

การศึกษาระบบอีไลปโซมิเตอร์ชนิดปรับมุมได้
โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงความถี่เดียว



โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

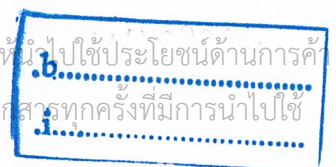
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 51879
วันเดือนปี..... 1 ส.ค. 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**A study of variable angle Ellipsometer
by use single frequency light source**



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of
Bachelor of Science
Department of Applied Physics
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year 2003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การศึกษาระบบอีลิปโซมิเตอร์ชนิดปรับมุมได้โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง
ความถี่เดียว

นักศึกษา นายกฤษณะ สมจิตร
นายชัยพฤกษ์ จันทร์เพชร

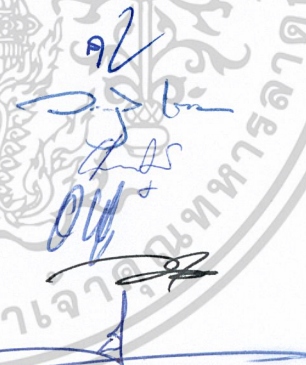
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

สาขาวิชา โสณิศาสตร์เทคโนโลยีสารสนเทศ

อาจารย์ที่ปรึกษา อ.อัศวิน เรณูสวัสดิ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.วิญญู เพชรภา
อ.สุรชาติ กมลดีดก

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ รศ.สุวรรณ คูคำราญ	
กรรมการ ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาคัดดา	
กรรมการ อ.สาห์ราย คุณีพงษ์	
อาจารย์ที่ปรึกษา อ.อัศวิน เรณูสวัสดิ์	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.วิญญู เพชรภา อ.สุรชาติ กมลดีดก	



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ)

หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การศึกษาระบบอิลิปโซมิเตอร์ชนิดปรับมุมได้โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงความถี่เดียว

นักศึกษา นายกฤษณะ สมจิตร
นายชัยพฤกษ์ จันทรเพชร

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

สาขาวิชา โพลิตีคสเทคโนโลยีทรอนิกส์

ปีการศึกษา 2546

อาจารย์ที่ปรึกษา อ.อัสวิน เรณูสวัสดิ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.วิษณุ เพชรภา
อ.สุรชาติ กมลฉิลก

บทคัดย่อ

เครื่องวัดฟิล์มบางที่มีความแม่นยำที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์เรียบที่เป็นโลหะนั้นมีความสำคัญเพื่อที่จะผลิตอุปกรณ์ที่มีคุณภาพ ทำอย่างไรถึงจะได้ฟิล์มที่มีทั้งความหนาและคุณสมบัติทางแสงตามความต้องการ การพัฒนาการศึกษาระบบการวัด Ellipsometry กำลังกลายเป็นที่ใช้กันอย่างกว้างขวางเพื่อบอกลักษณะของฉนวน, อินทรีย์, โลหะและสารกึ่งตัวนำ โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาระบบการวัด Ellipsometry เบื้องต้น ซึ่งกำลังเป็นที่นิยมใช้สำหรับการวัดฟิล์มบางและอริบายแม่พิมพ์โลหะเรียบขนาดเล็ก

คำสำคัญ: Ellipsometry

Special Project Title A study of variable angle Ellipsometer by use single frequency light
Source

Name Mr.Kissana Somjit
Mr.Chaiyapuek Junpet

Department Applied Physics

Program Solid state electronics

Academic Year 2003

Special Project Advisor Mr.Assawin Ranusawud

Special Project co-advisor Asst.Prot.Wisanu Pecharapa
Mr.Surachart Kamoldilok

ABSTRACT

Precise measurements of the thin films used in lithography are important to produce quality devices. Both film thickness and optical properties are critical to how the films react during the development process. Spectroscopic ellipsometry is becoming used extensively to characterize dielectrics, organics, metals and semiconductors. The special project is spectroscopic ellipsometry has become so popular for thin film metrology and discusses a few lithography applications

Keyword: Ellipsometry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จได้ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ อาจารย์อัศวิน เรณูสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ให้โอกาสผู้จัดทำได้ทำงานวิจัยชิ้นนี้ รวมทั้งให้คำปรึกษาและชี้แนะในส่วนของรูปแบบ วิธีดำเนินงานวิจัยและให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ทางด้าน Optics และห้องวิจัย ดร.รัชภักย์ จิตต์อารี อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่กรุณาให้คำปรึกษาทั้งในส่วนของทฤษฎีและเทคนิคการวัด พี่สุรชัย ที่ให้คำปรึกษาทั้งในส่วนของทฤษฎีและการทดลองต่างๆ ผศ.วิษณุ เพชรภา ที่คอยถามไถ่ถึงความก้าวหน้าในการดำเนินงานและให้คำแนะนำในส่วนต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย อ.สุรชาติ กมลคติก ที่ช่วยในการติดต่อขอใช้อุปกรณ์ในการทดลองและให้คำแนะนำต่างๆ กรุณาตรวจสอบความถูกต้องของโครงการพิเศษ ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาถัดดา ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านอุปกรณ์ รศ.สุวรรณ คุณสารานู ที่ได้ให้คำแนะนำในส่วนของทฤษฎีที่ต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

สุดท้ายขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ พี่ๆน้องๆ และเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจพวกเราเสมอมา

