}} \\ \frac{i \sin(2\gamma)}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{i \cos(2\gamma)}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

หลังจากแสงที่ถูกสะท้อนกลับ E_R วิ่งผ่านควอเตอร์เวฟเพลต และโพลาริเซอร์เชิงเส้น สามารถเขียนเมตริกซ์การส่งผ่าน (Matrix Transformation) เพื่อให้ได้สมการของแสงเอาต์พุตที่ได้ แสดงดังสมการที่ 3-12

$$E_{out} = LP \times R_{QWP} \times E_R$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{i \cos(2\gamma)}{\sqrt{2}} & \frac{i \sin(2\gamma)}{\sqrt{2}} \\ \frac{i \sin(2\gamma)}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{i \cos(2\gamma)}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_\pi + r_\sigma \\ r_\pi - r_\sigma \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

$$E_{out} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\sqrt{2}R_\pi}{2} - \frac{\sqrt{2}R_\sigma}{2} - \frac{\sqrt{2}R_\pi \cos(2\gamma)i}{2} + \frac{\sqrt{2}R_\sigma \cos(2\gamma)i}{2} + \frac{\sqrt{2}R_\pi \sin(2\gamma)i}{2} + \frac{\sqrt{2}R_\sigma \sin(2\gamma)i}{2} \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

เมื่อพิจารณา E_{out} ที่ได้ในสมการที่ (3-13) พบว่าในแต่ละเทอม คือ แสงที่ถูกสะท้อนกลับเข้ามาที่เลนส์ใกล้วัตถุ จะมีมุมตกกระทบตั้งแต่มุม 0 องศา (มุมตกกระทบที่ตั้งฉากกับวัสดุทดสอบ) โดยแสงตกกระทบจะมีทั้งแอมพลิจูด และเฟส ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3-2 ซึ่งผู้วิจัยต้องการหาแสงที่มีมุมตกกระทบทั้งหมดที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถหามุมตกกระทบของแสงในทิศทางตรงข้าม โดยใช้ Complex Conjugate เพื่อหาแสงตกกระทบในทิศทางต่าง ๆ ดังนั้นจึงแยกพิจารณาออกเป็นเทอม ๆ จากนั้นทำการกระจายเทอมที่เป็นไปได้ ร่วมกับ Complex Conjugate ของเทอมนั้น ๆ

ตารางที่ 3-2 ค่าการสะท้อนแสงที่ได้จากเลนส์ใกล้วัตถุ

$A = \frac{\sqrt{2}R_\pi}{2}$	$D = + \frac{\sqrt{2}R_\sigma \cos(2\gamma)i}{2}$
$B = - \frac{\sqrt{2}R_\sigma}{2}$	$E = + \frac{\sqrt{2}R_\pi \sin(2\gamma)i}{2}$
$C = - \frac{\sqrt{2}R_\pi \cos(2\gamma)i}{2}$	$F = + \frac{\sqrt{2}R_\sigma \sin(2\gamma)i}{2}$

ตารางที่ 3-3 การกระจายเทอมของการสะท้อนแสงที่เป็นได้ที่เกิดขึ้นในเลนส์ใกล้วัตถุ

$Y_1 = A\bar{A} + A\bar{B} + A\bar{C} + A\bar{D} + A\bar{E} + A\bar{F}$
$Y_2 = B\bar{A} + B\bar{B} + B\bar{C} + B\bar{D} + B\bar{E} + B\bar{F}$
$Y_3 = C\bar{A} + C\bar{B} + C\bar{C} + C\bar{D} + C\bar{E} + C\bar{F}$
$Y_4 = D\bar{A} + D\bar{B} + D\bar{C} + D\bar{D} + D\bar{E} + D\bar{F}$
$Y_5 = E\bar{A} + E\bar{B} + E\bar{C} + E\bar{D} + E\bar{E} + E\bar{F}$
$Y_6 = F\bar{A} + F\bar{B} + F\bar{C} + F\bar{D} + F\bar{E} + F\bar{F}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 3- 3 แสดงให้เห็นการกระจายเทอมของแสงที่เป็นไปได้ทั้งหมด โดยการนำทุก ๆ เทอมคูณด้วยค่า Complex Conjugate ของเทอมนั้น ๆ จากนั้นทำการคูณกระจายเพื่อให้ได้แสงตกกระทบบที่มุมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในเลนส์ใกล้วัตถุ จากนั้นนำ Y_1 ถึง Y_6 ที่ได้มารวมกันจะได้ แสงของมุมตกกระทบบทั้งหมดที่เป็นไปได้ ดังสมการที่ 3-14

$$\therefore E_{\text{BFP}} = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 + Y_6 \quad (3-14)$$

จากสมการที่ 3-14 เมื่อแทนค่า Y_1 ถึง Y_6 ที่ได้ ผลลัพธ์แสดงดังสมการที่ 3-15 ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบของแสงที่มุมตกกระทบบต่าง ๆ ซึ่งประกอบไปด้วยเทอมที่เป็นค่าคงที่ และเทอมที่เป็นจำนวนเชิงซ้อน

$$\begin{aligned} E_{\text{BFP}} = & \frac{R_{\pi}^2 \cos^2(2\gamma)}{2} + \frac{R_{\sigma}^2 \cos^2(2\gamma)}{2} + \frac{R_{\pi}^2}{2} + \frac{R_{\sigma}^2}{2} + \frac{R_{\pi}^2 \sin^2(2\gamma)}{2} + \frac{R_{\sigma}^2 \sin^2(2\gamma)}{2} \\ & - R_{\pi}^2 \cos(2\gamma) \sin(2\gamma) + R_{\sigma}^2 \cos(2\gamma) \sin(2\gamma) - \frac{R_{\pi} R_{\sigma} e^{-ap^i} e^{as^i}}{2} - \frac{R_{\pi} R_{\sigma} e^{ap^i} e^{-as^i}}{2} \\ & + R_{\pi} R_{\sigma} \sin(2\gamma) e^{-ap^i} e^{as^i} - R_{\pi} R_{\sigma} \sin(2\gamma) e^{ap^i} e^{-as^i} - \frac{R_{\pi} R_{\sigma} \cos^2(2\gamma) e^{-ap^i} e^{as^i}}{2} \\ & - \frac{R_{\pi} R_{\sigma} \cos^2(2\gamma) e^{ap^i} e^{-as^i}}{2} + \frac{R_{\pi} R_{\sigma} \sin^2(2\gamma) e^{-ap^i} e^{as^i}}{2} + \frac{R_{\pi} R_{\sigma} \sin^2(2\gamma) e^{ap^i} e^{-as^i}}{2} \quad (3-15) \end{aligned}$$

จากสมการ (3-15) ทำการจัดกลุ่ม และแยกเทอมต่าง ๆ ที่มีรูปแบบใกล้เคียงกันดังนี้

ตารางที่ 3- 4 การจัดกลุ่มและแยกเทอมของมุมตกกระทบบของแสง

$A_1 = \frac{R_{\pi}^2 \cos^2(2\gamma)}{2} + \frac{R_{\pi}^2 \sin^2(2\gamma)}{2} + \frac{R_{\pi}^2}{2} + \frac{R_{\sigma}^2 \cos^2(2\gamma)}{2} + \frac{R_{\sigma}^2 \sin^2(2\gamma)}{2} + \frac{R_{\sigma}^2}{2}$
$A_2 = -R_{\pi}^2 \cos(2\gamma) \sin(2\gamma) + R_{\sigma}^2 \cos(2\gamma) \sin(2\gamma)$
$A_3 = + \frac{R_{\pi} R_{\sigma} e^{-ap^i} e^{as^i}}{2} + \frac{R_{\pi} R_{\sigma} e^{ap^i} e^{-as^i}}{2}$
$A_4 = -R_{\pi} R_{\sigma} \sin(2\gamma) e^{-ap^i} e^{as^i} + R_{\pi} R_{\sigma} \sin(2\gamma) e^{ap^i} e^{-as^i}$
$A_5 = + \frac{R_{\pi} R_{\sigma} \cos^2(2\gamma) e^{-ap^i} e^{as^i}}{2} + \frac{R_{\pi} R_{\sigma} \cos^2(2\gamma) e^{ap^i} e^{-as^i}}{2}$
$A_6 = - \frac{R_{\pi} R_{\sigma} \sin^2(2\gamma) e^{-ap^i} e^{as^i}}{2} - \frac{R_{\pi} R_{\sigma} \sin^2(2\gamma) e^{ap^i} e^{-as^i}}{2}$

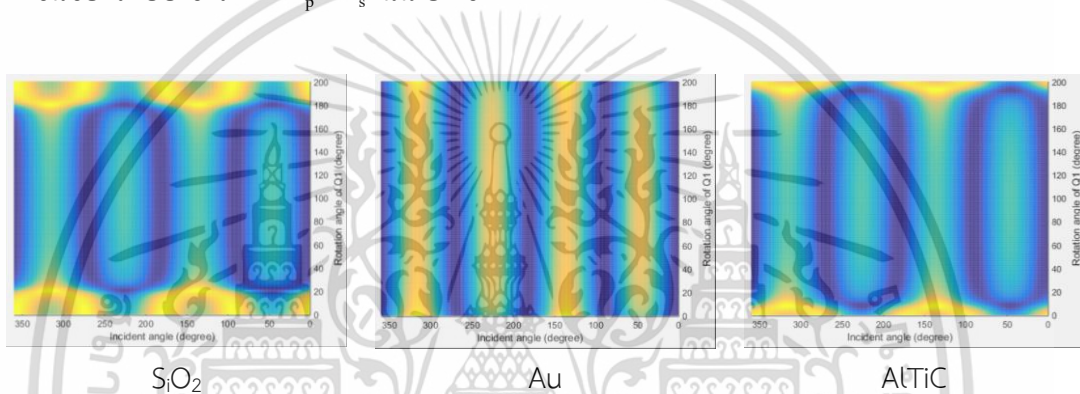
จากสมการที่ 3-15 เป็นสมการของแสงที่ถูกสะท้อนกลับจากวัสดุเลนส์ใกล้วัตถุ และแสงที่ได้จะถูกส่งต่อไปที่ควอเตอร์เวฟเพลตเพื่อปรับบริหารเตอร์ของแสงต่อไป โดยเมื่อทำการจัดกลุ่มสมการเพื่อยุบรวมเข้าด้วยกัน คือ เทอม A_1, A_2, A_4 จะพบว่า มีเทอมของโคซายน์ที่มุม 2γ เกิดขึ้น ดังสมการที่ 3-15 ในขณะที่เมื่อนำเทอม A_3, A_5, A_6 มารวมเข้าด้วยกัน พบว่ามีเทอมของโคซายน์ที่มุม 4γ เกิดขึ้น ดังสมการที่ 3-16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{r(2t)} = \frac{R_\sigma^2 \sin(4\gamma)}{2} - \frac{R_\pi^2 \sin(4\gamma)}{2} + R_\pi^2 + R_\sigma^2 - R_\pi R_\sigma \cos(a_p - a_s - 2\gamma) + R_\pi R_\sigma \cos(a_p - a_s + 2\gamma) \quad (3-16)$$

$$E_{r(4t)} = -\frac{R_\pi R_\sigma (\cos(a_p - a_s - 4\gamma) + \cos(a_p - a_s + 4\gamma) + 2\cos(a_p - a_s))}{2} \quad (3-17)$$

ถ้าพิจารณาทั้งเทอม 2t และเทอม 4t พบว่ามีเทอมของโคไซน์ซึ่งโดยปกติอยู่ในรูปของ $\cos(\omega t)$ ซึ่ง 2γ และ 4γ เป็นการเปลี่ยนแปลงเชิงความถี่ นอกจากนั้นเป็นค่าการเลื่อนเฟสที่เกิดขึ้นของระบบ ซึ่งได้แก่ $a_p - a_s$ นั้นเอง ซึ่ง



รูปที่ 3- 3 ภาพการสะท้อนกลับของแสงที่ได้จากแบบจำลอง

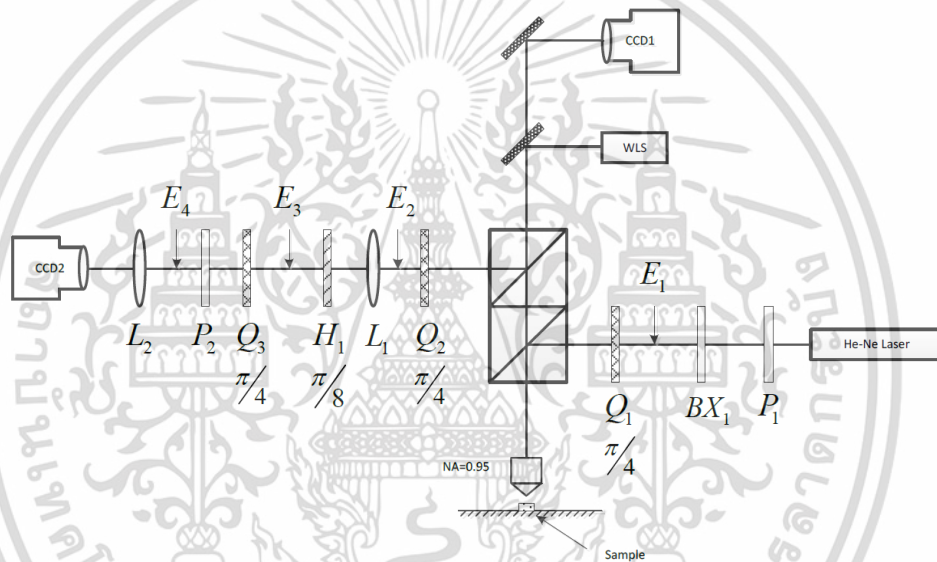
ซึ่งจะเห็นว่าทั้ง 3 ภาพมีการเปลี่ยนแปลง 4 ครั้ง (ความสว่าง-ความมืด) ซึ่งตรงกับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแบบ 4t โดยที่ Au จะมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลง 4t ในทุกแถวของข้อมูล แต่ในขณะที่ SiO_2 และ AlTiC มีการเปลี่ยนแปลง 4t ที่ชัดเจนเฉพาะในแถวที่อยู่บริเวณตรงกลางเท่านั้น แต่ในแถวส่วนบนและแถวส่วนล่างมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจน

บทที่ 4

ไมโครอิลิปโซมิเตอร์ที่ใช้อินเตอร์เฟอโรเมทรีแบบเลื่อนโพลาริเซชัน

4.1 ไมโครอิลิปโซมิเตอร์ที่ใช้อินเตอร์เฟอโรเมทรีแบบเลื่อนโพลาริเซชัน แบบที่ 1

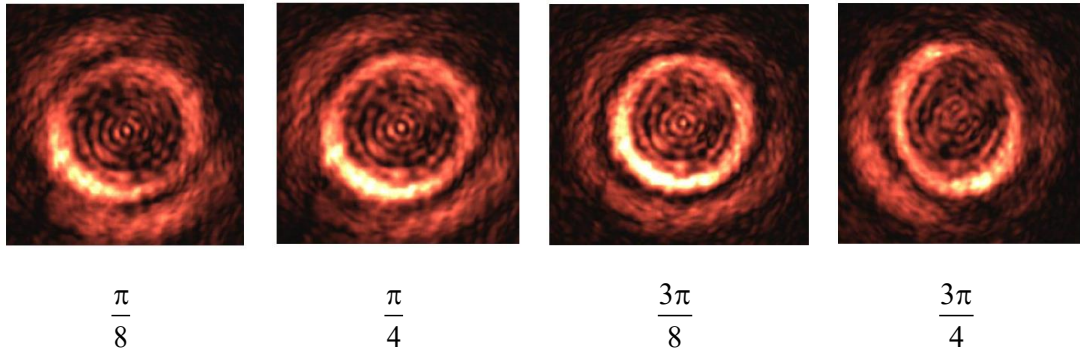
โครงสร้างการเชื่อมต่อในแบบที่ 1 เป็นการทดลองในช่วงต้นการของวิจัยนี้ ซึ่งสังเกตว่าในส่วนประกอบของตัวชดเชยบาบินเตโซเลีย จะมีโครงสร้างเดียวกับรูปที่ 3- 2 ซึ่งในส่วนของตัวชดเชยบาบินเตโซเลีย ใช้เป็นควอเตอร์เวฟเพลต Q_1 และ Q_2 ซึ่งทำการปรับมุม Fast Axis ไปที่มุม 45 องศา



รูปที่ 4- 1 ไดอะแกรมการเชื่อมต่ออุปกรณ์แสงของไมโครอิลิปโซมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้นในรูปแบบที่ 1

จากโครงสร้างการเชื่อมต่ออุปกรณ์แสงในรูปที่ 4- 1 เป็นการออกแบบเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์ในช่วงต้น ซึ่งจะประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง แสดงในไดอะแกรม โดยที่จะมีอุปกรณ์ควอเตอร์เวฟเพลต Q_1, Q_2 อุปกรณ์แยกลำแสง (Beam Splitter) และเลนส์ใกล้วัตถุ เพื่อสร้างเป็นตัวชดเชยบาบินเตโซเลีย (Babinet-Soleil Compensator) ส่วนด้านบนของไดอะแกรมประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงสีขาว (White Light Source) และกล้อง CCD1 เพื่อทำหน้าที่ปรับโฟกัสให้กับชิ้นงานและเลนส์ใกล้วัตถุ โดยที่เลนส์ L_1 ทำหน้าที่โฟกัสภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์ เพื่อส่งให้กับกล้อง CCD2 เพื่อบันทึกภาพ และนำไปทำการวิเคราะห์หาค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนต่อไป โดยไดอะแกรมของไมโครอิลิปโซมิเตอร์ในรูปแบบที่ 1 จะทำการบันทึกภาพ 4 รูปแบบ โดยทำการปรับควอเตอร์เวฟเพลต Q_3 โดยทำการปรับมุม Fast Axis ไปที่มุม $\frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{8}, \frac{3\pi}{4}$ ตามลำดับ โดยทำการบันทึกภาพ

ความเข้มแสงทุกครั้งที่ทำกรปรับมุม Fast Axis ดังนั้นจะทำให้ได้ภาพภาพ I_1, I_2, I_3, I_4 ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4- 2 ภาพระนาบโพกัสหลังเลนส์ที่ได้จากการปรับควอเตอร์เวฟเฟลต

จากนั้นนำภาพทั้ง 4 มาคำนวณตามสมการที่ 4-1 เพื่อทำการหามุมเดลต้า ซึ่งจะเห็นได้ว่าการนำภาพทั้ง 4 มากระทำทางคณิตศาสตร์ของเมทริกซ์ หลังจากนั้นจึงทำการแปลงให้อยู่ในรูปของมุมเดลต้า

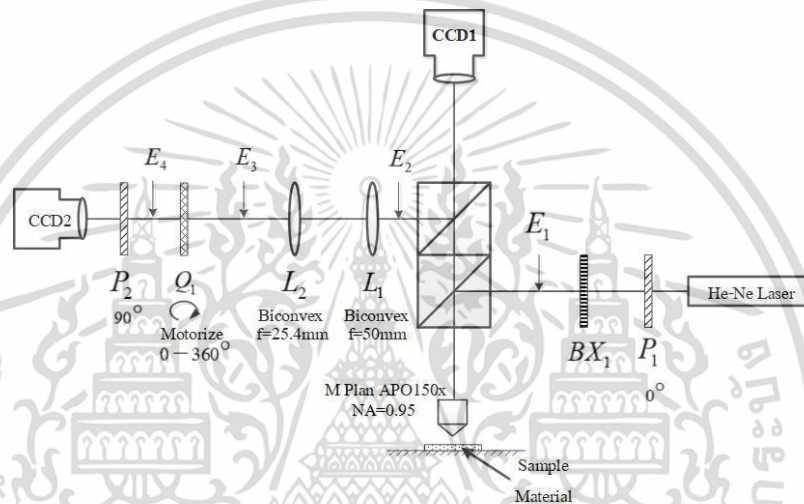
$$\Delta = \tan^{-1} \frac{I_2 - I_4}{2(I_1 - I_3)} \quad (4-1)$$