นายกฤษณะ สมจิตร

นายชัยพฤษณ์ จันทรเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อโครงการนพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อโครงการนพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการนพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 ระบบการวัด Ellipsometry	3
2.2 The fundamental equation of classical Ellipsometry	4
2.3 The classical measurement of the ellipsometric parameter PSI and DELTA	6
2.4 โพลาริเซชัน	12
2.4.1 Jones vector	13
2.4.2 Jones matrix	25
2.4.3 การทำให้เกิดแสงโพลาริเซชัน	35
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	47
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการ	47
3.2 การจัดเตรียมอุปกรณ์	47
3.3 การจัดชุดอุปกรณ์สร้างเครื่อง Ellipsometer	50
3.4 วิธีการทดลอง	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	54
4.1 ผลการ Alignment system of Ellipsometry	54
4.2 ผลการทดลองการวัดหาค่า Complex refraction index	56
4.3 ผลการสอบเทียบ	76
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	77
5.1 สรุปผลการทดลอง	77
5.2 ข้อเสนอแนะ	78
5.3 แนวทางในการพัฒนา	78
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แสดง Jones vectors แบบต่างๆ	24
ตารางที่ 2 สรุปรูป Jones matrix สำหรับโพลาไรเซอร์ชนิดต่างๆ	32
ตารางผลการทดลองการ Alignment System of Ellipsometer	54
ตารางผลการทดลองหาแนวโน้มนำค่าความเข้มแสงต่ำสุดที่มุมตกกระทบ 35°	56
ตารางผลการทดลองหาค่าความเข้มแสงที่มีค่าน้อยที่สุดที่มุมตกกระทบ 35°	58
ตารางผลการทดลองหาแนวโน้มนำค่าความเข้มแสงต่ำสุดที่มุมตกกระทบ 45°	61
ตารางผลการทดลองหาค่าความเข้มแสงที่มีค่าน้อยที่สุดที่มุมตกกระทบ 45°	63
ตารางผลการทดลองหาแนวโน้มนำค่าความเข้มแสงต่ำสุดที่มุมตกกระทบ 55°	66
ตารางผลการทดลองหาค่าความเข้มแสงที่มีค่าน้อยที่สุดที่มุมตกกระทบ 55°	68
ตารางผลการทดลองหาแนวโน้มนำค่าความเข้มแสงต่ำสุดที่มุมตกกระทบ 65°	71
ตารางผลการทดลองหาค่าความเข้มแสงที่มีค่าน้อยที่สุดที่มุมตกกระทบ 65°	73
ตารางแสดงผลที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าจริง	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 การสะท้อนของแสงที่ตกกระทบฟิล์มบาง	4
รูปที่ 2 ชุดทดลองของการวัดค่า μ และ Δ ของตัวอย่างที่มีคุณสมบัติทางแสง	6
รูปที่ 3 การหักเหและการสะท้อนของคลื่นระนาบที่ระนาบตกกระทบระหว่างตัวกลางต่างชนิดกัน	10
รูปที่ 4 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโพลาไรซ์ระนาบ	12
รูปที่ 5 แสดงสนามไฟฟ้า ณ เวลาหนึ่ง โดยแสงเคลื่อนที่ในแนว +Z	13
รูปที่ 6 แสดงสนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีการวางตัวของสนามไฟฟ้าในแนวต่างๆกัน โดยแสงเคลื่อนที่ในแนว +Z	14
รูปที่ 7(1) สนามไฟฟ้าที่สั้นในแนวแกน X และ Y โดยมีเฟสตรงกันจะได้ผลลัพธ์เป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มี สนามไฟฟ้าสั้นใน quadrant ที่ 1 และ 3	17
รูปที่ 7(2) สนามไฟฟ้าที่สั้นในแนวแกน X และ Y โดยมีเฟสตรงกันข้าม ให้ผลลัพธ์เป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มี สนามไฟฟ้าสั้นใน quadrant ที่ 2 และ 4	17
รูปที่ 8 แสดง Lissajous figures สำหรับการสั้นในแนวแกน X และ Y ที่มีแอมพลิจูดไม่เท่ากัน และมีความต่างเฟส $\Delta\phi = \phi_y - \phi_x$ ค่าต่างๆ	18
รูปที่ 9 แสดง E รวมของกรณีที่มี E ในแนวแกน X และ Y มีขนาดเท่ากันและมีเฟสต่างกัน 90° ที่เวลาต่างๆ และ E_x นำ E_y อยู่ 90° ในรูป (3) แสดงแนววงกลมที่ E รวมกวาดไป	19
รูปที่ 10 แสดงโพลาไรซ์วงรีในกรณี $\Delta\phi = 90^\circ$	21
รูปที่ 11 แสดงแสงโพลาไรซ์เชิงวงรีที่มี major axis ทำมุม α กับแนวแกน X	22
รูปที่ 12 แสดงหลักการการทำงานของโพลาไรเซอร์เชิงเส้น	25
รูปที่ 13 แสดงหลักการของตัวหมุนเฟส	26
รูปที่ 14 แสดงหลักการของตัวหมุนเฟส	27
รูปที่ 15 แสดงให้เห็นประโยชน์ของ Jones matrix ในการวิเคราะห์สถานะทางโพลาไรเซชัน	33
รูปที่ 16 แสดงการวางโพลาไรเซอร์และตัววิเคราะห์ ในลักษณะที่ TA ตั้งฉากกัน	35
รูปที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าที่ผ่านโพลาไรเซอร์และอนาไลเซอร์	36
รูปที่ 18 แสดงผลของตะแกรงลวดต่อไมโครเวฟ ซึ่งจะมีการดูดกลืนในแนวตั้งได้ดี ถ้า	37

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 19 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีหักเหกับความถี่ในย่านใกล้ๆ กับ แถบการดูดกลืน	38
รูปที่ 20 แสดงการหักเหสองแนว	39
รูปที่ 21(1) แสดงการเกิดคลื่นฮอยเกนส์ เนื่องจากลำแสง Extraordinary สำหรับผลึกประเภท Uniaxial negative	40
รูปที่ 21(2) แสดงทิศของ S และ k สำหรับลำแสง extraordinary	40
รูปที่ 22 แสดงค่าดัชนีหักเหของผลึกควอตซ์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ณ อุณหภูมิ 18°	41
รูปที่ 23 แสดงปริซึม Glan-air	42
รูปที่ 24 แสดงปริซึมที่ที่ทำให้เกิดแสงโพลาไรซ์แบบต่างๆ	42
รูปที่ 25 แสดงการสะท้อนของแสงที่ผิวไดอิเล็กตริก	43
รูปที่ 26 แสดงโพลาไรเซอร์ที่ซ้อนกันหลายๆ ชั้น	45
รูปที่ 27 แสดงหลักการของหน้าต่างบรีวสเตอร์	46
รูปที่ 28 อุปกรณ์แหล่งกำเนิดแสง He Ne Laser	47
รูปที่ 29 อุปกรณ์ Polarizing prism	48
รูปที่ 30 อุปกรณ์ Quarter wave plate compensator	48
รูปที่ 31 อุปกรณ์ Photo detector	49
รูปที่ 32 แผนภาพของการจัดวางอุปกรณ์ของเครื่อง Ellipsometer	50
รูปที่ 33 เครื่อง Ellipsometer ที่สร้างขึ้นในโรงงานพิเศษ	51
รูปที่ 34 แสดงการ Alignment เครื่อง Ellipsometer	53
รูปที่ 35 แสดงการวัดแบบปรับมุมตกกระทบของเครื่อง Ellipsometer	53
รูปที่ 36 กราฟผลการทดลอง Alignment	55
รูปที่ 37 กราฟผลการทดลองหาแนวโน้มค่าความเข้มแสงต่ำสุดที่มุมตกกระทบ 35°	57
รูปที่ 38 กราฟผลการทดลองหาค่าความเข้มแสงที่มีค่าน้อยที่สุดที่มุมตกกระทบ 35°	59
รูปที่ 39 กราฟผลการทดลองหาแนวโน้มค่าความเข้มแสงต่ำสุดที่มุมตกกระทบ 45°	62
รูปที่ 40 กราฟผลการทดลองหาค่าความเข้มแสงที่มีค่าน้อยที่สุดที่มุมตกกระทบ 45°	64
รูปที่ 41 กราฟผลการทดลองหาแนวโน้มค่าความเข้มแสงต่ำสุดที่มุมตกกระทบ 55°	67
รูปที่ 42 กราฟผลการทดลองหาค่าความเข้มแสงที่มีค่าน้อยที่สุดที่มุมตกกระทบ 55°	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 43 กราฟผลการทดลองหาแนวโน้มค่าความเข้มแสงต่ำสุดที่มุมตกกระทบ 65°	72
รูปที่ 44 กราฟผลการทดลองหาค่าความเข้มแสงที่มีค่าน้อยที่สุดที่มุมตกกระทบ 65°	74



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

เทคโนโลยีฟิล์มบางได้ก้าวเข้ามามีบทบาทอย่างมากในการพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆ ทั้งทางด้านอิเล็กทรอนิกส์, ออปติกส์, ระบบแสดงผล, ระบบการสื่อสารทางแสง เพื่อให้อุปกรณ์ต่างๆ เหล่านี้มีประสิทธิภาพสูงและมีขนาดเล็กและช่วยในการประหยัดพลังงาน อาทิ เช่น การเคลือบฟิล์ม ITO เพื่อเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ การเคลือบฟิล์ม AR และ Interference filter ในระบบ WDM และ DWDM ของระบบการสื่อสารแบบเส้นใยนำแสงเพื่อทำให้มีการทำงานรวดเร็วและถูกต้องแม่นยำในการคัดแยกสัญญาณข้อมูลที่มีจำนวนมากและมีอัตราเร็วสูง หรือแม้กระทั่งการสร้าง semiconductor film สำหรับการสร้าง CPU, DRAM เป็นต้น การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางจึงมีส่วนสำคัญในการพัฒนาอุปกรณ์ และการที่จะวัดค่าคงที่ทางแสงได้อย่างถูกต้องนั้นปัจจุบันเรานิยมใช้วิธีการวิเคราะห์ฟิล์มบางด้วยวิธี Ellipsometry เนื่องจากเป็นวิธีการวัดเชิงแสงเพื่อหาค่าคุณสมบัติของฟิล์มบางแบบไม่ทำลายและรวดเร็ว

ในโครงการนี้จะทำการศึกษาระบบ Ellipsometer เบื้องต้นที่ใช้ความยาวคลื่นเดียวเหมาะสำหรับการใช้งานในเชิงการผลิตเพราะรวดเร็วและมีความยุ่งยากน้อยกว่า เพื่อเป็นพื้นฐานการพัฒนา Ellipsometer ที่มีความยุ่งยากซับซ้อนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาหลักการพื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ Ellipsometer
- 2) เพื่อทำการจัดสร้างเครื่อง Ellipsometer อย่างง่ายสำหรับการทดลองวัดหาค่าคุณสมบัติทางแสงของตัวอย่างมาตรฐานที่ทราบค่าคงที่ทางแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) สร้างเครื่อง Ellipsometer ความยาวคลื่นเดียวชนิดปรับมุมได้
- 2) ทำการทดสอบระบบเพื่อเปรียบเทียบกับค่าคงที่ทางแสงของตัวอย่างที่ทราบค่า
- 3) เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของค่าที่วัดได้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ

- 1) ทำการศึกษาหลักการของระบบ Ellipsometer ความยาวคลื่นเดียว
- 2) สร้างเครื่อง Ellipsometer ความยาวคลื่นเดียว
- 3) ทำการวัดหาค่าดัชนีหักเหของตัวอย่างที่ทราบค่าดัชนีหักเห
- 4) สรุปผลที่ได้และวิเคราะห์ว่าถูกต้องหรือผิดพลาดอย่างไร

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) รู้หลักการพื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ในการทดลองและระบบ Ellipsometer
- 2) สามารถสร้างเครื่อง Ellipsometer ความยาวคลื่นเดียวชนิดปรับมุมได้
- 3) สามารถใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้นมาใช้ในการหาค่าดัชนีหักเหของตัวอย่างได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

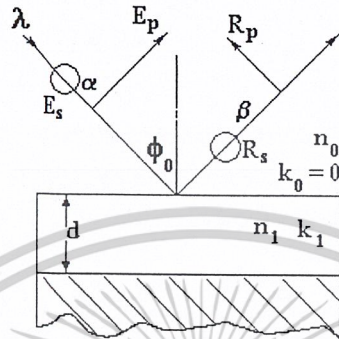
2.1 ระบบการวัด Ellipsometry

Ellipsometry เป็นเทคนิคทางแสงที่ใช้หาคุณลักษณะของผิวหน้าและฟิล์มบาง ถ้าทำการปรับแสง linearly polarized ให้ทำมุมตกกระทบที่ไม่ใช่มุมฉากกับผิวหน้าฟิล์มบาง แล้วแสงที่สะท้อนจะออกมาเป็นแสง elliptically polarized โดยรูปร่างและทิศทางขึ้นอยู่กับมุมของการตกสะท้อน, การปรับ polarization ของแสง และคุณสมบัติการสะท้อนของผิวหน้าฟิล์มบาง เราสามารถวัดแสง polarization ที่สะท้อนกลับออกมาด้วย quarter-wave plate และตามด้วย analyzer โดยทำการปรับ quarter-wave plate และ analyzer เป็นมุมต่างๆ จนกระทั่งไม่มีแสงส่องผ่านจาก analyzer จากการปรับ quarter-wave plate, analyzer และทิศทางของแสงที่ทำมุมตกกระทบของแสง polarization เราสามารถคำนวณความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงเฟส(Δ)และความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสง(ψ) ได้โดยการวิเคราะห์แสง polarization ที่สะท้อนกลับออกมาจากผิวหน้าฟิล์ม

เครื่อง Ellipsometer ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงสถานะ polarization ของแสงที่สะท้อนกลับออกมาจากตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์, สำหรับฟิล์มบางตัวอย่างจะได้รับการเปลี่ยนแปลงบนความหนาผิวหน้า, ถ้าแสงที่ตกกระทบบนตัวอย่างได้รับการเปลี่ยนแปลงแล้วคุณสมบัติการสะท้อนจะเปลี่ยนแปลงด้วยเหมือนกัน การวัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการสะท้อนจะใช้การอนุมานจากการเปลี่ยนแปลงตามความจริงในความหนาของฟิล์ม

ความสำคัญของการประยุกต์ใช้ Ellipsometry คือเพื่อศึกษาฟิล์มบางด้วยวิธีวิเคราะห์แบบ Ellipsometry โดยฟิล์มบางที่มีระยะความหนาจาก 0 – 1000 Å สามารถถูกขยายออกในบางกรณี ถ้าฟิล์มบางหนาเพียงพอที่จะแสดงการแทรกแซงที่มีสีแล้วบางที่มันจะเป็นตัวอย่างที่ดีต่อระบบการวัดแบบ Ellipsometry ที่ง่ายต่อการตรวจสอบ

2.2 The fundamental equation of classical Ellipsometry



รูปที่ 1 การสะท้อนของแสงที่ตกกระทบบนฟิล์มบาง

เราจะอธิบายสมการที่มีความสัมพันธ์กับแอมพลิจูดและเฟสของแสงที่ตกกระทบบนและสะท้อนจากฟิล์มบางซึ่งเรียกว่าค่า Parameters ของระบบวัด Ellipsometry เพื่อหาดัชนีหักเหเชิงซ้อน (complex reflective index) และความหนาของฟิล์มบาง สมการนี้เรียกว่าเป็น Fundamental Equation of Ellipsometry เพื่ออธิบายสมการนี้ จากรูปที่ 1 ในภาพ E_p และ E_s เป็นสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบบนโดยแนว p ขนานกับระนาบตกกระทบบน และ แนว s ตั้งฉากกับระนาบตกกระทบบน ดังนั้น R_p และ R_s เป็นสนามไฟฟ้าที่สะท้อนกลับออกมา เราเขียนสมการที่สอดคล้องกับแสงตกกระทบบนได้เป็น

$$E_p = E_{0p} e^{i\alpha_p} \quad (1a)$$

$$E_s = E_{0s} e^{i\alpha_s} \quad (1b)$$

และสมการของแสงที่สะท้อนกลับได้เป็น

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

$$R_s = R_{0s} e^{i\alpha_s} \quad (2b)$$

ในสมการ(1)และ(2) เราสามารถแสดงการวัด $R_{p/s}$ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ $E_{p/s}$ และสำหรับค่าดูดกลืนทางแสงของวัสดุที่ทำกับแสงที่ตกกระทบบนแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส เราอธิบายพฤติกรรมนี้โดยนำค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนเชิงซ้อน ρ_p และ ρ_s ได้เป็น

$$R_p = \rho_p E_p \quad (3a)$$

$$R_s = \rho_s E_s \quad (3b)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือในรูปทั่วไป

$$\rho_m = \frac{R_m}{E_m} \quad \text{เมื่อ } m = p, s \quad (4)$$

แทนสมการ (1) และ (2) ใน (4) แล้วได้

$$\rho_m = \left(\frac{R_{0m}}{E_{0m}} \right) e^{i(\beta_m - \alpha_m)} \quad (5)$$

จากสมการ (5) เราสามารถกำหนดขอบเขตของ “Normalized” reflection coefficient ρ

$$\rho = \frac{\rho_p}{\rho_s} = \left(\frac{R_{0p}/E_{0p}}{R_{0s}/E_{0s}} \right) e^{i(\beta - \alpha)} \quad (6)$$