ผลลัพธ์ของการคำนวณตามสมการที่ 4-1 จะได้ภาพพาราโบลาหงาย ซึ่งผู้วิจัยต้องทำการหาจุดกึ่งกลางของรูป ซึ่งก็คือตำแหน่งที่ลึกที่สุดในภาพเดลต้าที่ได้ หลังจากนั้นทำการลากเส้นจากจุดกึ่งกลางของภาพมาที่บริเวณขอบภาพ ซึ่งจะได้เส้นข้อมูลที่มีความโค้ง หลังจากนั้นนำเส้นโค้งที่ได้เข้าสู่กระบวนการปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting) เพื่อหาค่าการเลื่อนเฟสระหว่าง R_s และ R_p ของแสง ซึ่งทำให้ได้ค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน (n, k) แต่วิธีการในแบบที่ 1 มีข้อเสียคือ ในการหาค่าจุดกึ่งกลางของภาพ ไม่ได้เป็นตำแหน่งที่อยู่บริเวณตรงกลาง แต่ต้องหาดำแหน่งบริเวณกึ่งกลางจากตำแหน่งที่ต่ำที่สุดก่อน นอกจากนี้การเลือกเส้นโค้งที่จะนำมาพล็อต ไม่สามารถเลือกแบบกำหนดมุมที่โค้งที่ได้เนื่องจากภาพเดลต้าที่ได้ (บางครั้งเรียกภาพ Phase Map) ไม่ได้มีความสมมาตรเหมือนรูปพาราโบลาหงาย ส่งผลให้ต้องทำการเลือกค่าที่เหมาะสมจากภาพ Phase Map ที่ได้ ทำให้วิธีการนี้เกิดข้อผิดพลาดได้มาก จึงมีแนวคิดในการปรับเปลี่ยนกระบวนการในการหาภาพ Phase Map และการคำนวณหาค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน โดยใช้วิธีการในแบบที่ 2

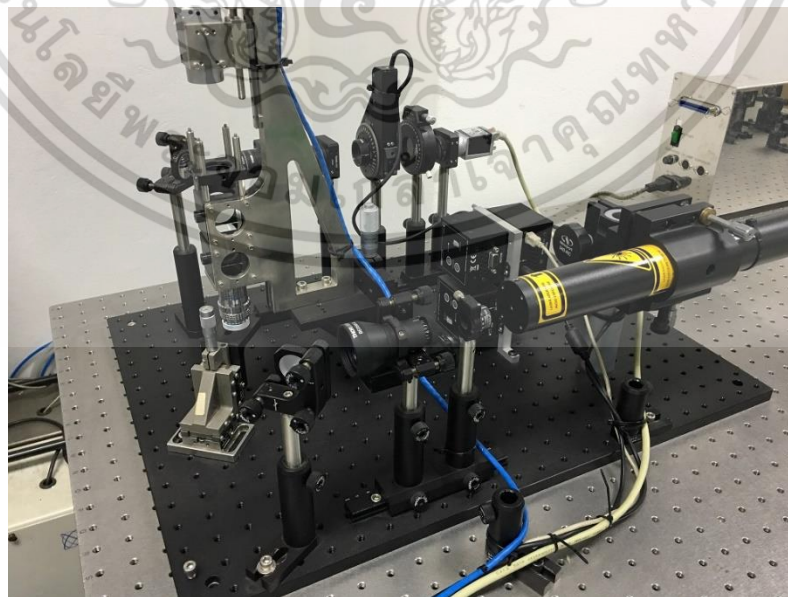
4.2 ไมโครอิลิปโซมิเตอร์ที่ใช้อินเตอร์เฟอโรเมทรีแบบเลื่อนโพลาไรเซชัน แบบที่ 2

ในโครงสร้างการเชื่อมต่ออุปกรณ์แสงในรูปแบบที่ 2 จะแตกต่างจากรูปแบบที่ 1 ตรงส่วนของตัวชดเชยบาบินเนตโซเลีย ซึ่งทำการตัดควอเตอร์เวฟเฟลต Q_1 และ Q_2 ออกไปเนื่องจากการปรับแกน Fast Axis ของทั้งสองตัวทำให้ได้ค่ามุม Fast Axis เดียวกับการไม่ใส่ควอเตอร์เวฟเฟลตทั้งสองจึงได้ทำการตัดอุปกรณ์ทั้งสองออกไป นอกจากนี้ยังตัดฮาฟเวฟเฟลต ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับทิศทางของแสง ให้เหลือเพียงควอเตอร์เวฟเฟลตตัวเดียว ซึ่งสามารถทำการปรับทิศทางของแสงได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งโครงสร้างการเชื่อมต่อของเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์ที่ใช้อินเตอร์เฟอโรเมทรีแบบเลื่อนโพลาไรเซชัน รูปแบบที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4- 3 โดยที่รูปของตัวเครื่องในส่วนของวงวัดค่าดัชนีการหักเหแสงแสดงดังรูปที่ 4- 3 ไดอะแกรมการเชื่อมต่ออุปกรณ์แสงของไมโครอิลิปโซมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้นในรูปแบบที่ 2 โดยที่แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้เครื่องฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ (He-Ne Laser) ซึ่งเป็นแสงเลเซอร์แบบไม่ทำการโพลาไรซ์ (Unpolarized Light) ที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร แสงเลเซอร์แบบไม่ทำการโพลาไรซ์ถูกแปลงเป็นแสงโพลาไรซ์โดยใช้โพลาไรเซอร์ P_1 และแสงที่ถูกโพลาไรซ์แล้วจะถูกขยายขนาดของลำแสงให้สูงขึ้น โดยใช้อุปกรณ์ขยายลำแสง (Beam Expander) BX_1 หลังจากนั้นลำแสงจะผ่านไปยังเลนส์ใกล้วัตถุที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากเป็นแบบรูรับแสงขนาดใหญ่ (High Numerical Aperture)



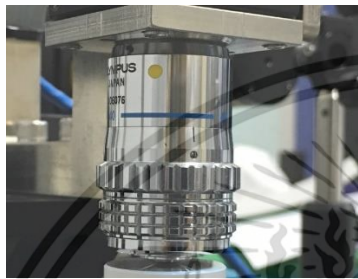
รูปที่ 4- 3 ไดอะแกรมการเชื่อมต่ออุปกรณ์แสงของไมโครอิลิปโซมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้นในรูปแบบที่ 2



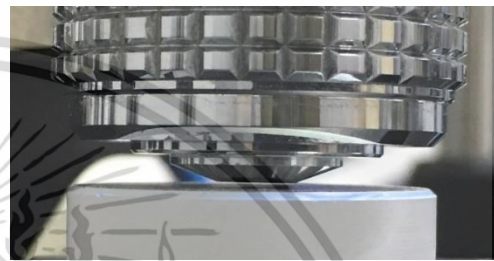
รูปที่ 4- 4 โครงสร้างการเชื่อมต่ออุปกรณ์แสงของเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ท่านไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4- 3 เมื่อนำอุปกรณ์ทางแสงติดตั้งตามโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้แล้ว แสดงดังรูปที่ 4- 4 ซึ่งในการออกแบบเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์ชุดนี้ ต้องทำการออกแบบให้ประหยัดพื้นที่ในการสร้างเนื่องมาจาก ตัวเครื่องต้องถูกนำไปติดตั้งในพื้นที่ที่มีขนาดจำกัดไม่สามารถเชื่อมต่อโครงสร้างเป็นแนวเส้นตรงได้ ดังนั้นในการสร้างเครื่องจำเป็นจะต้องทำเปลี่ยนการเชื่อมต่อให้มีลักษณะเป็นตัวยู จากการที่ติดตั้งแบบเส้นตรง โดยเริ่มจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ และไปจบที่ตำแหน่งกล้อง CCD2 โดยมีตำแหน่งการทดสอบจะอยู่บริเวณส่วนกลาง ซึ่งก็คือตำแหน่งด้านล่างของตัวยูนั่นเอง



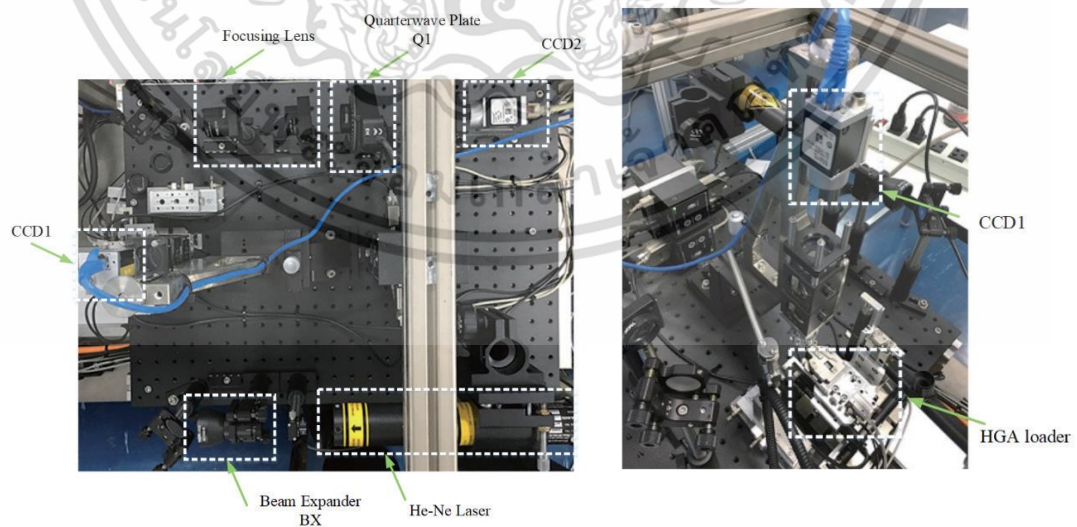
ก) เลนส์ใกล้วัตถุที่ใช้ในการทดลอง



ข) ตำแหน่งการวัด

รูปที่ 4- 5 เลนส์ใกล้วัตถุที่ใช้ในเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์

จากรูปที่ 4- 5 แสดงเลนส์ใกล้วัตถุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ พร้อมกับในรูปที่ 4- 5ข แสดงตำแหน่งของการวัดวัสดุทดสอบ ซึ่งมีระยะห่างน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร อันเนื่องมาจากเลนส์ใกล้วัตถุที่ใช้ในการทดลองมีอัตราขยาย 150 เท่าจึงทำให้ระยะทำงาน (Working Distance) ในการโฟกัสภาพมีระยะห่างที่น้อยกว่า 1 มิลลิเมตร



(ก) โครงสร้างการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทางแสง

(ข) กล้องและชุดโหลดตัวอย่าง

รูปที่ 4- 6 ตำแหน่งและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุตัวนี้ คือ 150 เท่า ดังนั้นขนาดของลำแสง (Spot Size) จะมีขนาดน้อยกว่า 0.1 ไมโครเมตร ซึ่งการที่ขนาดของลำแสงมีขนาดเล็กทำให้สามารถวัดค่าต่าง ๆ บนพื้นผิวที่มีขนาดเล็กได้ เช่น หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ซึ่งมีพื้นที่ขนาด 50×50 ไมโครเมตร โดยค่า NA ของเลนส์ใกล้วัตถุที่ใช้มีค่าเท่ากับ 0.95 ซึ่งทำให้สามารถหาค่ามุมตกกระทบตั้งแต่ 0-71.8051 องศา ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 4-1

$$NA = n \sin(\theta) \quad (4-1)$$

หลังจากนั้นลำแสงที่ถูกสะท้อนจากวัสดุทดสอบกลับมายังเลนส์ใกล้วัตถุและผ่านต่อไปยังอุปกรณ์แยกลำแสง (Beam Splitter) ซึ่งลำแสงส่วนหนึ่งจะส่งไปยังเลนส์ L_1 และ L_2 โดยที่ตำแหน่งของเลนส์ L_1 และ L_2 จะถูกถือไว้ไม่ให้เคลื่อนที่ ซึ่ง L_1 และ L_2 จะทำหน้าที่โฟกัสภาพ ณ ตำแหน่งภาพที่อยู่บริเวณท้ายเลนส์ใกล้วัตถุ ที่ถูกเรียกว่า ภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์ (Back Focal Plane) หรือระนาบฟูเรียร์ (Fourier Plane) ณ ลำแสงที่ได้หลังจาก L_1 และ L_2 กำหนดให้เป็น E_3 หลังจากนั้นลำแสงจะผ่านไปยังหมุนควอเตอร์เวฟเพลต Q_1 และโพลาริซเซอร์ P_2 ตามลำดับ ในขั้นตอนสุดท้ายกล้อง CCD2 ทำหน้าที่ถ่ายภาพลำแสงที่ผ่านโพลาริซเซอร์ P_2 โดยที่หมุนควอเตอร์เวฟเพลต Q_1 จะทำการหมุนจากมุม 1-360 องศา เพื่อปรับแกนแสง (Fast Axis) โดยที่กล้อง CCD2 จะทำการบันทึกภาพทุก ๆ การปรับมุมหมุนของหมุนควอเตอร์เวฟเพลต Q_1 โดยในทุก ๆ ภาพที่ถูกบันทึกจะถูกทำการบันทึกแยกออกเป็น 4 ส่วน ตามแนวเส้นทแยงมุม 0, 45, 90 และ 135 ของในแต่ละภาพ

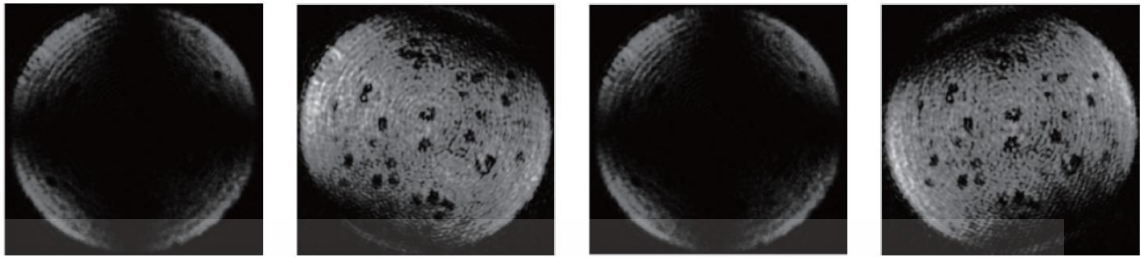
4.3 ขั้นตอนและกระบวนการของไมโครอิลิปโซมิเตอร์

ฝั่งงานแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อคำนวณหาค่า n , k จากภาพที่ได้ทำการบันทึกโดยกล้อง CCD2 แสดงดังรูปที่ 4- 8 โดยเริ่มต้นในขั้นตอนแรกระบบจะทำการบันทึกภาพจากกล้อง CCD2 โดยทำการแปลงภาพจากสีให้เป็นภาพขาวเทา (Grayscale Image) โดยควอเตอร์เวฟเพลต Q_1 จะถูกหมุนตั้งแต่มุม 1 – 360 องศา โดยปรับมุมครั้งละ 1 องศา ดังนั้นในการหาค่า n , k ใน 1 ครั้งจะได้ภาพจาก CCD2 ทั้งหมด 360 ภาพ ซึ่งภาพที่ได้จากกล้อง CCD2 แสดงดังรูปที่ 4- 9 โดยในแต่ละภาพจะถูกเลือกข้อมูลความเข้มแสงตามแนวเส้นทแยงมุม 45 องศา โดยข้อมูลที่เลือกนี้จะเรียกว่าเป็น เส้นข้อมูล (Data Line) ในขั้นตอนถัดมาเส้นข้อมูลของในแต่ละรูปทั้ง 360 รูป จะถูกวางในแนวหลัก (Column) เรียงต่อกันตั้งแต่หลักที่ 1 ถึง 360 ซึ่งจะได้รูปที่เรียกว่าภาพความเข้มแสงแบบสแตก (Stacked Intensity Image : SII) ซึ่งขั้นตอนการสร้างภาพโดยการเรียงเส้นข้อมูลของรูปทั้ง 360 รูป ของวัสดุ SiO_2 แสดงดังรูปที่ 4- 12 หลังจากนั้นทำการหาค่าของการเลื่อนเฟสทางแสง (Optical Phase Shift) แต่ละมุมตกกระทบ โดยใช้เทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform) โดยในขั้นตอนนี้ภาพ SII มาตัดออกเป็นแถว ๆ ซึ่งถูกเรียกว่า Horizontal Line ซึ่งค่าการเลื่อนเฟสทางแสงที่ถูกคำนวณโดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของแต่ละมุมตกกระทบจะถูกนำมาพล็อตเป็นกราฟ โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์ คือ มุมเดลต้า (Delta Angle) ซึ่งตัวอย่างของมุมเดลต้าแสดงดังรูปที่ 8 โดยที่มุมเดลต้าที่ได้ประกอบด้วยสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสแบบ

เอกสารนี้ฉับพลัน (Transient Impulse) ดังนั้นต้องทำการกำจัดการเปลี่ยนแปลงเฟสแบบฉับพลันนี้ออกไป

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยขั้นตอนที่เรียกว่า การคืนรูปเฟส (Phase Unwrapped) โดยเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเฟสแบบฉับพลันแล้ว จะนำข้อมูลที่ได้มาเข้าสู่กระบวนการปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting) เพื่อหาค่า n , k



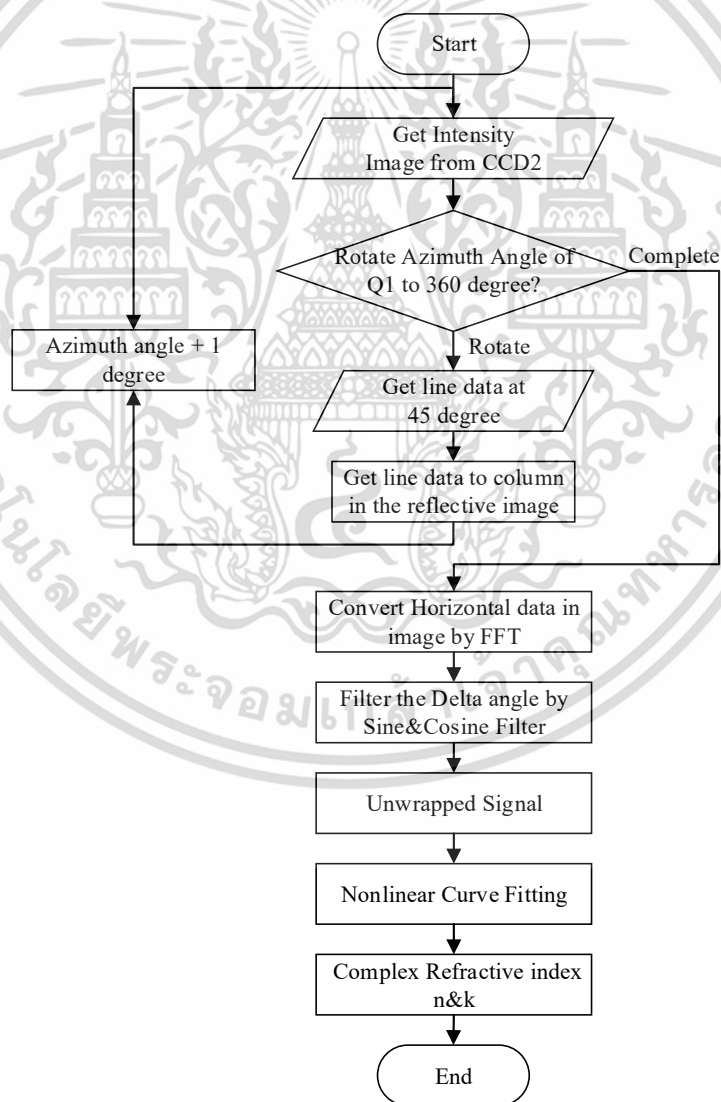
(ก) มุม 0 องศา

(ข) มุม 45 องศา

(ค) มุม 90 องศา

(ง) มุม 135 องศา

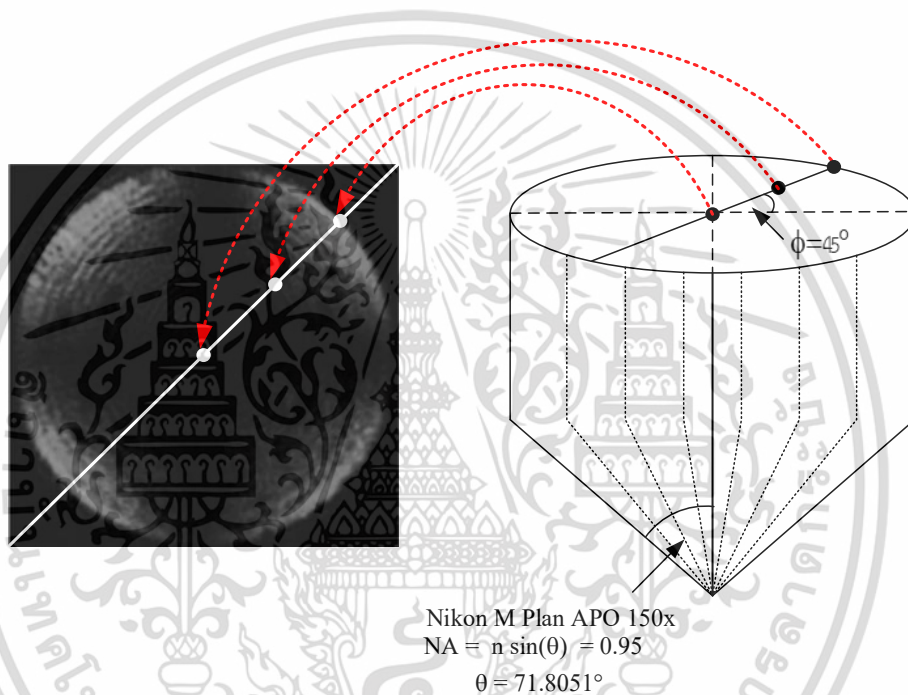
รูปที่ 4- 7 การปรับมุมของควอเตอร์เวฟเฟลตที่มุมต่าง ๆ