ที่ $\alpha = \alpha_p - \alpha_s$ และ $\beta = \beta_p - \beta_s$ ค่า β และ α สามารถอธิบายจากเฟสก่อนและหลังการสะท้อนที่สอดคล้องกัน

จากที่กล่าวมาเราสามารถเขียนในเทอมของ Tangent ของมุม ψ

$$\tan \psi = \frac{R_{0p}/E_{0p}}{R_{0s}/E_{0s}} \quad (7a)$$

และมุมเฟส Δ

$$\Delta = \beta - \alpha = (\beta_p - \beta_s) - (\alpha_p - \alpha_s) \quad (7b)$$

จากสมการ(7)เราสามารถเขียนสมการ(6) ได้เป็น

$$\rho = \tan \psi e^{i\Delta} \quad (8)$$

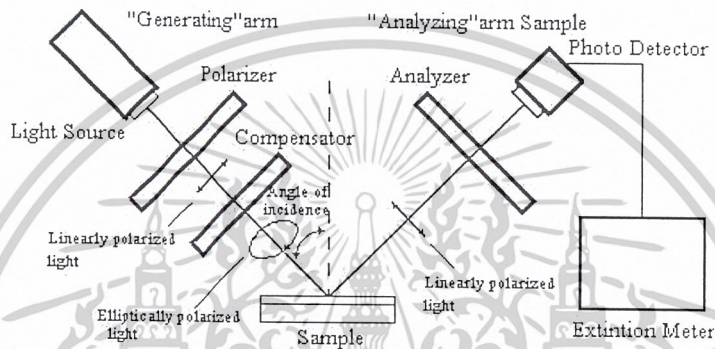
ด้วยเหตุนี้ Ellipsometry เป็นการวัดที่ยุ่งยากของ $\tan \psi$ (การเปลี่ยนแปลงใน Amplitude ratio) และ Δ (การเปลี่ยนแปลงในเฟส) ค่า ψ และ Δ เป็นฟังก์ชันของค่าคงที่ทางแสงของวัสดุ อาจกล่าวได้ว่าสมการที่ (8) เป็น

$$\rho = \tan \psi e^{i\Delta} = f(n, k, d) \quad (9)$$

สมการที่ (9) เรียกว่า *The Fundamental Equation of Ellipsometry*

2.3 The classical measurement of the ellipsometric parameter PSI (ψ) and DELTA (Δ)

เราจะอธิบายการวัดค่า parameters PSI (ψ) และ Delta (Δ) ในฟังก์ชันของระบบการวัด Ellipsometric ซึ่งทำได้โดยการให้แสงส่องผ่าน Polarizer และ Compensator ก่อนทำมุมตกกระทบกับผิวหน้าตัวอย่างและสะท้อนกลับผ่าน Polarizer (Analyzer) ปัจจัยในการวิเคราะห์คือความสัมพันธ์ของการปรับมุม Polarizer และ Compensator เพื่อหา ψ และ Δ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ชุดทดลองของการวัดค่า ψ และ Δ ของตัวอย่างที่มีคุณสมบัติทางแสง

ให้เราตั้งสมมุติฐานของระบบการวัด Ellipsometric ที่เหมือนกันก่อนคือให้สมมุติระบบเป็น ideal polarizer และ ideal compensator ในฝั่งด้าน “generating” arm และ ideal polarizer ในฝั่งด้าน “analyzing” arm ให้แกนส่งผ่านของ polarizer เป็น P และ A ตามลำดับ ตัว compensator ใช้เป็นตัวพิจารณาการดูดกลืนเพียงเล็กน้อยของตัวอย่าง และให้แกน fast axis ที่ทำมุมเป็น C สอดคล้องกับที่ตกกระทบที่เกิดจากการปรับมุม polarizer คือสมมุติฐาน ที่เป็น horizontally polarized ด้วยหน่วยแอมพลิจูด เราใช้ Jone’s matrix ในการช่วยคำนวณเพื่อให้ได้ค่าที่ออกมาดังต่อไปนี้

The Jone’s vector สำหรับแสงที่ตกกระทบเป็น

$$J_{inc} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

The Jones's matrix ของการหมุน linear polarizer เป็น

$$J_{pol} = \begin{pmatrix} \cos P & -\sin P \\ \sin P & \cos P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos P & \sin P \\ -\sin P & \cos P \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$= \begin{pmatrix} \cos^2 P & \sin P \cos P \\ \sin P \cos P & \sin^2 P \end{pmatrix}$$

คูณ matrix สมการ (10) ด้วย (11) แล้วได้เป็น

$$J = \cos P \begin{pmatrix} \cos P \\ \sin P \end{pmatrix} \quad (12)$$

เทอมของ $\cos P$ คือ amplitude factor ซึ่งสามารถตัดทิ้งไม่พิจารณาได้ ดังนั้น The Jones's vector ของแสงตกกระทบบน compensator เป็น

$$J = \begin{pmatrix} \cos P \\ \sin P \end{pmatrix} \quad (13)$$

The Jones's matrix สำหรับ ideal compensator เป็น

$$J_{comp} = \begin{pmatrix} e^{i\phi_x} & 0 \\ 0 & e^{i\phi_y} \end{pmatrix} \quad (14)$$

ถ้าเป็นการดูคลื่นของแสงแต่ละแกนด้วยเหมือนกัน แล้ว The Jones's matrix (14) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$J_{comp} = \begin{pmatrix} a_x e^{i\phi_x} & 0 \\ 0 & a_y e^{i\phi_y} \end{pmatrix} \quad (15)$$

ที่ $0 \leq a_{x,y} \leq 1$ เราสามารถเขียนสมการ (15) เป็น

$$J_{comp} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & a_c \end{pmatrix} \quad (16)$$

ที่ $a_c = (a_y/a_x) \exp(i\phi)$ และ $\phi = \phi_y - \phi_x$, a_c เรียกว่าค่า absorption ratio ของตัว compensator

The Jones's matrix ของ compensator กับ การหมุน fast axis เป็นมุม C คือ

$$J_{comp} = \begin{pmatrix} \cos C & -\sin C \\ \sin C & \cos C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & a_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos C & \sin C \\ -\sin C & \cos C \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$= \begin{pmatrix} \cos^2 C + a_c \sin^2 C & (1 - a_c) \sin C \cos C \\ (1 - a_c) \sin C \cos C & \sin^2 C + a_c \cos^2 C \end{pmatrix}$$

คูณ matrix สมการ (15) ด้วย (17) The Jones's vector ของแสงตกกระทบบนตัวอย่างที่มีคุณสมบัติทางแสงคือ

$$J = \begin{pmatrix} \cos C \cos(C - P) + a_c \sin C \sin(C - P) \\ \sin C \cos(C - P) - a_c \cos C \sin(C - P) \end{pmatrix} \quad (18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราใช้การอ้างอิง The Jones' matrix ของตัวอย่างที่มีคุณสมบัติทางแสงโดยอธิบายถึงแสงที่สะท้อนออกมา มีความสัมพันธ์กับแสงที่ตกกระทบโดย

$$R_p = \rho_p E_p \quad (19a)$$

$$R_s = \rho_s E_s \quad (19b)$$

ที่ ρ_p และ ρ_s เป็นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนเชิงซ้อน สำหรับแสงแนวขนานและตั้งฉากที่สอดคล้องกัน The Jones' matrix ของตัวอย่าง จากสมการ (19) เขียนใหม่เป็น

$$J_{\text{samp}} = \begin{pmatrix} \rho_p & 0 \\ 0 & \rho_s \end{pmatrix} \quad (20)$$

ค่า ρ ในสมการ (19) หาได้โดย

$$\rho = \frac{\rho_p}{\rho_s} \quad (21)$$

ดังนั้นจาก (20) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$J_{\text{samp}} = \begin{pmatrix} \rho & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (22)$$

เรากำจัดค่า factor ρ ออกเพราะช่วยลดตัวแปรในการหาสมการสุดท้าย ซึ่งก็คือค่า ratio

The Jones' matrix ของแสงที่ตกกระทบบนตัว analyzing polarizer เป็นการคูณ matrix สมการ (18) ด้วย (22) เขียนได้เป็น

$$J = \begin{pmatrix} \rho[\cos C \cos(C - P) + a_c \sin C \sin(C - P)] \\ \sin C \cos(C - P) - a_c \cos C \sin(C - P) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (23)$$

สมการที่ (23) แสดงแสงที่สะท้อนเป็น elliptically polarized อย่างไรก็ตาม ถ้า C , P และ a_c เป็นการปรับจนกระทั่งได้แสงสะท้อนออกมาเป็น linearly polarized แล้ว มุม azimuthal γ ของแสง linearly polarized เป็น

$$\tan \gamma = \frac{E_y}{E_x} = \frac{\sin C \cos(C - P) - a_c \sin C \sin(C - P)}{\rho[\cos C \cos(C - P) + a_c \sin C \sin(C - P)]} \quad (24)$$

แสง linearly polarized ในสมการ (24) เป็นการวิเคราะห์โดย analyzer เราทราบว่าถ้า analyzer หมุนเป็นมุม 90° จาก γ เราจะได้ค่า null-intensity ดังนั้น เราจะได้

$$A = \gamma + 90^\circ \quad (25a)$$

หรือ

$$\gamma = A - 90^\circ \quad (25b)$$

คูณด้วย tangent ทั้งสองข้างแล้วจะได้ว่า

$$\tan \gamma = \frac{-1}{\tan A} \quad (26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก้สมการที่ (24) เพื่อหา ρ โดยใช้สมการ (26) จะได้เป็น

$$\rho = \frac{\tan A [\tan C + a_c \tan(P - C)]}{a_c \tan C \tan(P - C) - 1} \quad (27)$$

สมการ (27) ทำให้สามารถหาค่า ρ ได้จากค่า A, C, P และ a_c ยกตัวอย่างสมการ (27) สมมุติว่าเราใช้ perfect quarter-wave plate ดังนั้น $a_c = i(\sqrt{-1})$ นอกจากนี้สมมุติว่า P ที่ได้จากการวัดเป็น 60° , $C=30^\circ$ และ $A=45^\circ$ นำค่าเหล่านี้ไปแทนในสมการ (27) เราจะได้

$$\rho = \frac{-\sqrt{3} - i2\sqrt{3}}{5} \quad (28)$$

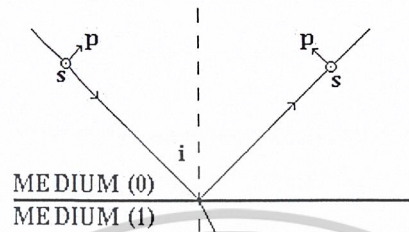
ให้สมการ (28) เท่ากับ (9) เราจะได้

$$\psi = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{5}}\right) = 37.7614^\circ \quad (29a)$$

$$\Delta = \tan^{-1}(2) = 63.4349^\circ \quad (29b)$$



จาก Fresnel's equation



รูปที่ 3 การหักเหและการสะท้อนของคลื่นระนาบที่ระนาบตกกระทบบนระหว่างตัวกลางต่างชนิดกัน

เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$r_p = \frac{n_2 \cos i - n_1 \cos r}{n_2 \cos i + n_1 \cos r} \quad (30a)$$

$$r_s = \frac{n_1 \cos i - n_2 \cos r}{n_1 \cos i + n_2 \cos r} \quad (30b)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนเชิงซ้อน ρ ที่ทำได้เป็น

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} \quad (31)$$

แทนสมการ (30) ลงใน (31) จะได้

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \frac{x \cos i - \cos r}{x \cos i + \cos r} \frac{\cos i + x \cos r}{\cos i - x \cos r} \quad (32)$$

ที่ $x = n_2/n_1$ เราสามารถกำจัดเทอมของมุมหักเหออกไปได้จากสมการ (32) โดยจาก Snell's Law ซึ่งมีอยู่ว่า

$$\sin r = \frac{\sin i}{x} \quad (33)$$

ดังนั้นสมการที่ (32) เขียนได้ใหม่เป็น

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \frac{x^2 \cos i - \sqrt{x^2 - \sin^2 i} \cos i + \sqrt{x^2 - \sin^2 i}}{x^2 \cos i + \sqrt{x^2 - \sin^2 i} \cos i - \sqrt{x^2 - \sin^2 i}} \quad (34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรากำหนดให้

$$a = \cos i \quad \text{และ} \quad b = \sqrt{x^2 - \sin^2 i} \quad (35)$$

จากสมการ (34) กลายเป็น

$$\rho = \frac{U+V}{U-V} \quad (36a)$$

ที่

$$U = a^2 x^2 - b^2 \quad (36b)$$

$$V = ab(1 - x^2) \quad (36c)$$

กำหนด $f=UV$ เราใช้สมการ (36b) และ (36c) แก้สมการหาค่า x^2 ได้

$$x^2 = \sin^2 i \left[1 + \frac{\tan^2 i}{f^2} \right] \quad (37)$$

สมการ (35) สามารถแก้หา ρ ได้

$$f = \frac{1+\rho}{1-\rho} \quad (38)$$

จากสมการ (33), (38) และ (37) สุดท้ายจะได้เป็น

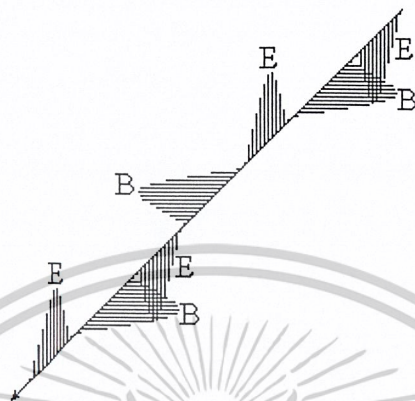
$$\frac{n_2}{n_1} = \sin i \left[1 + \left(\frac{1-\rho}{1+\rho} \right)^2 \tan^2 i \right]^{\frac{1}{2}} \quad (39)$$

สามารถเขียนในรูปของ $\tan i$ ได้ดังนี้

$$\frac{n_2}{n_1} = \tan i \left[1 + \frac{4\rho}{(1+\rho)^2} \sin^2 i \right]^{\frac{1}{2}} \quad (40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 โพลาริเซชัน (Polarization)

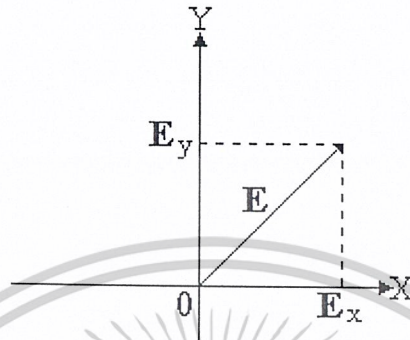


รูปที่ 4 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโพลาไรซ์ระนาบ

แสงที่เป็นคลื่นระนาบ และมีทิศของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงหรือสั่นในแนวคงที่แนวหนึ่งเรียกว่าเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น หรือมีสมบัติโพลาไรซ์เชิงเส้น (linearly polarized light) สำหรับสนามแม่เหล็กซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงหรือสั่นในแนวที่ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกับสนามไฟฟ้า กล่าวคือมีการสั่นในแนวคงที่แนวหนึ่งเป็นแนวที่ตั้งฉากกับแนวของสนามไฟฟ้าและจะได้ทิศทางของ $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ เป็นทิศเดียวกับการเคลื่อนที่ของคลื่น ดังรูปที่ 4