รูปที่ 4- 8 ขั้นตอนการประมวลผลภาพทางแสง

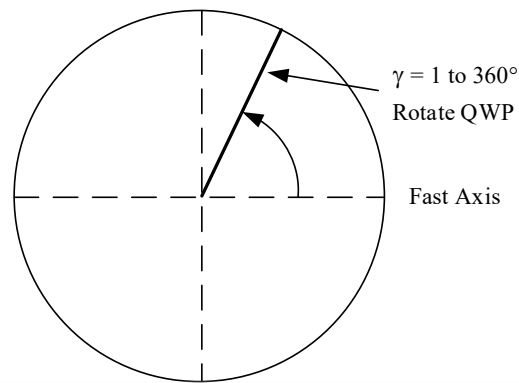
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4- 8 แสดงขั้นตอนการประมวลผลภาพทางแสง โดยในขั้นตอนแรกจะนำภาพที่ได้จากเครื่องไมโครอิลิปโวมิเตอร์ ซึ่งก็คือภาพความเข้มแสงที่ได้จากภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์ของเลนส์ใกล้วัตถุมาเข้าสู่กระบวนการประมวลผลภาพทางแสง ซึ่งภาพความเข้มแสงที่ได้ก็คือภาพหน้าตัดของลำแสง ซึ่งจะมีลักษณะเป็นภาพวงกลม ซึ่งแสดงในรูปที่ 4- 7 หลังจากนั้นจะนำภาพที่ได้มาปรับมุมของควอเตอร์เวฟเพลต เพื่อทำการปรับบริหารเตอร์ขององค์ประกอบแสง ซึ่งในทุกครั้งที่ทำการปรับมุมของควอเตอร์เวฟเพลต (ทำการปรับครึ่งละ 1 องศา) จะได้ภาพความเข้มแสงที่ความแตกต่าง ๆ กัน ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้ภาพความเข้มแสง เฉพาะในแนวเส้นทะแยงมุมที่ 45 องศา มาทำการวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติทางแสงในขั้นตอนต่อไป



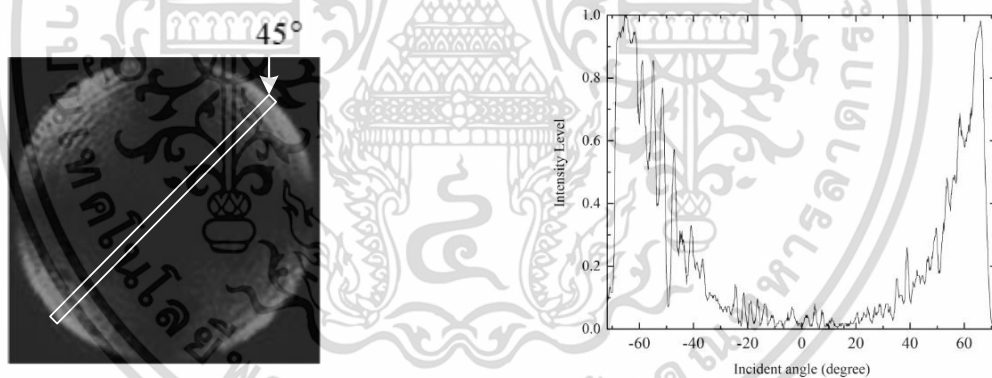
รูปที่ 4- 9 เส้นข้อมูลที่ตัดจากภาพความเข้มแสงที่มุม $\phi = 45^\circ$

จากรูปที่ 4- 9 เป็นการนำภาพความเข้มแสงที่ได้ ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปวงกลม โดยงานวิจัยนี้ทำการนำเส้นข้อมูลของภาพตามแนวเส้นทะแยงมุมที่ 45 องศา ซึ่งถ้าพิจารณามุมมองด้านบน (Top View) ของ ภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์ จะเห็นได้ว่าในทุกพิกเซลของภาพความเข้มแสงจะเกิดจากการแสงที่สะท้อนกลับจากวัสดุทดสอบ และสะท้อนแสงกลับมาที่เลนส์ใกล้วัตถุ ซึ่งด้วยคุณสมบัติของเลนส์ใกล้วัตถุแสงจะถูกแตกออกไปตามมุมตกกระทบต่าง ๆ จึงเกิดภาพระนาบโฟกัสหลังเลนส์ขึ้น



รูปที่ 4- 10 การปรับมุมรีทาร์ดเดอร์โดยใช้ควอเตอร์เวฟเพลตที่มีมุม 1 ถึง 360°

รูปที่ 4- 10 แสดงการปรับแกนแสงโดยใช้ควอเตอร์เวฟเพลต ซึ่งจะทำให้การปรับมุมตั้งแต่ 1 ถึง 360 องศา ซึ่งก็คือ 1 รอบของการหมุน ในการการปรับมุมของควอเตอร์เวฟเพลต เป็นการปรับแกนแสง ที่เรียกว่า Fast Axis ซึ่งเป็นการปรับรีทาร์ดเดอร์ของแสง ระหว่างองค์ประกอบของ p-polarized และ s-polarized ซึ่งจะทำให้องค์ประกอบของแสงที่กล่าวมาเกิดการเลื่อนเฟสทางแสง (Phase Shifting) ซึ่งควอเตอร์เวฟเพลต Q_1 เป็นส่วนประกอบหลักที่จะทำให้เกิดภาพความเข้มแสงแบบสแตก (Stacked Intensity Image)



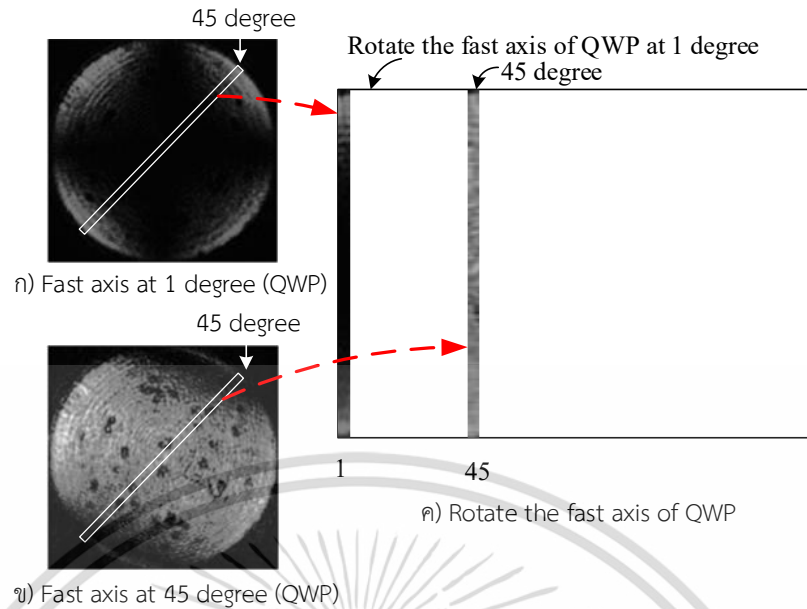
ก) ภาพความเข้มแสงที่เมื่อปรับควอเตอร์เวฟเพลตไปที่มุม 0 องศา

ข) เส้นข้อมูลตามแนวเส้นทะแยงมุมที่ 45 องศา

รูปที่ 4- 11 การพล็อตเส้นข้อมูลที่ได้จากภาพความเข้มแสงที่มีมุม 45 องศา

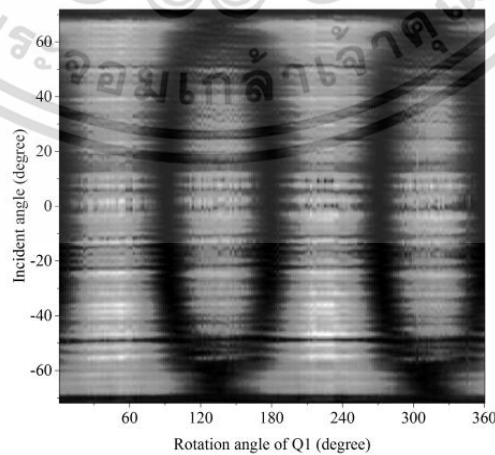
จากรูปที่ 4- 11 เมื่อนำเส้นข้อมูลตามแนวทะแยงมุมที่ 45 องศาที่ได้จากภาพความเข้มแสงมาทำการพล็อต จะได้ผลลัพธ์เป็นเส้นโค้งดังรูปที่ 4- 11(ข) โดยที่แกนของกราฟแสดงมุมตกกระทบของแสงซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง -71.8051 ถึง 71.0871 องศา ซึ่งเป็นมุมที่ได้จากคุณสมบัติรับแสงของเลนส์ใกล้วัตถุที่ใช้ ซึ่งมีค่า $NA=0.95$ ในขณะที่แกนตั้งแสดงค่าความเข้มแสงซึ่งทำการนอร์มัลไลเซชัน (Normalization) ให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งจากภาพแสดงให้เห็นว่ามีลักษณะเป็นเส้นโค้งรูปประฆังหงาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4- 12 ขั้นตอนการสร้างภาพความเข้มแสงแบบสแตก

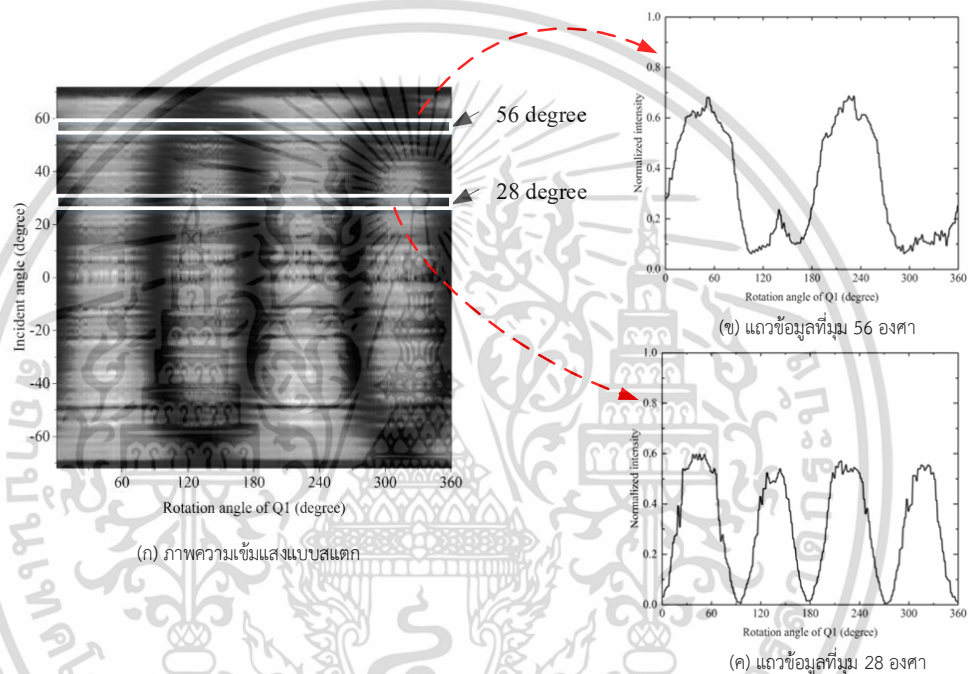
จากรูปที่ 4- 12 แสดงขั้นตอนการสร้างภาพความเข้มแสงแบบสแตก ซึ่งในรูปที่ 4- 12 (ก) แสดงการนำภาพความเข้มแสงที่ได้จากกล้อง CCD2 โดยทำการหมุนควอเตอร์เวฟเฟลตมาที่มุม 1 องศา จากนั้นทำการตัดภาพที่เส้นทะแยงมุม 45 องศา จากภาพความเข้มแสงที่ได้ หลังจากนั้นนำข้อมูลเส้นทะแยงมุมที่ได้มาวางในตำแหน่งคอลัมน์แรก ซึ่งทำอย่างนี้ไปทุกครั้งที่ทำกรปรับมุมของควอเตอร์เวฟเฟลตในตำแหน่งถัดไป เช่น เมื่อปรับมุมของควอเตอร์เวฟเฟลตมาตำแหน่งที่ 45 องศา กล้อง CCD2 จะทำการบันทึกภาพ จากนั้นก็ทำการตัดภาพที่เส้นทะแยงมุม 45 องศา มาวางในคอลัมน์ที่ 45 ซึ่งถ้าทำครบทั้ง 360 คอลัมน์ ซึ่งก็คือการหมุนควอเตอร์เวฟเฟลตจนครบ 360 องศา นั้นเอง ซึ่งจะทำให้เกิดภาพที่เรียกว่า ภาพความเข้มแสงแบบสแตก (Stacked Intensity Image) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4- 13



รูปที่ 4- 13 ภาพความเข้มแสงแบบสแตกของวัสดุ SiO_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

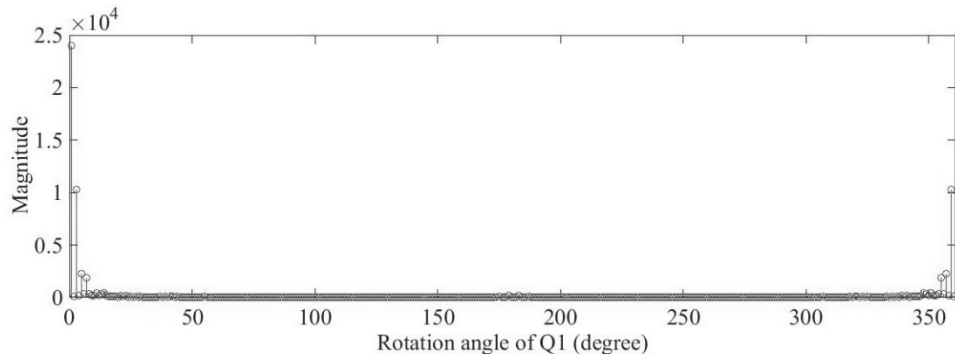
จากรูปที่ 4- 13 แขนงอนแสดงมุมของการหมุนควอเตอร์เวฟเฟลต ทั้งมุมไปตั้งแต่มุม 1 จนถึงมุมที่ 360 องศา ส่วนแกนตั้งแสดงความเข้มของแสงที่มุมตกกระทบตั้งแต่มุม -71.8051 องศา ถึงมุม 71.8051 องศา ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากคุณสมบัติของเลนส์ใกล้วัตถุที่ใช้งาน คือ $NA = 0.95$ เมื่อทำการคำนวณหามุมก็จะได้ค่า 71.8051 องศา นั่นเอง โดยหลังจากที่ได้ภาพซึ่งแสดงในรูปที่ 4- 13 แล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการนำภาพที่ได้ไปแปลงให้อยู่ในโดเมนเชิงความถี่ (Frequency Domain) การแปลงภาพความเข้มแสงให้อยู่ในโดเมนของความถี่เนื่องในภาพมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงแบบซ้ำ ๆ อันเนื่องจากภายในภาพความเข้มแสงแบบสแตก ข้อมูลในแต่ละแถวมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4- 14



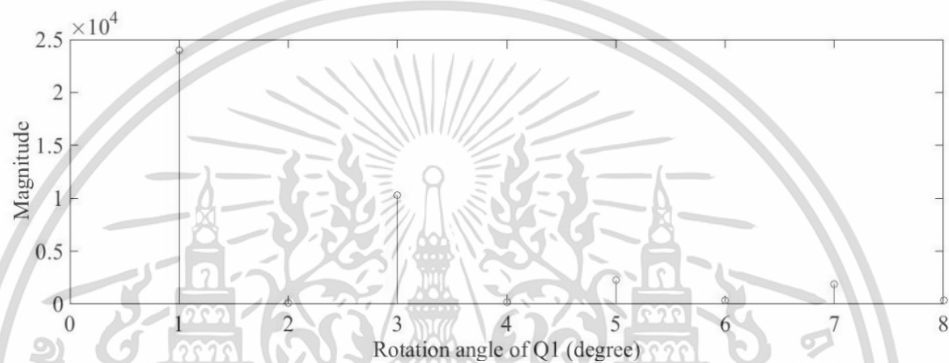
รูปที่ 4- 14 การพล็อตเส้นข้อมูลที่ได้จากภาพความเข้มแสงแบบสแตก

จากรูปที่ 4- 14 แสดงตัวอย่างของผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของข้อมูลในแถวที่ 56 และ 28 องศาจากภาพความเข้มแสงแบบสแตก โดยในขั้นตอนการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform) ผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์สามารถแยกออกมาเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ค่าแอมพลิจูด (Amplitude) และเฟส (Phase) แสดงดังรูปที่ 4- 15 และรูปที่ 4- 16 โดยรูปที่ 4- 15(ก) เป็นค่าแอมพลิจูด (Amplitude) ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์ โดยที่แกนอนแสดงมุมอะซิมุทตั้งแต่ 0 ถึง 359 องศา แกนตั้งเป็นค่าขนาด รูปที่ 4- 15 (ข) แสดงค่าเฟสที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์ ซึ่งเลือกพิจารณาในช่วงต้นตั้งแต่มุม 0 ถึง 8 องศา โดยในรูปที่ 4- 15 (ข) ให้พิจารณาแกนอนตำแหน่งที่ 1 ซึ่งเป็นค่าของสัญญาณดีซีคอมโพเนนซ์ (DC Component) และแกนอนในตำแหน่งที่ 3 เป็นค่าการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเอซีคอมโพเนนซ์ (AC Component) ของแสงที่มุมตกกระทบที่ 56 องศา โดยที่กราฟของเฟสจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลง 2 ครั้ง และรูปที่ 4- 15 (ข) เมื่อพิจารณาที่แกนอนในตำแหน่งที่ 5 ซึ่งก็คือ องค์ประกอบของเอซีคอมโพเนนซ์ อันดับที่ 4 ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับรูปที่ 4- 16 ที่มีมุมตกกระทบที่ 28 องศา มีการเปลี่ยนแปลง 4 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

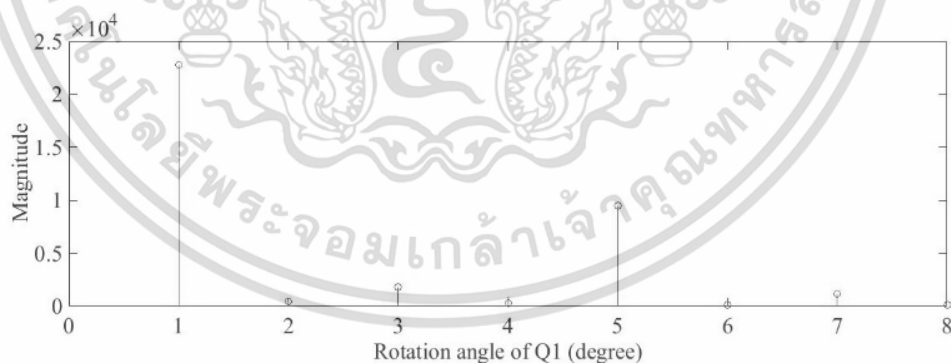


ก) เฟสที่ได้แปลงฟูเรียร์



ข) เฟสในตำแหน่งที่ 0 ถึง 8 ของการแปลงฟูเรียร์

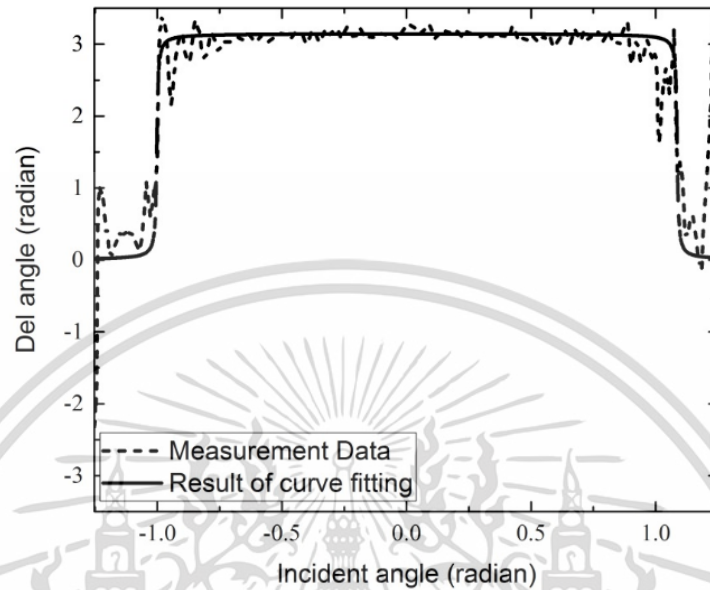
รูปที่ 4- 15 ผลการแปลงฟูเรียร์ที่มุมตกกระทบที่ 56 องศา