สมบัติทางโพลาไรเซชันของแสงมีความเกี่ยวข้องอย่างมากกับการเป็นคลื่นตามขวาง (Transverse wave) จึงอาจกล่าวได้ว่าโพลาไรเซชันของแสงเป็นการพิสูจน์ว่าแสงเป็นคลื่นตามขวาง

2.4.1 Jones Vector



รูปที่ 5 แสดงสนามไฟฟ้า ณ เวลาหนึ่ง โดยแสงเคลื่อนที่ในแนว +Z

Jones Vector เป็นตัวแทนเชิงคณิตศาสตร์ของแสงโพลาไรซ์ กล่าวคือพิจารณาให้แสงลำหนึ่งเคลื่อนที่ตั้งฉากกับระนาบของกระดาษและอยู่ที่จุดกำเนิดระบบแกน ดังรูปที่ 5 ให้ E แทนขนาดและทิศทางของสนามไฟฟ้าของแสงดังกล่าว ณ เวลาหนึ่ง ขนาดของสนามไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาและมีทิศทางกลับทิศทุกๆครึ่งรอบของการสั่น ให้ E_x และ E_y แทนองค์ประกอบของ E ดังนั้นเราเขียนสนามไฟฟ้า E ในรูปแบบ Unit vectors i และ j ได้

$$E = E_x i + E_y j \quad (41)$$

ถ้าให้

$$E_x = E_{0x} e^{i(kz - \omega t + \phi_x)} \quad (42)$$

และ

$$E_y = E_{0y} e^{i(kz - \omega t + \phi_y)} \quad (43)$$

เมื่อ E_x และ E_y ต่างก็เคลื่อนที่ในทิศ +Z และมีแอมพลิจูด E_{0x} และ E_{0y} กับเฟส ϕ_x และ ϕ_y ตามลำดับ

แทนค่า E_x และ E_y ลงในสมการ (41) จะได้

$$\begin{aligned} E &= (E_{0x} e^{i(kz - \omega t + \phi_x)}) i + (E_{0y} e^{i(kz - \omega t + \phi_y)}) j \\ E &= [(E_{0x} e^{i\phi_x}) i + (E_{0y} e^{i\phi_y}) j] e^{i(kz - \omega t)} \\ E &= \tilde{E}_0 e^{i(kz - \omega t)} \end{aligned} \quad (44)$$

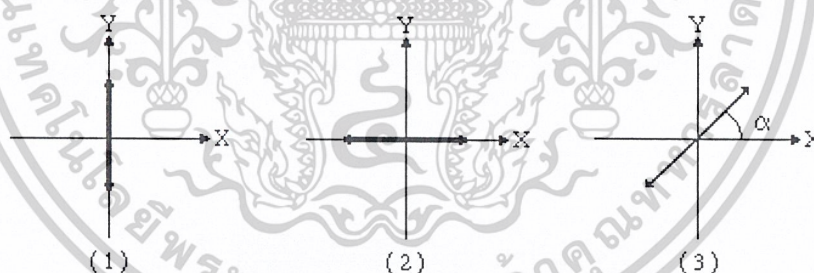
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\tilde{E}_0 เป็นแอมพลิจูดเชิงซ้อน (complex amplitude) ของแสงโพลาไรซ์ มีองค์ประกอบของคลื่นทั้งแกน X และ Y อยู่ด้วยกัน สถานะทางโพลาไรเซชันของแสงจะถูกกำหนดด้วยความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดและเฟสขององค์ประกอบนี้ ดังนั้นสถานะทางโพลาไรเซชัน จึงพิจารณาเฉพาะแอมพลิจูดเชิงซ้อน และนำมาเขียนเป็นเมทริกซ์หรือ Jones vector ดังนี้

$$\tilde{E}_0 = \begin{vmatrix} \tilde{E}_{0x} \\ \tilde{E}_{0y} \end{vmatrix} \quad (45)$$

$$\tilde{E}_0 = \begin{vmatrix} \tilde{E}_{0x} e^{i\phi_x} \\ \tilde{E}_{0y} e^{i\phi_y} \end{vmatrix}$$

พิจารณารูปแบบของ Jones vectors ที่ใช้แทนสถานะของโพลาไรเซชันเชิงเส้น, เชิงวงกลม, เชิงวงรี โดยพิจารณาประกอบกับรูปที่ 6 ในรูปนี้แสงเคลื่อนที่ในทิศ +Z สำหรับรูปที่ 6(1) เป็นการแสดงโพลาไรซ์เชิงเส้นในแนวตั้ง มีสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดตามฟังก์ชัน Sine ในแนวแกน Y เท่านั้น ในกรณีนี้จะได้ว่า ไม่มีแอมพลิจูดในแนวแกน X หรือ $E_{0x} = 0$ และแอมพลิจูดในแนวแกน Y มีค่า A หรือ $E_{0y} = A$



รูปที่ 6 แสดงสนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีการวางตัวของสนามไฟฟ้าในแนวต่างๆกันโดยแสงเคลื่อนที่ในแนว +Z

ถ้ากำหนดให้ $\phi_y = 0$ จะได้ Jones vectors สำหรับแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นในแนวตั้งเป็น

$$E_0 = \begin{vmatrix} 0 \\ A \end{vmatrix} = A \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่สนใจเฉพาะสถานะทางโพลาริเซชัน เราจะกำหนดให้ A มีสถานะเป็น 1 จะได้ Jones vector สำหรับแสงโพลาริเซชันในแนวตั้ง เป็น

$$E_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

เวกเตอร์ใหม่นี้คือ Normalized form ของเวกเตอร์เดิม

ในรูปที่ 6 (2) เป็นการแสดงโพลาริเซชันในแนวอนเราจะได้ว่า $E_{0y} = 0$ และ $E_{0x} = A$

สำหรับเวกเตอร์ $\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$ ใดๆจะเขียนใน Normalized form ได้ก็ต่อเมื่อ $|a|^2 + |b|^2 = 1$

กำหนดให้ $\varphi_x = 0$ จะได้ Jones vectors สำหรับแสงโพลาริเซชันในแนวอนเป็น

$$E_0 = \begin{bmatrix} A \\ 0 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

สำหรับรูปที่ 6 (3) แสดงโพลาริเซชันที่มีแนวการสั่นของสนามไฟฟ้า อยู่ในทิศที่ทำมุม α กับแกนราบ X ในกรณีนี้ E มีองค์ประกอบทั้งแกน X และ Y ถ้า $\alpha = 90^\circ$ แสงนี้จะเป็นแสงโพลาริเซชันในแนวตั้ง ถ้า $\alpha = 0^\circ$ จะเป็นแสงโพลาริเซชันในแนวอน องค์ประกอบทั้งสองของแสงนี้จะต้องมีเฟสที่ตรงกัน (ผ่านจุดกำเนิดลักษณะเดียวกัน การเพิ่มค่าสนามไฟฟ้าของทั้งสองแกนเท่ากัน และมีค่าสูงสุดเท่ากัน) ให้ φ_x และ φ_y มีค่าเท่ากับศูนย์ ถ้าสนามไฟฟ้า มีแอมพลิจูดเป็น A จะได้องค์ประกอบในแนวแกน X และ Y ดังนี้

$$E_{0x} = A \cos \alpha$$

$$E_{0y} = A \sin \alpha$$

ดังนั้น Jones vector สำหรับแสงโพลาริเซชันที่มีสนามไฟฟ้าสั่นในแนวที่ทำมุม α กับแนวราบคือ

$$\tilde{E}_0 = \begin{bmatrix} A \cos \alpha \\ A \sin \alpha \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (46)$$

สำหรับ Normalized form ของ Jones vector ในกรณีนี้จะมีค่า $A = 1$

สมการ (46) นี้ใช้แสดงแสงโพลาริเซชันในแนวตั้งและแนวราบถ้าแทนค่า α เป็น 90° และ 0° ตามลำดับ สำหรับ α ค่าอื่นๆ เช่น 60° จะได้ Jones vector เป็น

$$E_0 = \begin{bmatrix} A \cos 60^\circ \\ A \sin 60^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 \\ \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ \sqrt{3} \end{bmatrix}$$

ในทางกลับกันถ้าพิจารณาเวกเตอร์ใดๆ $\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$ โดยที่ a และ b เป็นเลขจริง(real number)

เราจะสามารถหามุมที่แนวของเวกเตอร์นี้ทำกับแนวราบได้เป็น

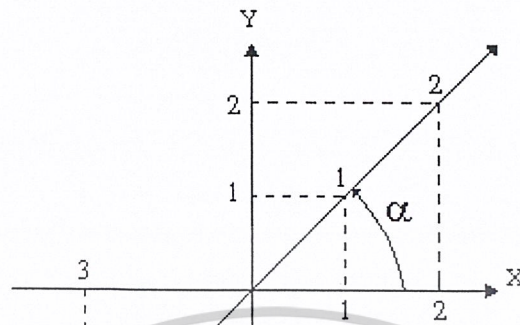
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a = \arctan \frac{E_{0x}}{E_{0y}} = \arctan \frac{b}{a} \quad (47)$$

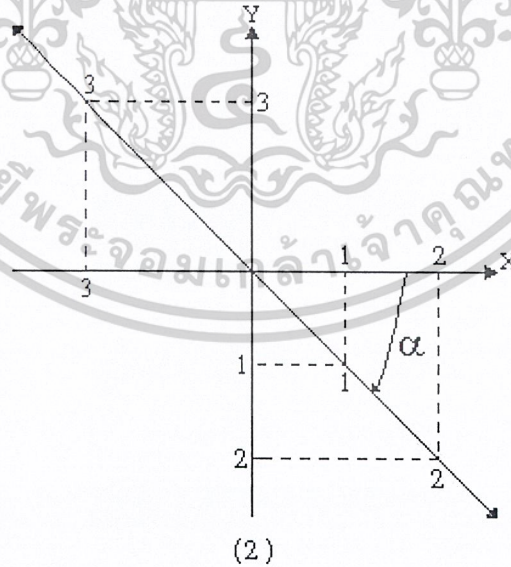
ในกรณีที่ a มีค่าเป็นลบ (วัดจากแกนบวกไปยัง quadrant ที่ 4 ดังรูปที่ 7(2) องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ในแนวแกน Y จะมีค่าลบเนื่องจาก $\sin(-\alpha)$ มีค่าเป็นลบ ส่วนองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ในแนวแกน X จะมีค่าบวกซึ่งหมายความว่าองค์ประกอบทั้งสองนี้มีเฟสต่างกัน 180° หรือมีเฟสตรงกันข้าม และได้ผลเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มี สนามไฟฟ้าสั่นใน quadrant ที่ 2 และ 4 และมีความชันเป็นค่าลบ ในรูปที่ 7(2) จะเห็นได้ว่า ในขณะที่สนามไฟฟ้าในแนวแกน X มีค่าเพิ่มขึ้นจากจุด origin ไปในทิศ +X สนามไฟฟ้าในแนวแกน Y จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากจุด origin ไปในทิศ -Y

กล่าวโดยสรุปได้ว่า Jones vector $\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$ ที่มี a และ b เป็นเลขจริงและไม่เป็นศูนย์เป็นเวกเตอร์ที่แทนแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีมุมเอียง (inclination angle หรือมุมที่แนวการสั่นของ E กับแนว +X) เป็น α ที่ $\arctan(b/a)$

การพิจารณาการสั่นของสนามไฟฟ้า ว่าประกอบด้วยการสั่นในแนวแกน X และ Y ดังที่กล่าวมาแล้วนั้นมีหลักการเดียวกับการหา Lissajous figures ดังเช่นในกรณีที่ผ่านมาพิจารณาเฉพาะกรณีที่เฟสของการสั่นในแนวแกน X และ Y ต่างกันเป็น 0° และ 180° ซึ่งได้ สนามไฟฟ้ากวาดในแนวเส้นตรง สำหรับกรณีอื่นๆ ที่เฟสมีค่าแตกต่างกันออกไปจาก 2 ค่านี้ จะได้สนามไฟฟ้ากวาดไปเป็นรูปวงรีแทน รูปที่ 7 สรุปลักษณะของ Lissajous figures ในกรณีที่ E_{0x} และ E_{0y} มีความต่างเฟส $\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x$ ค่าต่างๆกัน และ E_{0x} ไม่เท่ากับ E_{0y} ในบางกรณีการกวาดของสนามไฟฟ้ารวมอาจมีลักษณะเหมือนกัน แต่ต่างกันที่ทิศของการกวาด เช่นกรณี $\Delta\varphi$ เป็น 90° กับ 270° หรือกรณี $\Delta\varphi$ เป็น 135° กับ 225° เป็นต้น สำหรับกรณี $\Delta\varphi$ เป็น 90° กับ 270° นั้นถ้า E_{0x} เท่ากับ E_{0y} จะได้รูปวงกลมแทนวงรี

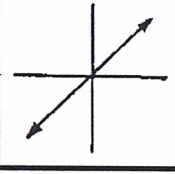
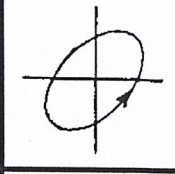
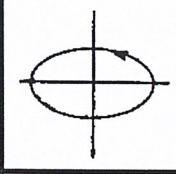
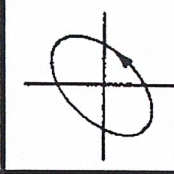
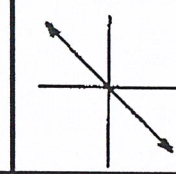
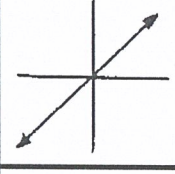
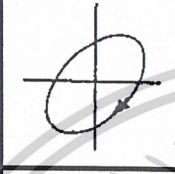
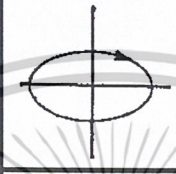

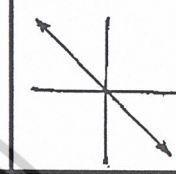


รูปที่ 7(1) สนามไฟฟ้าที่สั้นในแนวแกน X และ Y โดยมีเฟสตรงกันจะโคผลลัพท์เป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีสนามไฟฟ้าสั้นใน quadrant ที่ 1 และ 3



รูปที่ 7(2) สนามไฟฟ้าที่สั้นในแนวแกน X และ Y โดยมีเฟสตรงกันข้าม ให้ผลลัพท์เป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีสนามไฟฟ้าสั้นใน quadrant ที่ 2 และ 4