รูปที่ 4- 16 เฟสที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์ที่มุมตกกระทบที่ 28 องศา

ผู้วิจัยเลือกพิจารณาองค์ประกอบของสัญญาณเอซิคอมโพเนนซ์ ในลำดับที่ 4 ดังรูปที่ 4- 16 เนื่องจากสมการที่ 3-13 และ 3-14 แสดงให้เห็นว่าแสงสะท้อนมีองค์ประกอบทางความถี่ที่ $2t$ และ $4t$ ซึ่งทำให้ผู้วิจัยเลือกใช้ความถี่ $4t$ เนื่องจากทั้ง 3 วัสดุมีการรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่ $4t$ ดังนั้นเมื่อทำการแปลงฟูเรียร์ เฟสที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์ในลำดับที่ 4 จะแสดงถึงค่าการสะท้อนแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ความถี่ $4t$ ซึ่งเมื่อพิจารณาเฟสในตำแหน่งที่ 4 ขององค์ประกอบสัญญาณเอซิคอมโพเนนซ์นี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพเนนซ์ ซึ่งจะนำค่าแอมพลิจูดในตำแหน่งเดียวกันกับเฟส มาทำการพล็อตเรียงต่อกันตั้งแต่แถวที่ 1 ของภาพความเข้มแสงแบบสแตกจนจบ จะทำให้เกิดเส้นข้อมูลขึ้น ที่เรียกว่า กราฟเดลต้า ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์แล้วนำมาพล็อตเป็นกราฟเดลต้าแสดงดังรูปที่ 4- 17



รูปที่ 4- 17 มุมเดลต้าของวัสดุ SiO_2

4.4 ผลการทดสอบหาค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน

รูปที่ 4- 19 แสดงภาพ SII ของวัสดุ SiO_2 , ทองและ Aluminium Titanium Carbon (ALTiC) โดยรูปแบบความเข้มแสงของวัสดุทั้ง 3 ชนิดมีรูปแบบความเข้มแสงที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการสะท้อนแสงของวัสดุ โดยรูปแบบความเข้มแสงจะอยู่ในรูปแบบของแถบดำและแถบสว่าง ซึ่งใน SiO_2 จะประกอบด้วยรูปแบบแถบดำและแถบสว่าง 4 ไซเคิลโดยสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงในแนวนอน โดยการแยกข้อมูลการเลื่อนเฟสของแต่ละ มุมตกกระทบ ระบบเลือกใช้การประมวลผลโดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT)

เพื่อทำการเลือกเฉพาะการเลื่อนเฟสของฮาร์มอนิ (Harmonic) ลำดับที่สี่ เพื่อทำการสร้างมุมเดลต้าของแต่ละมุมตกกระทบ เพื่อสร้างเดลต้า ค่าเดลต้าแสดงดังรูปที่ 12 โดยที่แกนแนวเป็นมุมตกกระทบ และแกนตั้งเป็นมุมเดลต้า (การเลื่อนเฟสทางแสง) โดยมุมตกกระทบมีค่าระหว่าง π ถึง $-\pi$ ในขณะที่มุมเดลต้าถูกฟิลเตอร์ด้วยตัวกรองแบบแบบไซน์ และโคไซน์ (Sine and Cosine Filter)

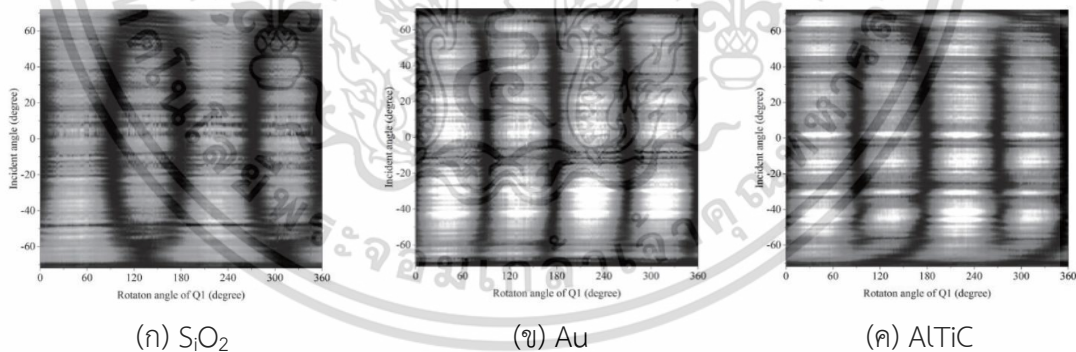
```

k=0;           % initialize k to 0
i=1;           % initialize the counter to 1
alpha=pi;     % set alpha to the desired Tolerance. In this case, pi
for i = 1:(size(u)-1)
    yout(i,:)=u(i)+(2*pi*k);           % add 2*pi*k to ui
    if((abs(u(i+1)-u(i)))>(abs(alpha))) %if diff is greater than alpha,
        %increment or decrement k
        if u(i+1)<u(i) % if the phase jump is negative, increment k
            k=k+1;
        else % if the phase jump is positive, decrement k
            k=k-1;
        end
    end
end
yout((i+1,:)=u(i+1)+(2*pi*k);           % add 2*pi*k to the last element of the input

```

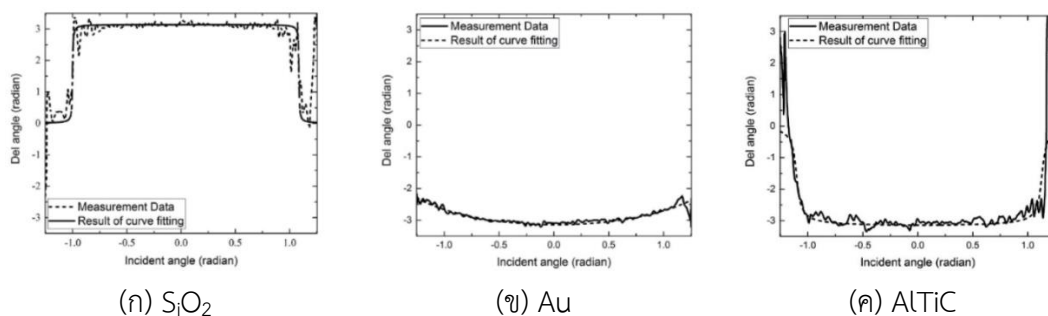
รูปที่ 4- 18 อัลกอริทึมของตัวกรองแบบแบบชายน์ และโคชายน์ [http://www.mathworks.com]

ซึ่งโดยปกติแล้วตัวกรองแบบแบบชายน์ และโคชายน์ใช้สำหรับกำจัดสัญญาณรบกวนของการเลื่อนเฟสทางแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงชั่วคราว ในขั้นตอนสุดท้ายค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน (Complex Refractive Index : n, k) สามารถหาได้จากกระบวนการปรับเส้นโค้ง (Nonlinear Curve Fitting) แบบไม่เป็นเชิงเส้น แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method : LSM)



รูปที่ 4- 19 ภาพความเข้มแสงแบบสแตก (Stacked Intensity Image)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4- 20 มุมเดลต้า

โดยตารางที่ 4- 1 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงของค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนซึ่งประกอบด้วยค่าดัชนีการหักเหแสง (Refractive Index : n) และค่าสัมประสิทธิ์การสูญหาย (Extinction Coefficient : k) ซึ่งค่าที่นำมาใช้ในการอ้างอิงนำมาจากเว็บไซต์ (<http://www.filmetrics.com>) ของวัสดุ 2 ชนิด ส่วนวัสดุ AlTiC ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในการผลิตหัวอ่านฮาร์ดดิสก์เป็นค่าที่ได้จากการวัดจากเครื่องอิลิปโซมิเตอร์ซึ่งติดตั้งอยู่ที่โรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งในกระบวนการสอบความสูงการบินของหัวอ่านเดิม จะใช้เครื่องอิลิปโซมิเตอร์ทำการอ่านค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนซึ่งวัดเพื่อเป็นค่าซึ่งเป็นตัวแทนของกลุ่มตัวอย่างในการทดสอบ โดยการวัดค่าโดยใช้อิลิปโซมิเตอร์แบบนี้จะทำให้โครงสร้างของ HGA ที่ติดตั้งหัวอ่าน เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (ดัดงอ) เพื่อให้สามารถนำเข้าไปวัดในเครื่องอิลิปโซมิเตอร์ได้ ซึ่งส่งผลให้วัสดุทดสอบถูกทำลาย ส่งผลให้ไม่สามารถวัดค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนได้จากหัวอ่านทุกตัวที่ต้องทำการวัดค่าความสูงการบินของหัวอ่านโดยใช้ค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนได้

ตารางที่ 4- 1 ค่า n, k ที่อ้างอิงเทียบกับค่าที่วัดได้

วัสดุทดสอบ		Refractive Index(n)	Extinction Coefficient(k)
SiO ₂	Practical Standard	1.460	0.000
	Measurement Value	1.519	-0.010
Au	Practical Standard	0.181	3.068
	Measurement Value	0.136	4.133
AlTiC	Practical Standard	2.236	0.426
	Measurement Value	2.295	0.200

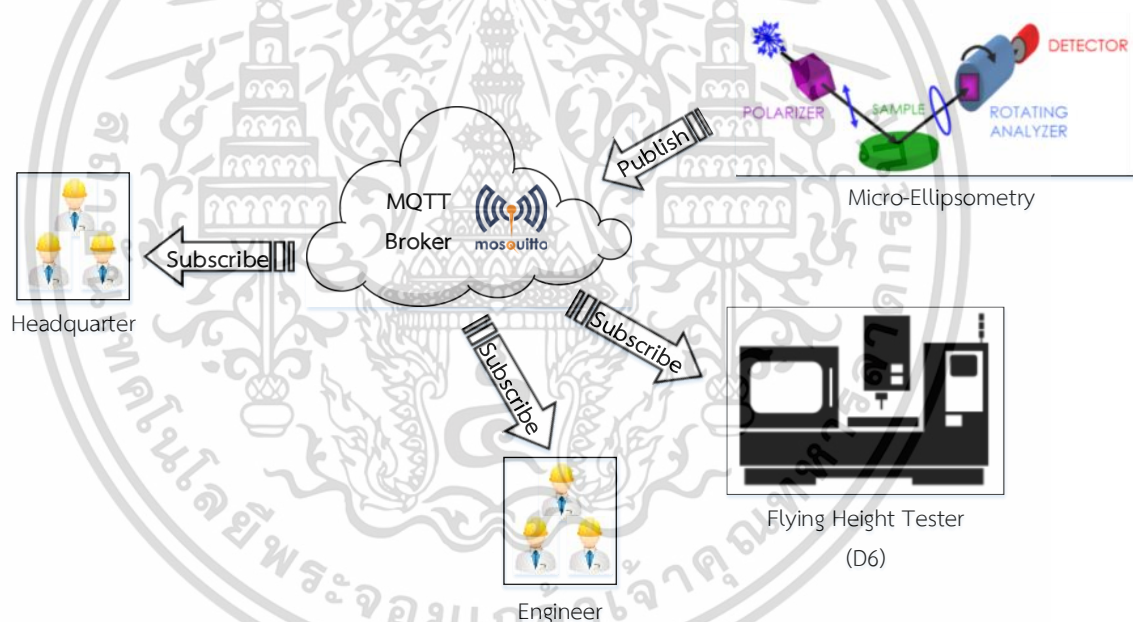
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การรับส่งค่าคุณสมบัติทางแสงแผ่นโปรโตคอลเอ็มคิวทีที

5.1 การรับส่งค่า n,k จากเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์ผ่านโปรโตคอลเอ็มคิวทีที

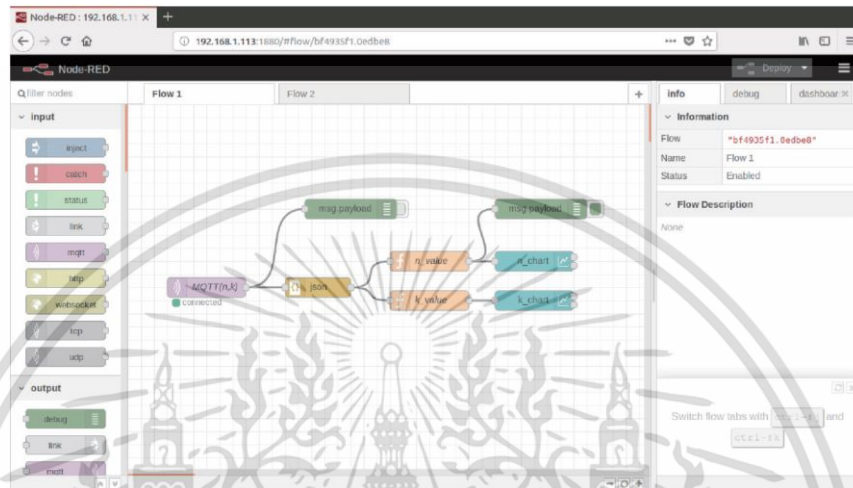
งานวิจัยนี้เลือกใช้โปรโตคอลเอ็มคิวทีที (MQTT) ในการรับส่งข้อมูลของการวัดค่า n, k เพื่อส่งข้อมูลเข้าไปในระบบเครือข่าย โดยข้อมูลที่วัดได้จะถูกส่งไปยังสมาชิก (Subscribers) ซึ่งลงทะเบียนในระบบ MQTT ซึ่งในที่นี้ก็คือ วิศวกรทดสอบความสูงการบินของหัวอ่าน ผู้จัดการ และผู้ออกแบบพื้นผิวของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่อยู่สำนักงานใหญ่ ซึ่งวิศวกรจะนำค่าที่ได้ไปใช้ในการตั้งค่า n, k ให้กับเครื่องวัดความสูงการบินของหัวอ่าน ซึ่งวิศวกรจะนำค่าความสูงการบินของหัวอ่านที่ได้ไปวิเคราะห์หาคุณภาพของการผลิตฮาร์ดดิสก์ต่อไป และในขณะเดียวกันสำนักงานใหญ่ก็นำข้อมูลที่ได้ไปใช้ทำรายงานคุณภาพของฮาร์ดดิสก์ หรือปรับเปลี่ยนการออกแบบพื้นผิว Air Bearing Surface ของสไลเดอร์ต่อไป



รูปที่ 5- 1 โครงสร้างการเชื่อมต่อคลาวด์ภายในหน่วยงานกับระบบการวัดค่าทางแสง

จากรูปที่ 5- 1 แสดงไดอะแกรมการเชื่อมต่อคลาวด์ส่วนบุคคล (Private Cloud) กับระบบการวัดที่ทำการสร้างขึ้น โดยเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์ทำหน้าที่ส่งข้อมูลค่าดัชนีการหักเหที่ซับซ้อน (n&k) ให้กับผู้ที่เกี่ยวข้องซึ่งจะต้องทำการลงทะเบียน (Subscriber) ที่เป็นหัวเรื่อง (Topic) เดียวกับที่เครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์กำหนดไว้ โดยผู้ที่ต้องการใช้ข้อมูล n&k มีอยู่ 3 ส่วน คือ สำนักงานใหญ่ซึ่งอยู่ต่างประเทศ ต้องการนำข้อมูล n&k ไปวิเคราะห์ทางด้านคุณสมบัติการสะท้อนของแสงของพื้นผิว Air Bearing Surface บนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

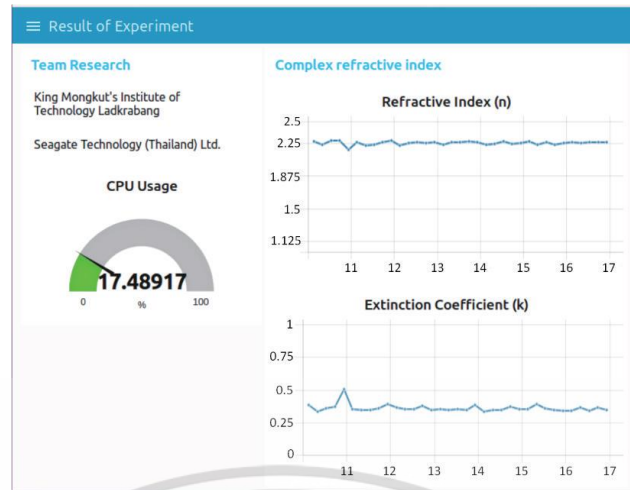
หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ อีกส่วนหนึ่งก็คือ วิศวกร ซึ่งต้องนำค่า n , k มาวิเคราะห์หาคุณภาพของการผลิตฮาร์ดดิสก์ในรอบการผลิตที่ส่งมาตรวจสอบ ซึ่งข้อมูลนี้จะใช้ประกอบการคำนวณหาค่าความสูงการบินของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ของเครื่อง KLA Tencor D6 และผู้เกี่ยวข้องคนสุดท้ายคือ เครื่อง KLA Tencor D6 ซึ่งจะนำค่า n , k ที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาค่าความสูงการบินของหัวอ่านต่อไป



รูปที่ 5- 2 ไดอะแกรม Node-Red ที่ใช้ในระบบ

ในการออกแบบการส่งข้อมูลโดยใช้โปรโตคอลเอ็มคิวทีที ผู้วิจัยเลือกใช้การพัฒนาบนโปรแกรมโหนดเรด (Node-RED) ซึ่งเป็นโปรแกรมซึ่งออกแบบโปรแกรมโดยใช้การเขียนโปรแกรมแบบบล็อก (Block Programming) ซึ่งสามารถเขียนได้พัฒนาได้ง่ายกว่าการเขียนโปรแกรมในอดีต ซึ่งโปรแกรม Node-RED ถูกติดตั้งบนระบบปฏิบัติการลินุกซ์ ซึ่งในการทำงานของไดอะแกรมที่ออกแบบไว้ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5- 2 โปรแกรมจะเริ่มต้นจากการรับข้อมูลค่า n , k ซึ่งได้จากเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์จากโปรโตคอลเอ็มคิวทีที โดยข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปของ JSON (JavaScript Object Notation) ดังนั้นเมื่อรับข้อมูลมาแล้วต้องทำการแปลงข้อมูลจากรูปแบบ JSON ออกเป็นค่า n และค่า k ซึ่งหลังจากที่ได้ข้อมูลแล้ว ก็จะนำข้อมูลที่ได้ออกไปพล็อตเป็นกราฟเส้น เพื่อรายงานให้กับวิศวกรและเจ้าหน้าที่ที่ดูแลเครื่อง KLA Tencor D6 ให้ทราบว่าหัวอ่านแต่ละตัวมีค่า $n&k$ ของหัวอ่านแต่ละตัวมีค่าเท่าใด เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในกระบวนการตรวจสอบคุณภาพของการผลิตฮาร์ดดิสก์ในรอบการผลิตนั้น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-3 หน้าจอแสดงผลที่ได้จากการวัด n , k

ลำดับของการรับส่งข้อมูลของค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนเป็นเรื่องสำคัญที่ผู้ใช้งานต้องการทราบเพื่อติดตามข้อมูลการวัดของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ทุกตัว ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องพิจารณาระดับคุณภาพการให้บริการ (Quality of Service : QoS) เพื่อให้สามารถรับส่งข้อมูลได้ในระยะเวลาที่รวดเร็ว โดยความล่าช้า (Latency) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการสื่อสารข้อมูลโดยใช้โปรโตคอลเอ็มคิวทีที ซึ่งโปรโตคอลเอ็มคิวทีทีที่ผู้รับและผู้ส่งข้อมูลต้องทำการตกลงกันก่อนการรับส่งข้อมูลเพื่อรับประกันว่าข้อมูลจะต้องถูกส่งได้ ซึ่งระดับคุณภาพการให้บริการ (QoS) ในโปรโตคอลเอ็มคิวทีทีถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ดังนี้

- QoS ระดับที่ 0 (At Most Once) เป็นการส่งข้อมูลจากผู้ส่งเพียงหนึ่งครั้ง และไม่รอต่อกลับ ดังนั้นหากเกิดการสูญหายของข้อมูล โปรโตคอลจะไม่ทำการส่งข้อมูลซ้ำอีกครั้ง
- QoS ระดับที่ 1 (At Least Once) เป็นการส่งข้อมูลจากผู้ส่งเพียงหนึ่งครั้ง โดยจะรอการตอบกลับจากโบรกเกอร์ โดยถ้าโบรกเกอร์แจ้งว่าเกิดการสูญหาย ระบบจะทำการส่งข้อมูลใหม่ ดังนั้นเป็นการรับประกันว่าส่งข้อมูลถึงผู้รับ
- QoS ระดับที่ 2 (Exactly Once) เป็นการส่งข้อมูลจากผู้ส่งเพียงหนึ่งครั้ง โดยใช้หลักการของ 4-Way Handshake

ในการทดลองทำการทดสอบการสื่อสารข้อมูลบนโปรโตคอลเอ็มคิวทีทีเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของระดับคุณภาพการให้บริการ (QoS) โดยการประเมินจาก Round-trip Time และ Throughput ของระดับคุณภาพการให้บริการทั้ง 3 ระดับ โดยเครื่องมือข่ายที่ทำหน้าที่เป็นโบรกเกอร์เลือกใช้ Mosquitto MQTT โดยโบรกเกอร์ถูกตั้งค่าให้เป็นคลาวด์ส่วนบุคคล โดยที่เครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์ได้เขียนโปรแกรมภาษาซีชาร์ปเพื่อทำการส่งข้อมูลผ่านโปรโตคอลเอ็มคิวทีที ส่วนฝั่งผู้รับได้ทำการออกแบบโปรแกรมโดยใช้ Node-Red ซึ่งรูปแบบของข้อมูลที่ถูกส่งซึ่งก็คือค่า n , k อยู่บนรูปแบบของ JSON (JavaScript Object Notation) ซึ่งค่า n , k ที่อยู่ในรูปแบบ JSON จะถูกส่งไปบนคลาวด์ส่วนบุคคลผ่านโปรโตคอล MQTT โดยที่โปรแกรม Node-Red ที่ออกแบบไว้จะทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

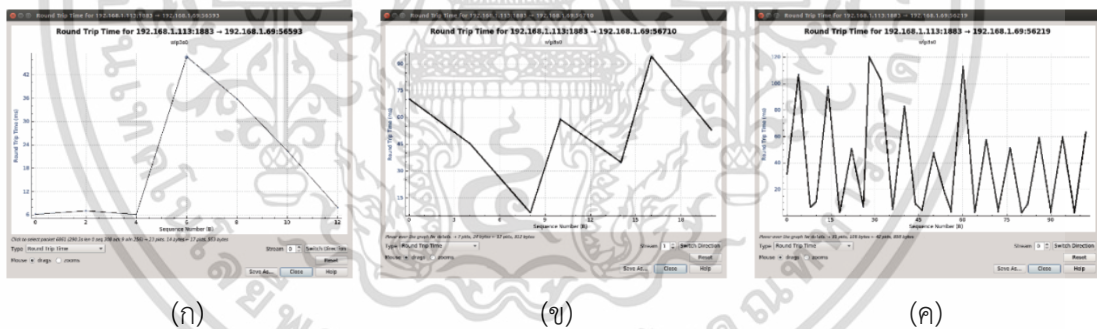
หน้าที่แยกข้อมูลกลับมาเป็นค่า n , k ซึ่งไดอะแกรมของ Node-Red แสดงดังรูปที่ 5- 2 ซึ่งจะนำค่า n , k ที่ได้ไปพล็อตเป็นกราฟ ซึ่งผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบข้อมูลได้ผ่านบริการเว็บ (Web Service)

5.2 ผลการทดลองการรับส่งข้อมูลผ่านโปรโตคอลเอ็มคิวทีที

ค่ารับส่งข้อมูล n , k ที่วัดได้จากเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์ จะถูกส่งไปบนเครือข่ายคลาวด์ส่วนบุคคลผ่านโปรโตคอลเอ็มคิวทีที ซึ่งรูปที่ 5- 3 แสดงหน้าจอการแสดงผลของค่า n , k ให้กับผู้ใช้งานผ่านอินเทอร์เน็ตเฟสเว็บ โดยในการสื่อสารข้อมูลเลือกใช้การสื่อสารแบบสายโดยใช้มาตรฐาน IEEE 802.3 แทนการใช้สื่อสารแบบไร้สาย IEEE 802.11 เนื่องจากว่าประสิทธิภาพของเครือข่ายแบบไร้สายจะลดลงเมื่อมีผู้ใช้งานจำนวนมาก หรือเกิดการรบกวนขึ้นอันเนื่องมาจากความถี่และช่องสัญญาณที่ซ้อนทับกันบนการสื่อสารแบบไร้สาย ซึ่งเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้นทำการวัดค่า n , k ทุก ๆ 1 นาที ดังนั้นการรับส่งบนโปรโตคอลเอ็มคิวทีทีที่ระบบสามารถรับส่งข้อมูลโดยใช้เวลาน้อยกว่า 1 นาที ซึ่งแสดงผลการทดสอบดัง

รูปที่ 5- 4 การกำหนดค่าระดับคุณภาพการให้บริการ (QoS) ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพโดยวิเคราะห์จาก Round-trip Time อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการสื่อสารบนโปรโตคอลเอ็มคิวทีทีใช้เวลาที่น้อยกว่ารอบการทำงานของเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์ ดังนั้นจึงมั่นใจได้ว่าข้อมูลที่วัดได้จะถูกส่งผ่านระบบเครือข่ายได้อย่างถูกต้อง ซึ่ง

รูปที่ 5- 5 แสดงปริมาณข้อมูล (Throughputs) ที่ใช้ผ่านโปรโตคอลเอ็มคิวทีทีที่มีความแตกต่างกันเมื่อมีการกำหนดระดับคุณภาพการให้บริการที่แตกต่างกัน



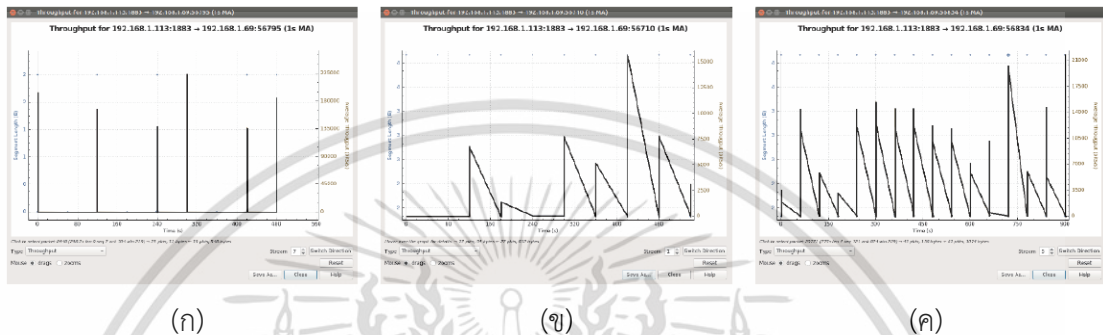
รูปที่ 5- 4 ค่า Round-trip Time ที่ได้จากการโปรโตคอลเอ็มคิวทีที

ตารางที่ 5- 1 ค่าเฉลี่ยของ Round-trip Time

	QoS=0 (At most once)	QoS=1 (At least once)	QoS=2 (Exactly once)
Round-trip time average	18.714ms	51.429ms	39.107ms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 5- 1 จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของ Round-trip time ของ QoS=0 ใช้เวลาในการส่งน้อยที่สุดเนื่องจากจากการมีการส่งข้อมูลเพียงครั้งเดียวตามรูปแบบการส่งข้อมูลบนโปรโตคอลเอ็มคิวทีที ในขณะที่ QoS=2 ใช้เวลาในการส่งนานที่สุด ซึ่งเกิดจากต้องทำการส่งแบบ 4-way handshake ซึ่งจะมีการรับส่งข้อมูล 4 ส่วนด้วยกัน แต่ในการส่งโดยใช้ QoS=2 นี้ ผู้ส่งจะมั่นใจได้ว่าข้อมูลที่ได้จะถูกส่งถึงผู้รับอย่างแน่นอน ซึ่งทั้ง 3 รูปแบบใช้เวลาในการส่งข้อมูลไม่ถึง 1 วินาทีเท่านั้น ซึ่งน้อยกว่าการหาค่า n, k ของเครื่องไมโครโพลิไซมิเตอร์ซึ่งใช้เวลาในการวัดถึง 1 นาที



รูปที่ 5- 5 ค่า Throughput ที่ได้จากการโปรโตคอลเอ็มคิวทีที

ตารางที่ 5- 2 ค่า Throughput สูงสุดที่ได้จากการโปรโตคอลเอ็มคิวทีที

	QoS=0 (At most once)	QoS=1 (At least once)	QoS=2 (Exactly once)
Maximum throughput	225,000bps	15,500bps	21,700bps

จากตารางที่ 5- 2 จะเห็นได้ว่า QoS=1 มีอัตราในการรับส่งข้อมูลที่ช้าที่สุด ในขณะที่ QoS=0 มีอัตราในการรับส่งข้อมูลที่เร็วที่สุด สาเหตุที่ QoS=0 มีอัตราการรับส่งที่เร็วที่สุด อันเนื่องมาจากการส่งข้อมูลแบบ QoS=0 มีการส่งข้อมูลซึ่งใช้เพียงแพ็กเก็ตเดียวในการส่ง ส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการส่งน้อย ซึ่งทำให้ความเร็วในการส่งมาก ทำให้ได้ค่า Throughput มีค่าสูงตามไปด้วย แต่ในขณะที่ QoS=2 มีความเร็วในการส่งที่มากกว่า QoS=1 ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการส่งข้อมูลเกิดมีข้อมูลอื่น ๆ ในระบบเครือข่ายมีการใช้งานโปรโตคอลอื่น ๆ อยู่ ส่งผลให้แบนด์วิดท์ในการสื่อสารลดลง ในช่วงเวลาที่ทดสอบโดยใช้ QoS=1 ทำให้ค่า Throughput มีค่าน้อยกว่า QoS=2 นั่นเอง

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการใหม่ในการหาค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน โดยใช้อินเตอร์เฟอโรเมตริกแบ็คโพคัลเพลนไมโครอิลิปโซมิเตอร์ สำหรับการหาค่าคุณสมบัติทางแสงของพื้นผิวแอร์แบริงบนสไลเดอร์ โดยเมื่อได้ค่าคุณสมบัติทางแสงแล้วจะส่งข้อมูลให้กับเครื่อง KLA Tencor D6 ซึ่งเป็นเครื่องวัดที่ใช้หาค่าความสูงการบินของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ โดยเครื่อง KLA Tencor D6 ปกติแล้วจะหาค่าความสูงการบินของหัวอ่าน โดยใช้ค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนของวัสดุ ซึ่งได้จากการวัดค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน โดยใช้เครื่องอิลิปโซมิเตอร์ โดยทำการสุ่มวัดจากกลุ่มตัวอย่างของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์จำนวนหนึ่ง จากนั้นจะนำค่าตัวแทนที่ได้ตั้งค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนให้กับเครื่อง KLA Tencor D6 เพื่อคำนวณหาค่าความสูงการบินของหัวอ่านต่อไป ซึ่งจะเห็นได้ว่าการวัดหาค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนของหัวอ่านไม่ได้เป็นการวัดกับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ทุก ๆ ตัว ซึ่งในความเป็นจริงแล้วหัวอ่านฮาร์ดดิสก์แต่ละตัวจะมีค่าคุณสมบัติทางแสงที่แตกต่างกันออกไปเนื่องจากในกระบวนการผลิตสไลเดอร์ซึ่งอยู่บนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์จะต้องทำความสะอาดพื้นผิว และกัดเซาะพื้นผิวแบบ Air bearing Surface เพื่อให้หัวอ่านยกตัวลอยขึ้นด้วยระยะห่างจากจานบันทึกข้อมูลตามที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวทำให้คุณสมบัติทางแสงของวัสดุของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการวัดค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนใหม่ขึ้น โดยจะทำการวัดกับหัวอ่านทุกตัวที่ทำการทดสอบ และส่งข้อมูลค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนให้กับเครื่อง KLA Tencor D6 ต่อไป

โดยในขั้นตอนของการสร้างแบบจำลองภาพความเข้มแสง ได้นำค่าดัชนีการหักเหแสงของวัสดุชนิดต่าง ๆ ตามค่ามาตรฐานมาใช้ โดยเลือกเลือกที่มีค่าความยาวคลื่นที่ 632.3 นาโนเมตร จากนั้นแทนค่ากับสมการการสะท้อนแสงของเฟรสเนล (Fresnel Equation) เพื่อสร้างภาพความเข้มแสงของวัสดุออกมา

หลังจากที่ได้ภาพความเข้มแสงจากแบบจำลองแล้ว ก็นำภาพที่ได้มาเป็นตัวเปรียบเทียบกับภาพที่ได้จากเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์ เพื่อให้ผู้วิจัยมั่นใจว่าภาพความเข้มแสงที่ได้มาในทิศทางที่ต้องการ หลังจากนั้นก็นำภาพที่ได้จากกล้อง CCD2 มาเข้าสู่การคำนวณเพื่อหาค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อน โดยผ่านกระบวนการแปลงฟูเรียร์เพื่อแยกเอาข้อมูลในความถี่ที่ต้องการออกมา ซึ่งก็คือมอดูล่า ซึ่งนำมาใช้ในการหาค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนด้วยกระบวนการปรับเส้นโค้งอีกครั้งหนึ่ง โดยค่าดัชนีการหักเหแสงที่ซับซ้อนจะถูกส่งผ่านโปรโตคอลเอ็มคิวทีที ซึ่งมีเพย์โหลดที่น้อยกว่าโปรโตคอลอื่น ๆ ทำให้สามารถส่งข้อมูลให้กับผู้ที่เกี่ยวข้องกับระบบได้รวดเร็ว ซึ่งผู้วิจัยทำการวัดประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลโดยใช้ค่า Round-trip Time ที่วัดจากการรับส่งข้อมูลผ่านโปรโตคอลเอ็มคิวทีทีซึ่งใช้เวลาที่ในการรับส่งข้อมูลที่น้อยกว่ารอบการทำงานของการเครื่องไมโครอิลิปโซมิเตอร์ ดังนั้นจากผลการทดลองทำให้มั่นใจได้ว่าสามารถวัดและส่งข้อมูลผ่านระบบเครือข่ายได้ทันและถูกต้องตามลำดับการส่งข้อมูล

6.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

ในขั้นตอนการพัฒนาต้นแบบในงานวิจัยนี้มีการใช้งานฮาร์ดแวร์หลายชนิด เช่น ตัวควบคุมมอเตอร์สำหรับอุปกรณ์ทางแสง การออกแบบต้นแบบเพื่อให้ใช้พื้นที่เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้งาน อีกทั้งยังต้องทำการเขียนโปรแกรมช่วงแรกโดยใช้โปรแกรม Matlab เพื่อทดสอบแนวคิดและผลการทดลอง หลังจากนั้นทำการปรับเปลี่ยนไปใช้โปรแกรมภาษาซีชาร์ป เพื่อให้สามารถควบคุมอุปกรณ์ทางแสงและชุดป้อนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ซึ่งต้องควบคุมอุปกรณ์และมอเตอร์หลายตัว ทำให้ใช้เวลาในการพัฒนานาน ซึ่งแก้ปัญหาได้โดยให้มีทีมวิจัยที่มีความรู้ที่หลากหลาย ซึ่งจะทำให้สามารถช่วยกันพัฒนางานวิจัย ซึ่งจำเป็นต้องใช้ความรู้หลายศาสตร์

ปัญหาเรื่องความสั่นสะเทือนของภาพความเข้มแสง ขณะที่กำลังบันทึกภาพโดยกล้อง CCD2 ซึ่งเกิดจากแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เช่น พื้นที่มีแรงสั่นสะเทือนจากสิ่งรอบข้าง หรือแม้กระทั่งอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่มีพัดลมระบายความร้อน เนื่องจากที่ใช้เป็นภาพที่มีขนาดเล็กมาก อันเนื่องจากสไลเดอร์ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์มีขนาดเล็ก ส่งผลให้การสั่นสะเทือนเพียงเล็กน้อยมีผลทำให้ภาพที่ได้เกิดการสั่น ซึ่งการแก้ปัญหาโดยการใส่ชุดป้องกันการสั่นสะเทือน (Passive Isolation) ซึ่งจะทำให้การแยกอุปกรณ์ทางแสงออกจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น

6.3 ข้อเสนอแนะในการทำงานวิจัย

งานวิจัยนี้ควรส่งเสริมให้มีการนำไปพัฒนาเป็นเครื่องต้นแบบ โดยใช้องค์ความรู้ของอุตสาหกรรมในการจัดทำตัวเครื่องเนื่องจากต้องใช้งบประมาณมากและอุปกรณ์ทางแสงที่เพียงพอ ซึ่งทำให้สามารถปรับปรุงให้สามารถใช้งานได้จริงในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการรบกวนเครื่องจักรรอบข้าง อีกทั้งต้องมีระยะเวลาในการปรับปรุงและพัฒนาตัวเครื่องให้ดีขึ้น เนื่องจากในการพัฒนาในห้องปฏิบัติการยังขาดทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยที่เพียงพอ

นอกจากนี้ในการสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการสร้างภาพความเข้มแสง ควรทำการเปรียบเทียบกับวัสดุมาตรฐานหลากหลายชนิด เพื่อให้ความถูกต้องของภาพความเข้มแสงตรงกับภาพวัสดุทดสอบจริงมากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] บ. อัครพิภพ, คู่มือสื่อการสอนวิชาฟิสิกส์ เรื่อง โพลาริเซชันของแสง: สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน และ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] D. H. Goldstein, *Polarized Light*: CRC Press, 2017.
- [3] P. Török, P. D. Higdon, and T. Wilson, "On the general properties of polarised light conventional and confocal microscopes," *Optics Communications*, vol. 148, pp. 300-315, 1998/03/15/ 1998.
- [4] H.-K. Teng and K.-C. Lang, "Polarization shifting interferometric profilometer," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 46, pp. 203-210, 2008/03/01/ 2008.
- [5] C. W. See, M. G. Somekh, and R. D. Holmes, "Scanning optical microellipsometer for pure surface profiling," *Applied Optics*, vol. 35, pp. 6663-6668, 1996/12/01 1996.
- [6] G. D. Feke, D. P. Snow, R. D. Grober, P. J. de Groot, and L. Deck, "Interferometric back focal plane microellipsometry," *Applied Optics*, vol. 37, pp. 1796-1802, 1998/04/01 1998.
- [7] P. Gao, B. Yao, J. Min, R. Guo, J. Zheng, and T. Ye, "Parallel two-step phase-shifting microscopic interferometry based on a cube beamsplitter," *Optics Communications*, vol. 284, pp. 4136-4140, 2011/08/15/ 2011.
- [8] Y. Zhimin, L. Bo, N. Ka Wei, X. Rui, W. Lei, Z. Wei, *et al.*, "Tribological testing technology for sub-10 nm flying height recording system," in *Digest of the Asia-Pacific Magnetic Recording Conference*, 2002, pp. WE-WE.
- [9] L. Xinqun, W. Clegg, and L. Bo, "Normal incidence polarization interferometer for measuring flying height of magnetic heads," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 35, pp. 2457-2459, 1999.
- [10] Z. Yuan, C. L. Ong, S. H. Leong, B. Liu, J. Liu, and S. Yoshida, "Slider Optical Constant Distribution, $\$n\$$ and $\$k\$$ Correlation, and FH Measurement Accuracy," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, pp. 3687-3690, 2008.
- [11] N. Song, Y. Meng, and J. Lin, "Flying-Height Measurement With a Symmetrical Common-Path Heterodyne Interferometry Method," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, pp. 928-932, 2010.
- [12] H. C. Hwang, J. Park, and J. G. Shon, "Design and Implementation of a Reliable Message Transmission System Based on MQTT Protocol in IoT," *Wireless Personal Communications*, vol. 91, pp. 1765-1777, 2016/12/01 2016.
- [13] N. Tantitharanukul, K. Osathanukul, K. Hantrakul, P. Pramokchon, and P. Khoenkaw, "MQTT-Topics Management System for sharing of Open Data," in *2017 International Conference on Digital Arts, Media and Technology (ICDAMT)*, 2017, pp. 62-65.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] N. Aroon, "Study of using MQTT cloud platform for remotely control robot and GPS tracking," in *2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2016, pp. 1-6.
- [15] R. A. Atmoko and D. Yang, "Online Monitoring & Controlling Industrial Arm Robot Using MQTT Protocol," in *2018 IEEE International Conference on Robotics, Biomimetics, and Intelligent Computational Systems (Robionetics)*, 2018, pp. 12-16.
- [16] Y. Ding, B. Fan, X. Kong, and Q. Ma, "Design and implementation of mobile health monitoring system based on MQTT protocol," in *2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*, 2016, pp. 1679-1682.
- [17] H. Fujiwara, *Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications*: Wiley, 2007.
- [18] R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, *Ellipsometry and polarized light*: North-Holland Pub. Co., 1977.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. W. Khunrattanasiri, S. Boonsang, “An interferometric back focal plane microellipsometry for the determination of optical properties of a slider's air bearing surface,” Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA 2014), Siem Reap, Cambodia, 9-12 Dec. 2014, pp. 1-4.
2. W. Khunrattanasiri, S. Boonsang, “Cloud-based Optical Characterization of Hard Disk Drive Recording Heads,” Sensors and Materials, Vol. 30, Issue. 10, pp. 2235-2246.
3. W. Khunrattanasiri, S. Boonsang, “Reflection image model for Micro-Ellipsometer,” The 16th International Conference on Electrical Engineering / Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2019), Pattaya, Thailand, 10-13 Jun. 2019, pp. 135-138.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

An interferometric back focal plane microellipsometry for the determination of optical properties of a slider's air bearing surface

Weerayuth Khunrattanasiri* and Siridech Boonsang*,†

* Department of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.

† College of Data Storage Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.

*E-mail: weerayuth.k@rmutp.ac.th

†E-mail: kksiride@kmitl.ac.th

Abstract— This paper presents a back focal plane microellipsometer combined with a polarized shifting interferometer. This system is used for the determination of optical phase shift on reflection of a slider's air bearing surface. These optical properties are essential parameters for the flying height measurements in a HDD manufacturing process. The resulting phase shifting images were processed by using Windowed Fourier filters and phase unwrapping techniques, in order to precisely determine the phase of a back focal plane image. The phase images were then used to determine the optical phase shift on reflection values. The results from an aluminum sample show that the measured optical phase shift on reflection values are comparable to the standard values.

I. INTRODUCTION

With the increasing recording density of the hard disk drives (HDD), the decrease in magnetic recording bit size and the increase in recording track density requires that the slider and read/write heads fly at almost contact condition with the media surface. The flying height between the heads and media is currently in the order of sub-10 nm. Although, in current HDD technology, there is the feedback control system to ensure the optimal flying height of slider, the requirement of the absolute measurement of flying height distance is still essential for the validation of the air bearing surface (ABS) design. Up till now, various optical interferometric techniques have been developed to accurately measure slider flying height. These include a white light interferometry using color distribution [1], a homodyne interferometry using interference light intensity [2], and a polarization interferometry using rotation of light vibration plane [3]. Measurement systems utilized these methodologies are in commercial use.

According to the current technology of flying height measurement, the attainable precision is about 0.4 nm [4]. The demand for a FH tester with better precision is becoming critical in order to support the slider air bearing design. One of the major challenges for the optical flying height measurement techniques is the difficulty to simultaneously distinguish phase shifts those are due to slider-to-media spacing and the local variations in the refractive index. The routine procedure is to subtract the measured phase shifts with the calibrated value. Such calibrated value is obtained from

the measurement of phase shift on reflection by using an off-line ellipsometer. Resulted values from an ellipsometer are in the complex form ($n&k$ values). However, this compensation method creates another problem associated with the measured position on the slider where the optical constants were measured. Such position may not match with the measured spot of the flying height measurement. Since local $n&k$ values cannot be determined at the exact flying height measurement spot, an average $n&k$ value is usually applied for phase shift on reflection calculation. This problem leads to inaccuracies in the calibrated values due to differences in reflectivities [4] caused by local n , k variation at test spot. Leong et al. proposed the technique based on an empirical linear relationship between calculated reflectivity and ellipsometric-measured n and k properties. They demonstrated that the improvement in precision of flying height values could be obtained. In this paper, we propose the different approach based on a back focal plane microellipsometer combined with a polarization shifting interferometer. This system is used for the determination of phase shift on reflection of a slider's air bearing surface at relatively small spot size comparable with the flying height measurement spot size. Therefore, the local phase shift on reflection measurements with the position closed to the flying height measurement spot can be possible.

II. PRINCIPLE OF BACK FOCAL PLANE MICROELLIPSOMETRY

In conventional ellipsometers, the optical constant ($n&k$) can be measured by using the ratio of the Fresnel reflection coefficients for a beam reflected at a single oblique angle. However, such ellipsometers has major challenge in their lateral resolution which is approximately $20 \mu m$. By using back focal plane microellipsometry, diffraction-limited resolution may be achieved. The principle of microellipsometry is the measurement of the amplitude and phase distributions of the reflected light in the back focal plane of an objective lens. For the analysis of a back focal plane interferometry, we start by considering a collimated beam that is linearly polarized as shown in Figure 1. The

electric vector (E_1) of the illuminating light at the input to the quarter waveplate (Q_1) is given by:

$$E_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

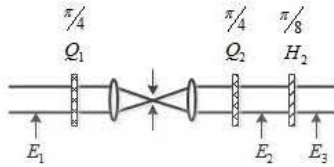


Fig. 1 Diagram for calculating the electric vector E_1 after the second Babinet-Soleil compensator.

By using generalized Jones matrix, the general form of the electric vector of the light (E_2) after passing two objective lens and quarter waveplates (Q_1 and Q_2) can be determined by [5]:

$$E_2 = \begin{bmatrix} T^+ \\ T^- \sin 2\phi - iT^- \cos 2\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

where $T^+ = (\tau_s \tau_p + \tau_s \tau_s) \cos \theta$

$$T^- = (\tau_s \tau_p - \tau_s \tau_s) \cos \theta$$

and τ_p and τ_s are the Fresnel transmission coefficients. In the case of a single objective lens or so-called reflection mode, T^+ and T^- can be written as

$$T^+ = r_s + r_p e^{i\pi} \quad (3)$$

$$T^- = r_s - r_p e^{i\pi} \quad (4)$$

where r_s and r_p are the reflection coefficients for s-polarized and p-polarized light respectively.

The purpose of using a half waveplate (H_2) positioned at the azimuthal angle of $3\pi/8$ (Fig. 1) is to optically manipulation of T^+ and T^- in equation 2 and 3. Therefore, the electric vector of the light (E_3) after passing the half waveplate (H_2) can be written as:

$$E_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -T^+ + T^- \sin 2\phi - iT^- \cos 2\phi \\ T^+ + T^- \sin 2\phi - iT^- \cos 2\phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

At the azimuthal angle of $\phi = \pi/4$, the electric vector E_3 can be determined by:

$$E_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -T^+ + T^- \\ T^+ - T^- \end{bmatrix} \quad (6)$$

Substitute T^+ and T^- shown in equation (3) and (4) into equation (6), the electric vector E_3 can be rewritten as:

$$E_3 = \sqrt{2} \begin{bmatrix} r_p \\ r_s \end{bmatrix} \quad (7)$$

Using equation (7), ellipsometric parameters $\{\Psi, \Delta\}$ are defined by the Fresnel reflection coefficients $\{r_p, r_s\}$ can be calculated by

$$\tan \Psi = \left| \frac{r_p}{r_s} \right| \quad (8)$$

$$\exp i(\Delta) = \exp i(r_p - r_s) \quad (9)$$

III. EXPERIMENTAL SETUP

Figure 2 shows the diagram of the experimental setup for the microellipsometer combined with the polarization shifting interferometer. A He-Ne laser beam with random polarization is transmitted through the polarizer (P_1) and beam expander (EX_1). The polarized beam is then passed to a quarter waveplate (Q_1) and steered on to the objective lens (Nikon, M Plan Apo, NA = 0.95). The beam is focused onto the sample. The reflected beam is collected again by the objective and passed to a quarter waveplate (Q_2) and a half waveplate (H_1) consecutively. At this point after the half waveplate (H_1), the electric vector (E_3) contains substantial information about the Fresnel reflection coefficients of a sample as described in equation (7).

The ellipsometric parameter Δ is defined as the difference of the phases of the p and s complex reflection coefficients as shown in equation (9). In this research, such a parameter is optically determined by using a technique so-called polarization shifting interferometer [6]. The basic principle is based on the optical phase shift by modifying the polarization state of composite components of the original light wave. The phase shifting is achieved by adjusting the polarization state of the output beams with a rotating quarter wave plate (Q_3). The rotation can be more precisely controlled and free from nonlinear behavior and hysteresis comparing with the phase shifting technique reported in [7]. The ellipsometric parameter Δ can be determined by the intensity profile at azimuthal angle $\phi = \pi/4$ of the resulting image of [6].

$$\Delta(\phi = \pi/4) = \arctan \frac{[I_2 - I_4]}{[2(I_1 - I_3)]} \quad (10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Where I_1, I_2, I_3, I_4 are the focal plane images captured by the CCD camera (CCD2) at the quarter waveplate azimuthal angle of $\pi/8, \pi/4, 3\pi/8$ and $3\pi/4$ respectively.

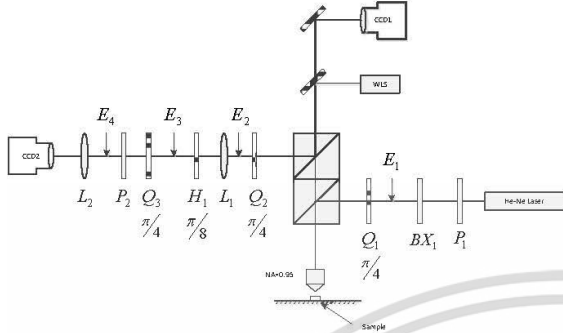


Fig. 2 Diagram of the back focal plane microellipsometry.

The ellipsometric parameters Δ is then used to calculate the optical phase shift on reflection ϕ_0 by using the relationship [7]:

$$\Delta \cong \phi_0 (\theta_i^2 + \theta_i^4 / 6) \quad (11)$$

where θ_i is the incident angle.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

In this paper, the aluminum thin film deposited onto the glass substrate was used as a sample. The azimuthal angle of quarter waveplate was set at the position of $\pi/8, \pi/4, 3\pi/8$ and $3\pi/4$. The captured back focal plane images by CCD camera (CCD2) are shown in Figure 3. All of four images are then processed by using equation (10). The intensity profile at the azimuthal angle $\phi = \pi/4$ of the resulted image is then plotted against the incident angle θ_i of objective lens as shown in Figure 4.

The numerical fitting of the experimental data (shown as dotted curve) to the equation (11) is performed using the curve fitting toolbox in MATLAB. The resulted optical phase shift on reflection ϕ_0 from the fitting procedure is shown in Table 1 comparing with the theoretical values [7]. The good agreement between theoretical and experimental values is achieved.

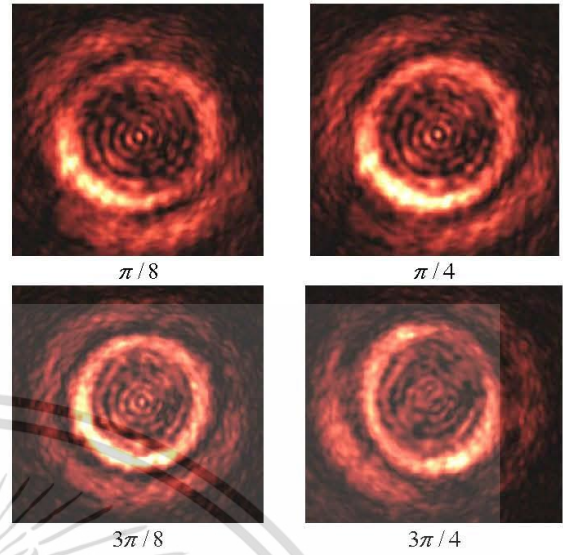


Fig. 3 the focal plane images captured by the CCD camera (CCD2) at the quarter waveplate azimuthal angle of $\pi/8, \pi/4, 3\pi/8$ and $3\pi/4$.

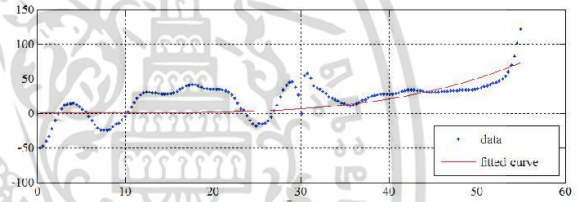


Fig. 4. The data [■] are fitted by Eq.11, and the results are compared with the theoretical curves [—] of the equation (9).

TABLE I
THE COMPARISON OF VALUES OF CALCULATED AND THEORETICAL PHASE SHIFT ON REFLECTION VALUES ϕ_0

Sample	Theoretical	Fitting Curve (Degree)
Aluminum	14.1	13.5

V. CONCLUSIONS

In this paper, we have demonstrated the back focal plane microellipsometer combined with a polarized shifting interferometer to measure optical phase shift on reflection. An aluminum thin film deposited on a glass substrate sample was used as the sample. The good agreement between the resulted phase shift on reflection values and that of the theoretical values was demonstrated.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by Seagate Technology (Thailand) Co. Ltd and College of Data Storage Innovation in King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

REFERENCES

- [1] Y. Mitsuya, "Measurement of ultra low spacing : Laser interferometry," *Japanese journal of tribology*, vol. 43, pp. 921-929, 1998.
- [2] C. Lin and R. F. Sullivan, "An Application of White Light Interferometry in Thin Film Measurements," *IBM Journal of Research and Development*, vol. 16, pp. 269-276, 1972.
- [3] T. Ohkubo and J. Kishigami, "Accurate Measurement of Gas-Lubricated Slider Bearing Separation Using Visible Laser Interferometry," *Journal of Tribology*, vol. 110, pp. 148-155, 1988.
- [4] S. Nanhai, Y. Meng, and L. Jing, "Flying-Height Measurement With a Symmetrical Common-Path Heterodyne Interferometry Method," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 46, pp. 928-932, 2010.
- [5] P. Török, P. D. Higdon, and T. Wilson, "On the general properties of polarised light conventional and confocal microscopes," *Optics Communications*, vol. 148, pp. 300-315, 1998.
- [6] H.-K. Teng and K.-C. Lang, "Polarization shifting interferometric profilometer," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 46, pp. 203-210, 2008.
- [7] C. W. See, M. G. Somekh, and R. D. Holmes, "Scanning optical microellipsometer for pure surface profiling," *Applied Optics*, vol. 35, pp. 6663-6668, 1996/12/01 1996.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cloud-based Optical Characterization of Hard Disk Drive Recording Heads

Weerayuth Khunrattanasiri,¹ Anchyza Yokpradit,¹
Teerawat Tongloy,² and Siridech Boonsang^{1*}

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,

1, Soi Chalong Krung 1, Chalong Krung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

²Center of Industrial Robots and Automation (CiRA), College of Advanced Manufacturing Innovation (AMI),
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,

1, Soi Chalong Krung 1, Chalong Krung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

(Received December 18, 2017; accepted June 5, 2018)

Keywords: micro-ellipsometry, complex refractive index, private cloud, MQTT, flying height

In the hard disk drive (HDD) industry, the measurement of flying height is crucial for the verification of the recording head air-bearing design. The flying performance of recording heads has to be measured and compared with the original design to assure the reliability of HDDs. Optical interferometry is normally used to measure the flying height of recording heads. The key parameter for setting up the measurement is the refractive index, whose values normally deviate depending on machine conditions during the manufacturing processes. The variation in refractive index cannot be identified during flying height measurement because there is no on-line technique for doing so. In this paper, we present a novel technique using in-house designed micro-ellipsometry to measure the complex refractive index combined with data transfer to a private cloud network via the Internet of Things message queuing telemetry transport (IoT MQTT) protocol. Therefore, the measurement of the complex refractive index can be carried out for each recording head and we can improve the precision of the flying height measurement. In addition, the information about refractive index not only can be shared with a flying height tester to correct the variation in each recording head but also can be used to assist air-bearing designers in the instantaneous validation of their design.

1. Introduction

As the capacity of hard disk drives (HDDs) increases exponentially, the flying height of recording heads is expected to be as small as about 10 nm during their operation. To guarantee the reliability of HDDs for long-term operation, the flying performance of recording heads has to be measured to validate the original air-bearing design. The flying height measurement of recording heads is a key process in the validation of HDD production. The precision of flying height measurement has to be 0.05 nm. The important input parameter for the flying height

*Corresponding author: e-mail: siridech.bo@kmitl.ac.th
<https://doi.org/10.18494/SAM.2018.1850>

measurement is the complex refractive index (n,k) of the surface of the recording heads. The conventional standard interferometric flying height tester (D6) is typically used to measure the distance between the hard disk header and media. It is a well-known HDD industrial standard equipment that provides both a highly accurate measurement and good repeatability.

In setting up the process, a D6 machine requires the recording head's refractive index (n,k) as user input. n is a refractive index that indicates the optical phase velocity and k is an optical extinction coefficient. The obtained values are used as the input constants to determine the flying height of a hard disk reader. The D6 machine itself cannot quantify the n,k value. However, the n,k value can normally be measured by a standard industrial ellipsometer. With the limited spot size of a conventional industrial ellipsometer. The n,k value of an individual slider on a head gimbal assembly (HGA) cannot be measured. An example of an HGA is shown in Fig. 1.⁽¹⁾ The measured n,k values from the slider bars are used as the representative values for the entire production (more than 500 k samples). However, the condition of the machine during HDD manufacturing (from slider bars to HGA forms) causes the n,k value to change. Therefore, the flying height measurement in a D6 machine suffers considerably from this discrepancy. Leong *et al.*⁽²⁾ presented a technique of determining the optical constants (n,k) on a spot of an individual HGA. Their technique improves the accuracy and repeatability of flying height measurements. However, the statistical distribution of real HGAs has a substantial effect on the performance of their system.

Instead of using a conventional ellipsometer to measure the n,k value, the development of a specially designed micro-ellipsometer may provide flexible solutions for performing measurement at the HGA level. Feke *et al.*⁽³⁾ demonstrated a measurement system based on a back focal plane micro-ellipsometer. They showed the ellipsometric analysis of various materials with a relatively small measurement spot size. They used the Fourier plane, which is sometimes called the back focal plane. However, a mechanical phase shifting technique may cause additional errors in the measured values. These measurement errors are primarily contributed by the nonlinear behavior and hysteresis of a PZT transducer used for creating mechanical movement. This shortcoming has been mentioned in numerous reports.^(4,5) To avoid the errors that arise from the nonlinear behavior and hysteresis of the PZT phase shifter,

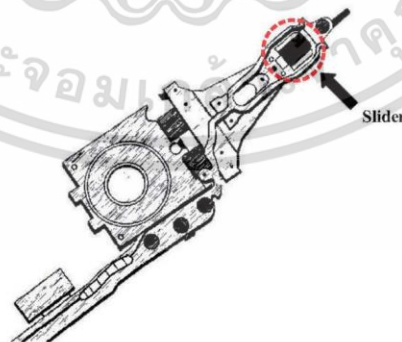


Fig. 1. (Color online) Example of a slider installed on an HGA.⁽¹⁾

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

a system based on phase shifting interferometry has been developed.⁽⁶⁾ The optical phase of a light wave can be changed by modifying the polarization state of composite components of the original light wave. A rotating quarter-wave plate (QWP) was utilized to alter the light polarization state. It is normally located at the beam path where the reference and probe beams propagate collinearly after recombination. The rotation of a QWP can be precisely controlled. It is also less affected by the nonlinear behavior and hysteresis. Therefore, the high resolution in optical phase measurement can be achieved. In our system, we implement this technique to substitute a PZT phase shifter for optical phase measurement.

The complex refractive index of the surface of recording heads gives essential values for engineers to design and evaluate the performance of recording heads. These values are routinely used in several production departments and also different locations such as R&D centers, a US headquarter, and a production line (D6 machine setting) in the manufacturing factory. Therefore, the cloud-based measurement system is a desirable solution for the instantaneous sharing of such information about the reflective index values. The push protocol is the most prevalent message transmission protocol for IoT devices.^(7–10) This is due to the fact that such a protocol is designed in the low-bandwidth network typically. Push message services implemented various protocol forms such as XMPP, CoAP, and MQTT. In particular, the MQTT protocol was considered to run on low-power devices efficiently as a light-weight protocol. It has been used in many IoT devices for instant messaging systems. The MQTT protocol is intended to ensure the quality of service (QoS) of each short message. However, it could be challenging to ensure precise delivery of these messages when a number of them are transmitted from senders. The receiving order of the messages is essential for the production line since users' requirement is to trace n,k information for each recording head. Therefore, in order to implement the MQTT messaging for distributing the measured reflective index values from our micro-ellipsometer machine (sender), the latency of data transmission should be carefully investigated.

In this research, we present the development of an optical characterization system for recording heads in a cloud-based environment. This system can measure the complex reflective index (n,k) of an individual HGA online. We report a novel technique using micro-ellipsometry combined with phase shifting interferometry to measure the complex reflective index at a relatively small spot size (0.1 mm). The micro-ellipsometer utilizes the special properties of a high-numerical-aperture (NA) optical objective lens. The change in optical phase shift at different incident angles can be measured instantly using a high-NA objective lens. The phase shifting technique based on a rotating QWP is used to extract the optical phase shifts of the s- and p-components of rays reflected from a high-NA objective lens. Our micro-ellipsometry system enables measurement over a relatively small spot size. The spot size is typically smaller than 0.1 mm. The n,k value is distributed from the micro-ellipsometer to a private cloud network. The private cloud utilizes the message queuing telemetry transport (MQTT) protocol for data distribution to related users. Our system offers the actual values measured for an individual slider on an HGA. As a result, the flying height measurement of the D6 machine is more precise.

2. System Descriptions

2.1 Micro-ellipsometer system configuration

The diagram of the micro-ellipsometer is shown in Fig. 2. The photograph of the actual hardware employed in this research is shown in Fig. 3. An unpolarized beam of the He-Ne laser is used as the light source of the measurement system. The wavelength of a He-Ne laser is 632.8 nm. The unpolarized beam is converted into a polarized beam by polarizer P_1 , then the polarized beam is expanded by beam expander BX_1 . The beam is directed through a high-NA

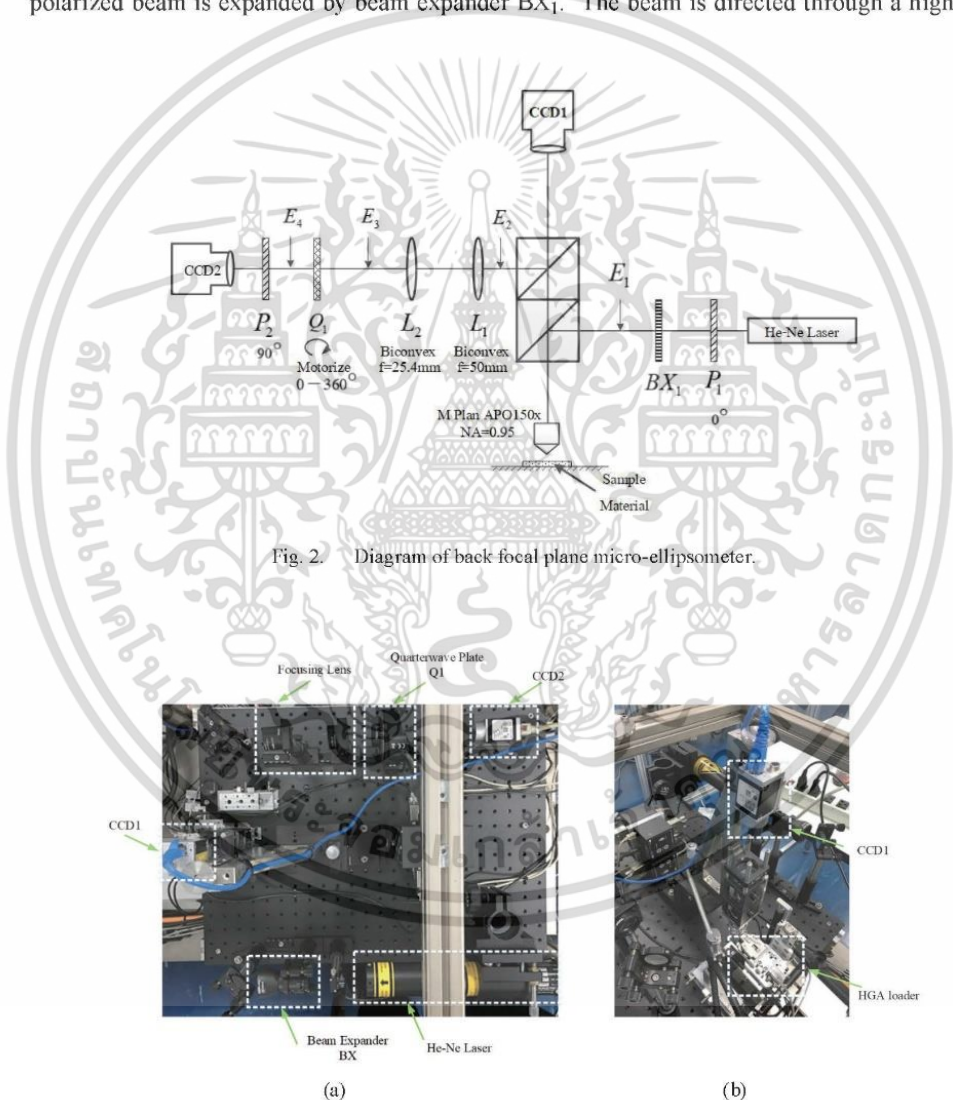


Fig. 2. Diagram of back focal plane micro-ellipsometer.

Fig. 3. (Color online) Optical system for flying height measurements. (a) Full diagram of micro-ellipsometer. (b) HGA loader.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

objective lens. The magnification of the objective lens is $150\times$; therefore, the spot size of the beam is less than $0.1\ \mu\text{m}$. Such a small spot size is beneficial for performing the measurement on the relatively small recording head (typical measurement area of $50 \times 50\ \mu\text{m}^2$). The NA of the objective lens is 0.95 and its incident angle is $0-71.8051^\circ$, which is derived from

$$NA = n\sin(\theta). \quad (1)$$

After the beam passes through the objective lens, the light is reflected back from the material to the objective lens and passes through the beam splitters. After passing the second beam splitter, the reflected beam is transmitted to the L_1 and L_2 lenses. The positions of L_1 and L_2 lenses are fixed so that the reflected beam at point E_3 is the image of the back-focal plane of the objective lens. The reflected beam is then directed to QWP Q_1 and polarizer P_2 , respectively. In the last step, the CCD2 camera is used to capture an image of the beam passing through polarizer P_2 . QWP Q_1 is rotated from 1 to 360° with an azimuthal angle resolution of 1 degree per step. The CCD2 camera is then used to record an image for each azimuthal rotation step. The typical recorded images for azimuthal angles of 0° , 45° , 90° , and 135° are shown in Fig. 4.

2.2 Image analysis procedure for retrieving n, k values from recorded images

The flowchart for the image analysis procedure for recovering n, k values from the recorded images is shown in Fig. 5. The first step in optical image analysis begins with the images captured by the CCD2 camera. The color image is initially converted to a grayscale and QWP Q_1 is rotated from 1 to 360° with the resolution of 1° . Therefore, in one measurement circle, there are 360 recorded images. The typical recorded image is shown in Fig. 6. For each recorded image, the intensity level data point is selected along the line at 45° diagonal as shown in Fig. 6. This selected data is called a data line for each recorded image. In the next process, each data line for each recording image is stacked in column-wise. The resulting image from the stacking of SiO_2 measurement images is shown in Fig. 7. This image is called the stacked intensity image (SII). In order to retrieve the optical phase shift value for each incident angle, the fast Fourier transform (FFT) is then performed on each horizontal data line of SII. The phase shift values of FFT calculation for each incident angle are plotted. The resulting plot, the

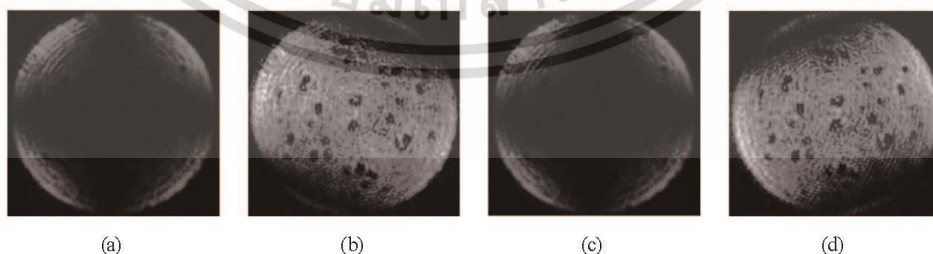


Fig. 4. Rotation of the azimuthal angle of QWP Q_1 . (a) 0° , (b) 45° , (c) 90° , and (d) 135° .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

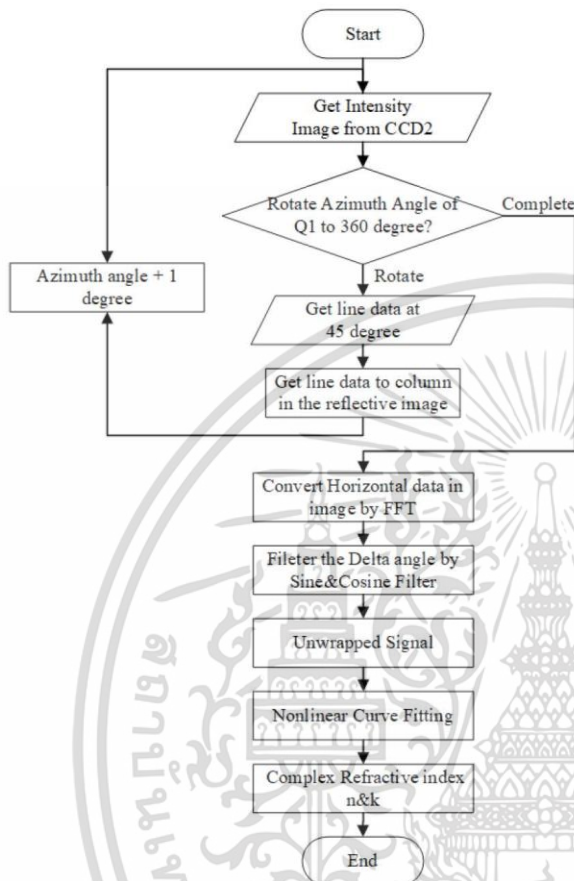


Fig. 5. Procedure of optical image processing.

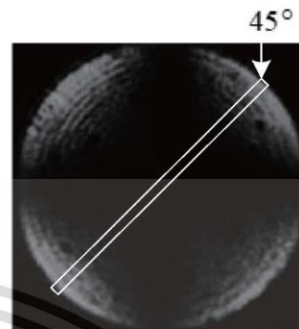


Fig. 6. Intensity image of Q₁ (azimuth = 1°).

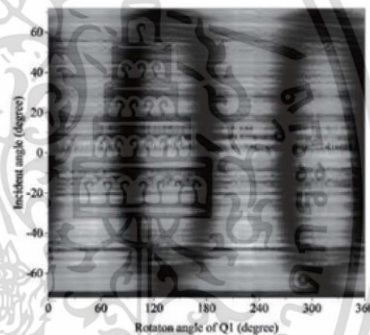


Fig. 7. Stack intensity images of SiO₂ materials.

so-called delta angle, is shown in Fig. 8. The delta angle is unwrapped to eliminate the transient impulse phase changes. The n,k value is then determined by the curve fitting procedure for the measured delta angle.

2.3 Distribution of measured n,k value from a micro-ellipsometer system with a MQTT protocol

In our system, we choose the MQTT protocol to transfer the measured n,k values to the cyber space. The measured data are transmitted to subscribers such as flying height tester engineers, managers, and designers in headquarter, or setting up engineers for a flying height tester (D6). The flying height tester engineer can use the data for analysis while headquarters can use the data to report the HDD quality. Figure 9 shows the diagram of the configuration of a private cloud measurement system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

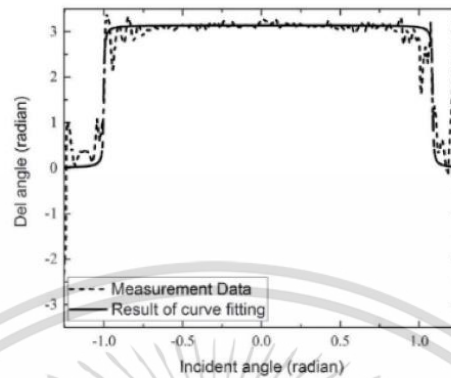
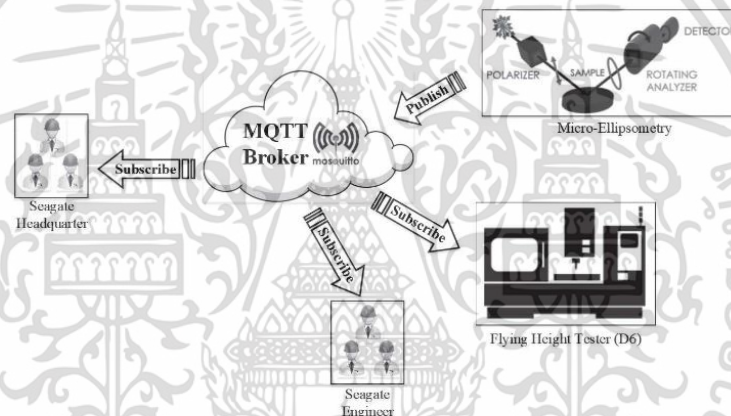
Fig. 8. Delta angle of SiO₂.

Fig. 9. Private cloud structure of optical characterization.

However, the correct receiving order of the measured reflective values is important for the user requirement in order to trace measurement data for every recording head. Therefore, we need to consider the QoS levels so that it is sufficient for both message delivery and latency for data communication. The MQTT push protocol, which is a settlement between the sender and receiver of a single message regarding the guarantee of message delivery, normally describes the transmission QoS levels. There are three transmission QoS levels in MQTT.

- QoS 0: At most once. A message is sent at most once and the server does not guarantee of delivering a message.
- QoS 1: At least once. A message is sent at least once and it is possible to deliver a message more than once.
- QoS 2: Exactly once. A message is sent exactly once with 4-way handshaking.

In our experiment, we perform the test on the data communication via the MQTT protocol for different QoS levels. The measured round-trip time and throughput are recorded for each QoS level.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Mosquitto MQTT server is configured for private cloud data communication. The in-house communication program embedded in the micro-ellipsometer system is developed using Microsoft visual C# and Node-Red. The program reformats the measured n,k values to be in a JSON format and send to the private cloud network via MQTT. The Node-Red server receives data and splits them into n,k values as shown in Fig. 10. The n,k data are plotted in separate graphs. The stakeholder can monitor data through web interface service.

3. Results and Discussion

3.1 Micro-ellipsometer measurement results

Figure 11 shows the SIIs of glass (SiO_2), gold (Au), and aluminium titanium carbon (AlTiC). The intensity patterns of SIIs evidently vary depending on the optical properties of materials. Each intensity pattern is in a bright-dark format, which comprises 4 repetitive cycles. Therefore, in order to extract the phase shift for each incident angle, we need to perform the FFT calculation and select only the phase shift of the fourth-order harmonic to create the delta angle for each incident angle as shown in Fig. 12. The x -axis is the incident angle and the y -axis is the delta angle (optical phase shift). The incident angle ranges from π to $-\pi$. The delta angle is therefore filtered by sine and cosine filters. The sine and cosine filters are normally used to eliminate spike phase shift noise. In the final process, the complex refractive index (n,k) is determined by nonlinear curve fitting to the delta angle graph using the least-squares method (LSM).

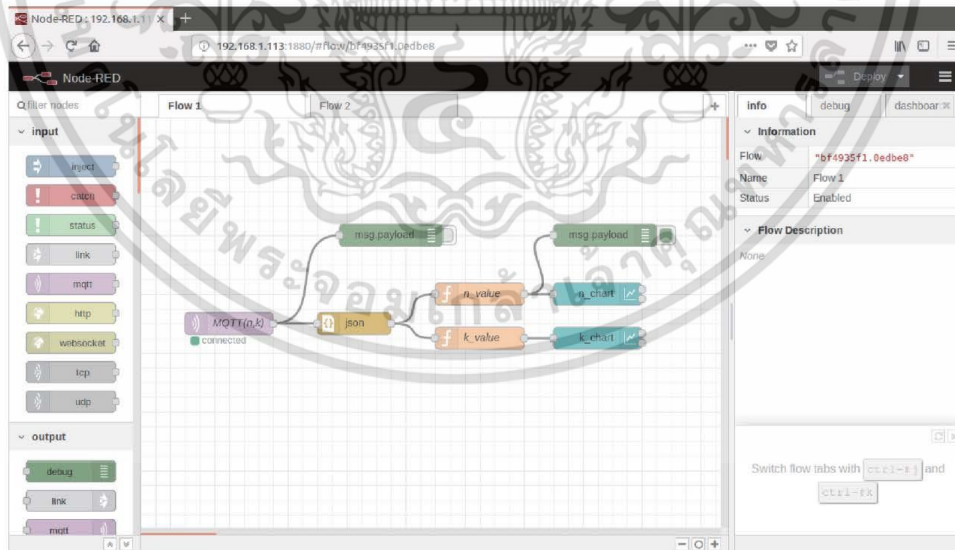


Fig. 10. (Color online) Workflow of Node-Red.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

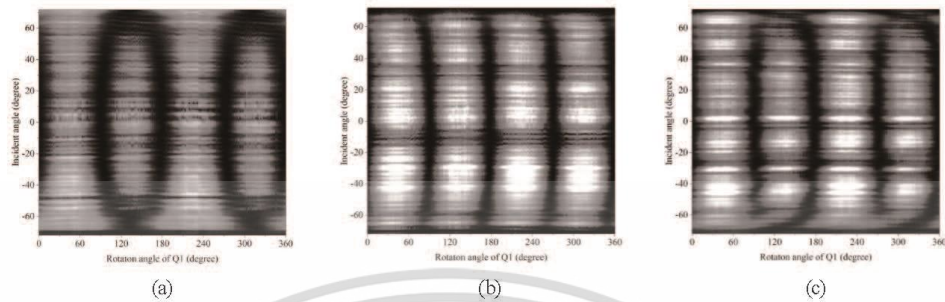


Fig. 11. Stack intensity images of (a) SiO₂, (b) Au, and (c) AlTiC.

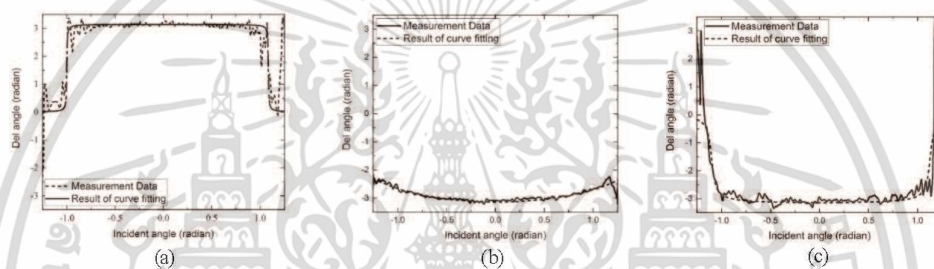


Fig. 12. Delta angles of (a) SiO₂, (b) Au, and (c) AlTiC.

Table 1 shows the reference and measured values. The complex refractive index consists of the refractive index (n) and extinction coefficient (k) (<http://www.filmetrics.com>). The measured n, k values show good correlation with their reference values.

3.2 Distribution of n, k values via MQTT results

For the distribution of the measured n, k values from the micro-ellipsometer, the data is sent to the cloud network by MQTT according to the system described in the previous section. Figure 13 shows the GUI interface for monitoring n, k values for all users. We choose a standard IEEE 802.3 wireline network to communicate instead of the standard IEEE 802.11 wireless network. This is due to the fact that the performance of the wireless network is reduced by a large number of clients and the frequency and channel interference. The micro-ellipsometer has an operating cycle time of 1 min. Our MQTT system transmits and receives data for each cycle typically less than 1 min as shown in Fig. 14. The QoS level setting shows a significant effect on the round-trip time as expected (Table 2). However, the communication time using MQTT is greatly less than the operating cycle of the micro-ellipsometer; thus, we are assured that the measurement data transmitted through the network is certainly in the correct receiving order. Figure 15 and Table 3 show a summary of the throughputs of the MQTT system in different QoS setting.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1
 n, k values of practical standards and measurements.

	Refractive index	Refractive index (n)	Extinction coefficient (k)
SiO ₂	Practical standard	1.460	0.000
	Measurement value	1.519	-0.010
Au	Practical standard	0.181	3.068
	Measurement value	0.136	4.133
AlTiC	Practical standard	2.236	0.426
	Measurement value	2.295	0.200

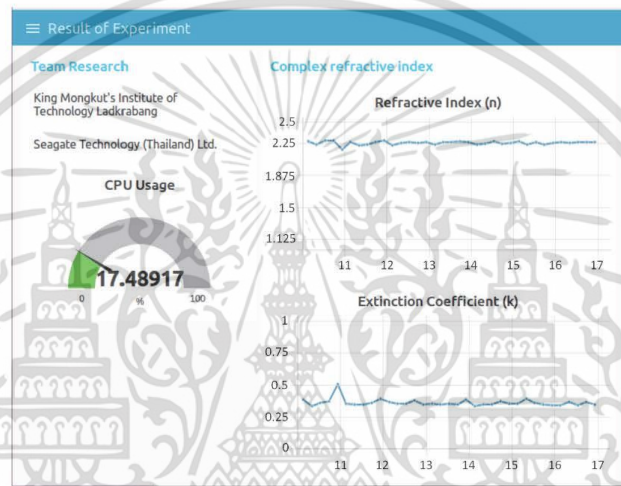


Fig. 13. (Color online) Experimental results.

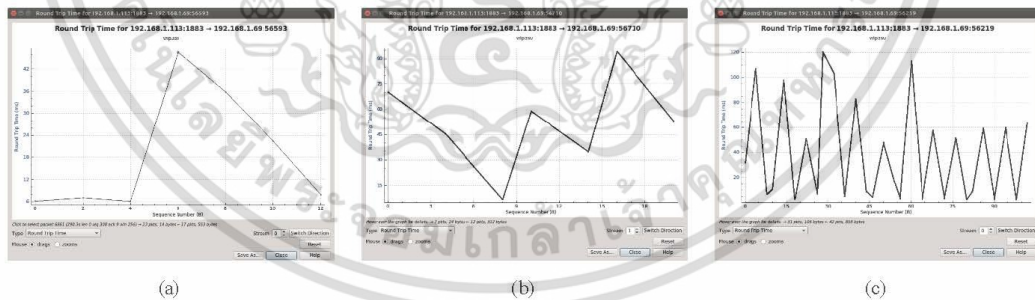


Fig. 14. (Color online) Round-trip time of MQTT communication.

Table 2
 Round-trip time averages.

	QoS = 0 (At most once)	QoS = 1 (At least once)	QoS = 2 (Exactly once)
Round-trip time average	18.714 ms	51.429 ms	39.107 ms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

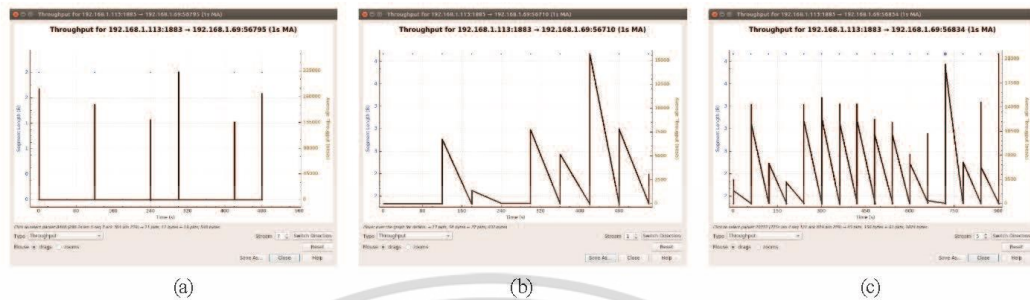


Fig. 15. (Color online) Throughput of MQTT communication.

Table 3
Maximum throughput of MQTT communication.

	QoS = 0 (At most once)	QoS = 1 (At least once)	QoS = 2 (Exactly once)
Maximum throughput	225000 bps	15500 bps	21700 bps

4. Conclusions

In this paper, a cloud-based measurement system for recording head optical characterization is presented. The system can be used to determine the complex reflective index (n, k) . The measured n, k values are transmitted over the private cloud network using the MQTT protocol. These optical constants are sent to the stakeholders and the flying height machine (D6). The micro-ellipsometer utilizes standard samples of Au and SiO₂ for calibration. The results of measurements are close to the range of reference values and industrial standard. This method of flying height measurement improves the measurement speed with smaller spot size for individual recording heads and also the sharing measurement data between the stakeholders. In addition, the round-trip time of MQTT data communication shows that the communication time using MQTT is greatly less than the operating cycle of the micro-ellipsometer. With these results, we are assured that the measurement data transmitted through the network is certainly in the correct receiving order.

Acknowledgments

This work was supported by Seagate Technology (Thailand), King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang and Rajamangala University of Technology Phra Nakhon.

References

- 1 S. Yammen and P. Muneesawang: IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol. **4** (2014) 1523.
- 2 S. H. Leong, Z. M. Yuan, K. W. Ng, and B. Liu: IEEE Trans. Mag. **42** (2006) 2534.
- 3 G. D. Feke, D. P. Snow, R. D. Grober, P. J. de Groot, and L. Deck: Appl. Opt. **37** (1998) 1796.
- 4 C. Ai and J. C. Wyant: Appl. Opt. **26** (1987) 1112.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5 K. Creath: Temporal Phase Measurement Methods (Wiley, New York, 1993).
- 6 H.-K. Teng and K.-C. Lang: Opt. Lasers Eng. **46** (2008) 203.
- 7 D. C. Y. Vargas and C. E. P. Salvador: IEEE Lat. Am. Trans. **14** (2016) 3900.
- 8 N. Tantitharanukul, K. Osathanunkul, K. Hantrakul, P. Pramokchon, and P. Khoenkaw: Int. Conf. Digital Arts, Media and Technology (ICDAMT) (2017) 62.
- 9 IBM MQTT Protocol Specification: <http://public.dhe.ibm.com/software/dw/webservices/ws-mqtt/mqtt-v3r1.html> (accessed December 2015).
- 10 S. Lee, I. Jung, H. Kim, and H. Ju: Asia-Pacific Network Operations and Management Symp. (APNOMS) (2013) 1.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reflection image model for Micro-Ellipsometer

Weerayuth Khunrattanasiri

Department of Electrical Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand.
weerayuth.k@rmutp.ac.th

Siridech Boonsang

Department of Electrical Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand.
siridech.bo@kmitl.ac.th

Abstract— High accurate distance measurement currently favors optical techniques. Ellipsometer usually can find the optical properties. The data from the Ellipsometer will transfer to distance data but micro-ellipsometer can provide more accurate than general ellipsometer. The micro-ellipsometer use the back focal plane of an objective lens and measures the optical properties in the different angles. The micro-ellipsometer result is the intensity image. The light reflection model can give us original light reflection images of any objects by determining the refractive index of the material and create a reflection image model. This research created optical reflection models of SiO_2 , Au, Ti and Al.

Keywords— Micro-ellipsometer; Intensity image; Back focal plane; Complex Refractive Index

I. INTRODUCTION

Ellipsometer is an instrument for finding light properties of a material. It calculates the complex refractive index by using phase difference. The complex refractive index have the real number and extinction coefficient. The extinction coefficient is an imaginary number. The light reflection consists of the s-polarized and p-polarized. The s-polarized and p-polarized illustrate a different phase caused the optical retarder device. The phase difference can be determine the state of polarization [1].

Ellipsometry has typically three types, General Ellipsometry, Photometric ellipsometry, and interferometric ellipsometry. We ordinarily apply light technique to build an optical instrument for measure flying height of HDD header. This optical instrument has resolution less than 5-micron. Moreover, measuring the flying height of an object also use Polarised light by light reflection values. An essential parameter for measuring the flying height is a complex refractive index (n,k). Leong, et al. showed a method that can find the complex refractive index on the head gimbal assembly (HGA) [2] and displayed the accuracy of measurement. Ellipsometer mostly measured complex refractive index is measured Feke, et al.[3] use the back focal plane micro-ellipsometer to measure the flying height of HDD header. For the designed model were able to find a complex refractive index of various materials because of small spot size. According to the prior research, the researchers had an idea to create a light reflection model to compare with a model of Mathew R and his team[4] that presented a calculation method to find vectorial imaging pictures which came from high NA objective lens.

This research creates a light reflection model of micro-ellipsometer to determine the pattern of light reflection at any azimuth angles, and the results of each angle are different. We create the reflection image model as a tool to check the accuracy of the light intensity that we obtain from micro-ellipsometer. In our experiment, we use micro-ellipsometer measures the optical properties of 4 material that are SiO_2 , Au, Al, and Ti because they are popular for finding reflective optical properties[2]. Generally, SiO_2 , Au, Al, and Ti are applied in HDD (Hard Disk Drive) industry. After we compare the light intensity from micro-ellipsometer with the light reflection model, we found that the light intensity image from micro-ellipsometer is correct. And then we calculate the complex refractive index of the light intensity that comes from micro-ellipsometer. Additionally, we use the complex refractive index to determine the flying height of the hard disk drive header.

II. THE PRINCIPLE OF COMPLEX REFRACTIVE INDEX

When the light hit on the surface of any material, the light will reflect and be absorbed into the material. The complex refractive index is the following equation [5].

$$\eta = n(1 + ik) \quad (1)$$

Where

n = real number called refractive index
k = imaginary number called extinction coefficient

Polarized light consists of s-polarized and p-polarized as s-polarized (from the German "senkrecht" for perpendicular) or σ polarization. We might know as transverse electric or TE. We well known p-polarized (from the German "paralleled" for parallel) or π polarization in the name of transverse magnetic, or TM. The Fresnel equation for reflection amplitude displayed as the below equation.

$$R_s = \frac{\cos(\varphi_1) \mp \sqrt{\eta^2 - \sin^2(\varphi_1)}}{\cos(\varphi_1) \pm \sqrt{\eta^2 - \sin^2(\varphi_1)}} \quad (2)$$

$$R_p = \frac{-\eta^2 \cos(\varphi_1) \pm \sqrt{\eta^2 - \sin^2(\varphi_1)}}{\eta^2 \cos(\varphi_1) \pm \sqrt{\eta^2 - \sin^2(\varphi_1)}} \quad (3)$$

The Fresnel equation also is shown as the coming equation. We used equation of R_p and R_s for creating reflection images. Substituted n and k of selected materials which we wanted to obtain models into equation (2), (3). We gained optical intensity images at 0-degree.

III. PRINCIPLE OF JONES MATRICES

We will apply Jones matrix calculus to find the matrix form for retarder or phase shifts and polarizers. The beam components which emerge from a polarising element are linearly related to the components of the incident beam. The Jones matrix is useful for a linear polarizer rotated through an angle that we also use the familiar rotation transformation to find.

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

For a retarder or phase shifter, we use the Jones matrix as the below equation.

$$J_R(\phi) = \begin{bmatrix} e^{i\phi/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\phi/2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

The Jones matrix for a rotated retarder is found from (4) and (5) to be

$$J_R(\phi, \theta) = \begin{bmatrix} e^{i\phi/2} \cos^2 \theta + e^{-i\phi/2} \sin^2 \theta & (e^{i\phi/2} - e^{-i\phi/2}) \sin \theta \cos \theta \\ (e^{i\phi/2} - e^{-i\phi/2}) \sin \theta \cos \theta & e^{i\phi/2} \sin^2 \theta + e^{-i\phi/2} \cos^2 \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

In the next step, We also adjusted the fast axis of the quarter-wave plant ϕ from 0-degree to 90-degree based on the Jones matrices equation.

$$J_R\left(\frac{\lambda}{4}, \phi\right) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} \cos 2\phi & \frac{i}{\sqrt{2}} \sin 2\phi \\ \frac{i}{\sqrt{2}} \sin 2\phi & \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{i}{\sqrt{2}} \cos 2\phi \end{bmatrix} \quad (7)$$

IV. EXPERIMENTAL

The optical reflection model selects optical parameters of four materials that have a wavelength equal to 632.8 nm.

SiO_2	= 1.45704 + 0i
Au	= 0.18104 + 3.068099i
Al	= 1.37289 + 7.617691i
Ti	= 2.15349 + 2.923488i

They are the standard materials that are used in testing with optical instruments. The SiO_2 is a calibration material for optical instruments. The other material (Al, Ti, Au) are the

most popular material reference for standard test materials that produced by GoodFellow Company. The micro-ellipsometer chooses the numerical aperture equal to 0.95 which is a spec of the objective lens. Additionally, the objective lens uses the Nikon M Plan APO 150 [6-7].

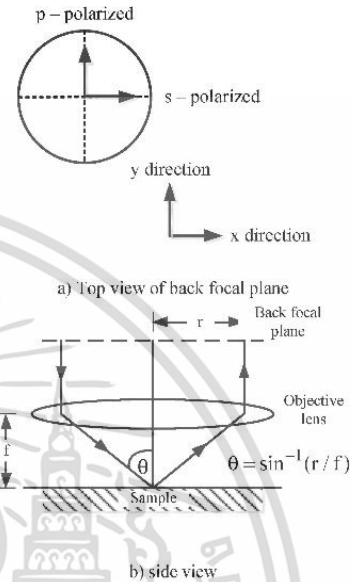


Fig. 1. Principle of back focal plane ellipsometry [7]

Fig. 1 shows the principle of back focal plane ellipsometry. Inside the back focal plane, it consists of s-polarized and p-polarized. The intensity image is caused by the distribution of the incident beam onto the material from the light source as shown on figure 1b.

According to figure 2, it expressed creation processes of the optical reflection model. To find the complex refractive index, this model use the standard n & k values from the Filmetrics company (<http://www.filmetrics.com>). The light source had a wavelength equal to 632.8nm. This wavelength is the same value as micro-ellipsometry. We used the n & k values to find phase different of light (R_s and R_p). At this point, the light had fast axis at 0-degree. After that we adjusted fast axis angle from 0-degree to 90-degree by Jones Matrix for rotating the quarter wave plate. Finally, we plotted optical intensity images.

Fig. 2 illustrate the process of creating the intensity image. The algorithm is implemented by MATLAB software.

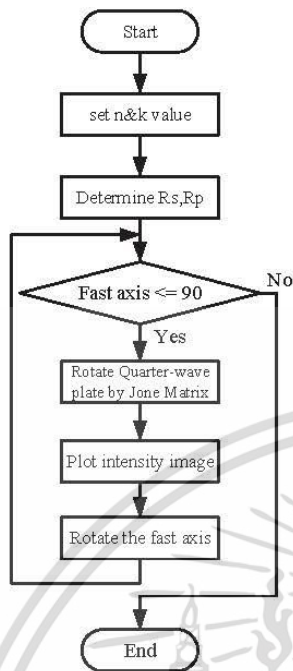


Fig. 2. The process of creating the intensity image.

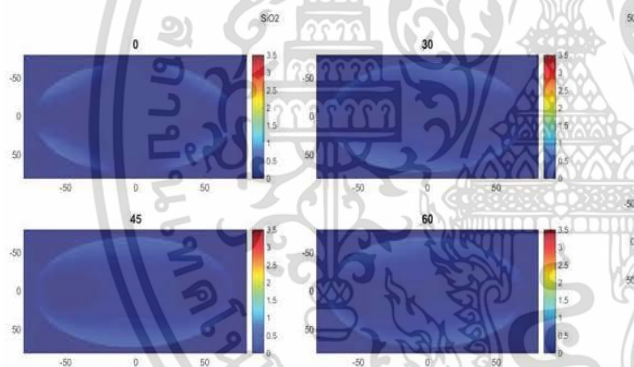


Fig. 3. Intensity image of glass (SiO₂).

We plotted the optical image of all four materials from 0-degree to 90-degree and 15-degree for each step plots because we will get the same images as from 0-degree to 90-degree after 90-degree. Due to the difference in their refractive index and extinction coefficient, the optical intensity image of the four materials has different shapes. In each the intensity image, a phase difference (Δ) is between 0 and 3.5. From all four materials, it demonstrates that Au has light intensity more than the other materials as Au has the lowest refractive index (n).

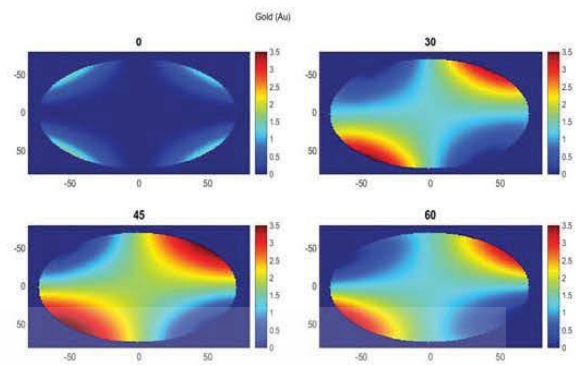


Fig. 4. Intensity image of gold (Au).

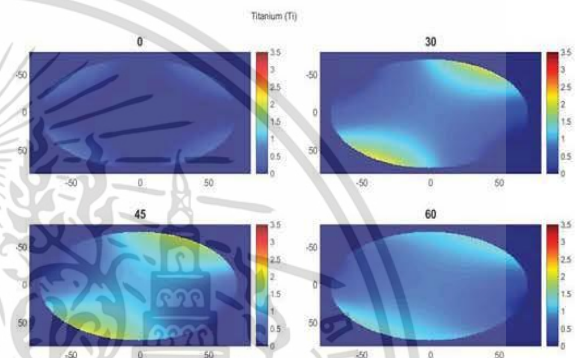


Fig. 5. Intensity image of titanium (Ti).

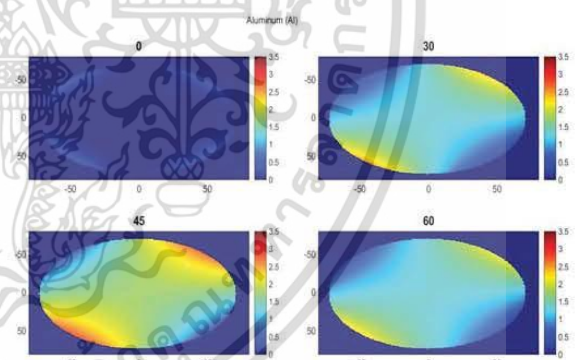


Fig. 6. Intensity image of aluminium (Al).

Fig. 3, 4, 5 and 6 present the angle of optical reflection. Center of the figures is 0-degree. All the three figures come from adjusting azimuth angle of quarter-wave plate from 0-degree to 90-degree. We discover that the four materials have different optical intensity.

In this paper, we compare the optical intensity images with the optical intensity images from micro-ellipsometer to find identical properties. When considering the light intensity at 0

degrees of the 4 images, it have plus sign which match with the prior research [1,2,3,8]. But the other angle of images are different from the 4 materials.

From the optical intensity image of aluminum in figure 5, the intensity at the fast axis between 30-degree and 60-degree has more optical intensity than the other four materials because the reflection properties of aluminum is higher than Au, Al and Ti. SiO_2 , has the smallest light reflects the smallest.

V. CONCLUSION

When we compared with the similar research papers, we found that there were optical reflection images that displayed 0-degree identical to our four materials (SiO_2 , Au, Ti, Al). We additionally adjusted the angles of Quarter-wave plate from 0-degree angle to 90-degree angle. We discovered that all four materials had different light intensity pictures from each other. Thus, we will continually work on this topic to show the results of comparing results with Micro-ellipsometry on incoming paper.

ACKNOWLEDGMENT

I must thank the faculty of engineering in King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for technical support and Rajamangala University of Technology Phra Nakhon for scholarship.

REFERENCES

- [1] R. M. A. Azzam, *Ellipsometry and polarized light* / R. M. A. Azzam and N. M. Bashara. Amsterdam ; New York : New York: North-Holland Pub. Co. ; sole distributors for the U.S.A. and Canada, Elsevier North-Holland, 1977.
- [2] S. H. Leong, Z. Yuan, K. W. Ng, and B. Liu, "On-Spot (n,k) Compensation by CCD for Precision Optical Flying Height Measurement," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, pp. 2534-2536, 2006.
- [3] G. D. Feke, D. P. Snow, R. D. Grober, P. J. de Groot, and L. Deck, "Interferometric back focal plane microellipsometry," *Applied Optics*, vol. 37, pp. 1796-1802, 1998/04/01 1998.
- [4] P. Török, "Computational methods in vectorial imaging AU - Foreman, Matthew R," *Journal of Modern Optics*, vol. 58, pp. 339-364, 2011/03/10 2011.
- [5] D. Goldstein and D. H. Goldstein, *Polarized Light*. Revised and Expanded: CRC Press, 2003.
- [6] W. Khunrattanasiri and S. Boonsang, "An interferometric back focal plane microellipsometry for the determination of optical properties of a slider's air bearing surface," in *Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA), 2014 Asia-Pacific*, 2014, pp. 1-4.
- [7] W. Khunrattanasiri and S. Boonsang, "A micro-ellipsometry method based on polarization shifting interferometry for determining complex reflective index," in *2016 International Conference on Instrumentation, Control and Automation (ICA)*, 2016, pp. 66-69.
- [8] M. I. Shribak, S. Inoue, and R. Oldenbourg, *Polarization aberrations caused by differential transmission and phase shift in high numerical aperture lenses: theory, measurement, and rectification* vol. 41: SPIE, 2002.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวีระยุทธ คุณรัตนศิริ
วัน เดือน ปีเกิด	27 สิงหาคม 2521 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	166/16 ถนนเพชรเกษม แขวงวัดท่าพระ เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพฯ 10600 โทรศัพท์ 089-488-7880
ประวัติการศึกษา	2543 ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2548 วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 2551 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และ โทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน 2554 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) การวัดสัญญาณโดยใช้เทคนิคทางแสง 2.) การประมวลผลสัญญาณภาพ และสัญญาณเสียง 3.) เครือข่ายคอมพิวเตอร์
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ.2551-ปัจจุบัน	ตำแหน่งอาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
พ.ศ.2551-2555	ตำแหน่งอาจารย์ สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
พ.ศ.2548-2551	ตำแหน่งวิศวกรเครือข่าย ฝ่ายเครือข่ายสื่อสารและบริการวิทยาเขต สำนักบริการคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
พ.ศ.2546-2548	ตำแหน่งอาจารย์ แผนกช่างอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ โรงเรียนเทคโนโลยีสยาม
ปัจจุบัน	ตำแหน่งอาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้