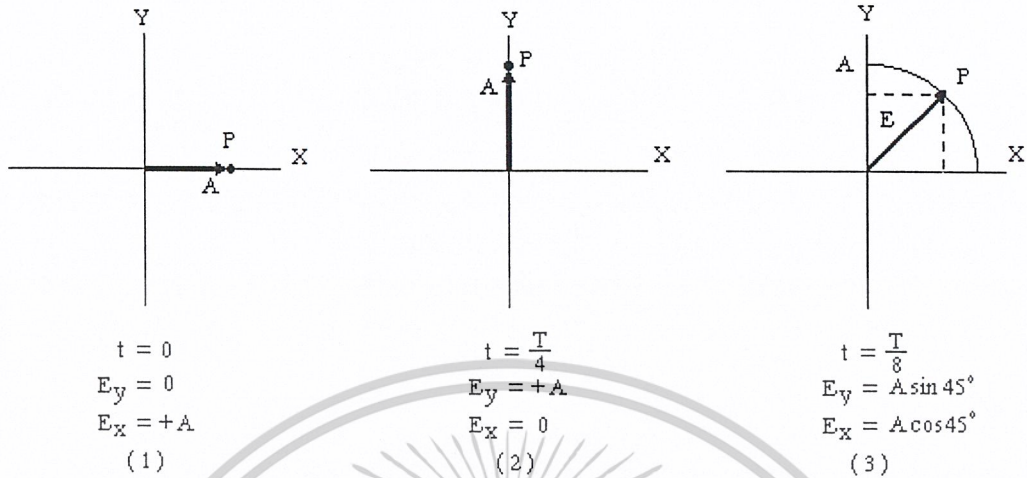
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

				
$\Delta\phi = 0^\circ$	$\Delta\phi = 45^\circ$	$\Delta\phi = 90^\circ$	$\Delta\phi = 135^\circ$	$\Delta\phi = 180^\circ$
				
$\Delta\phi = 360^\circ$	$\Delta\phi = \begin{cases} -45^\circ \\ 315^\circ \end{cases}$	$\Delta\phi = \begin{cases} -90^\circ \\ 270^\circ \end{cases}$	$\Delta\phi = \begin{cases} -135^\circ \\ 225^\circ \end{cases}$	$\Delta\phi = \pm 180^\circ$

รูปที่ 8 แสดง Lissajous figures สำหรับการสั่นในแนวแกน X และ Y ที่มีแอมพลิจูดไม่เท่ากัน และมีความต่างเฟส $\Delta\phi = \phi_y - \phi_x$ ค่าต่างๆ

สำหรับการหา Jones vector ที่แสดงสถานะทางโพลาไรเซชันชนิดวงกลมกับวงรีจะพิจารณาได้ดังนี้ ถ้า $E_{0x} = E_{0y} = A$ และ E_x นำ E_y อยู่ 90° แสดงว่าในขณะที่ E_x มีค่าสูงสุด A จะได้ว่า E_y มีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อเวลาผ่านไปอีก 1 ใน 4 ของคาบ E_x จะเป็นศูนย์ และ E_y มีค่าเป็น A หรือเมื่อเวลาผ่านไปเป็น 1 ใน 2 ของคาบ E_x จะเป็น A และ E_y มีค่าเป็นศูนย์ ในรูปที่ 9 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของ E_x และ E_y ในขณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 แสดง E รวมของกรณีที่ E ในแนวแกน X และ Y มีขนาดเท่ากันและมีเฟสต่างกัน 90° ที่เวลาต่างๆ และ E_x นำ E_y อยู่ 90° ในรูป (3) แสดงแนววงกลมที่ E รวมกวาดไป

จากค่า E_x และ E_y ในสมการ (42) และ (43) ร่วมกับเงื่อนไขที่ E_x นำ E_y อยู่ 90° นี้ทำให้ต้องกำหนด $\varphi_y > \varphi_x$ ทั้งนี้เนื่องจากการกำหนดเฟสของ E_x และ E_y ดังข้างต้น เทอมที่ขึ้นอยู่กัเวลามีค่าเป็นลบ พิจารณากรณี $Z=0$ และเลือก $\varphi_x = 0, \varphi_y = \epsilon$ ถ้าต้องการทำให้ $\varphi_y > \varphi_x$ จะได้สมการ (42) และ (43) ว่า

$$\begin{aligned}\tilde{E}_x &= E_{0x} e^{-i\omega t} \\ \tilde{E}_y &= E_{0y} e^{-i(\omega t - \epsilon)}\end{aligned}$$

เครื่องหมายลบที่อยู่หน้า ϵ ในค่าของ E_y แสดงว่า E_y ตาม E_x อยู่ ϵ ในกรณีที่ ϵ มีค่า 90° หรือ $\pi/2$ เรเดียน และ $E_{0x} = E_{0y} = A$ ถ้าพิจารณาส่วนที่เป็นเลขจริง (real parts) ของค่า \tilde{E}_x และ \tilde{E}_y จะได้

$$\begin{aligned}E_x &= A \cos \omega t \\ E_y &= A \cos(\omega t - \pi/2) = A \sin \omega t\end{aligned}$$

โดย

$$E^2 = E_x^2 + E_y^2 = A^2$$

ค่า E_x และ E_y นี้จะสอดคล้องกับรูปที่ 9 ในทุกกรณี เช่น

กรณีที่ $t=0$ จะได้ $E_x = A, E_y = 0$ ดังรูปที่ 9(1)

หรือกรณีที่ $t=T/8$ จะได้ $E_x = A \cos((2\pi/T)T/8) = A \cos \pi/4 = A/\sqrt{2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ $E_y = A \sin \pi/4$ หรือ $A/\sqrt{2}$ ดังรูปที่ 8(3)

การกวาดของสนามไฟฟ้ารวมจะให้ผลเป็นรูปวงกลม ที่มีรัศมี A และกวาดในทิศทวนเข็มนาฬิกา

ในกรณีที่สนามไฟฟ้าในแนวแกน X และ Y มีการสั้นด้วยแอมพลิจูดเท่ากัน $E_{0x} = E_{0y} = A$ และมีเฟสต่างกัน 90° โดยสนามไฟฟ้าในแนวแกน X นำสนามไฟฟ้าในแนวแกน Y เป็น $\varphi_y - \varphi_x = \pi/2$ จะได้สนามไฟฟ้ารวมกวาดเป็นแนวของวงกลมและเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงวงกลมในแบบทวนเข็มนาฬิกา จากสมการ (45) เขียน Jones vector ได้

$$\tilde{E} = \begin{vmatrix} E_{0x} e^{i\varphi_x} \\ E_{0y} e^{i\varphi_y} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A e^0 \\ A e^{i\pi/2} \end{vmatrix} = A \begin{vmatrix} 1 \\ i \end{vmatrix} \quad (48)$$

เนื่องจาก $1^2 + |i|^2 = 2$ ดังนั้น Normalized form ของ Jones vector สำหรับแสงโพลาไรซ์เชิงวงกลมแบบทวนเข็มนาฬิกา (left circularly polarized light) คือ

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 \\ i \end{vmatrix}$$

ในทำนองเดียวกัน ถ้า E_y นำ E_x อยู่ 90° และ $E_{0x} = E_{0y}$ จะได้สนามไฟฟ้ารวมกวาดเป็นแบบตามเข็มนาฬิกาหรือแบบวนขวา (right circularly polarized light) เขียน Jones vector จากสมการ (48) โดยแทน $\pi/2$ ด้วย $(-\pi/2)$ ได้ผลเป็น

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 \\ -i \end{vmatrix}$$

Jones vector ที่ใช้แทนแสงโพลาไรซ์เชิงวงกลมทั้ง 2 แบบมี element หนึ่งเป็นเลขจินตภาพ (imaginary) ที่มีขนาดเท่ากันคือ i กับ $-i$ การพิจารณา Jones vector ของแสงโพลาไรซ์เชิงวงกลมว่าเป็นแบบวนซ้ายหรือวนขวายำต้องหาค่า Normalized form ก่อนจึงสามารถสรุปได้

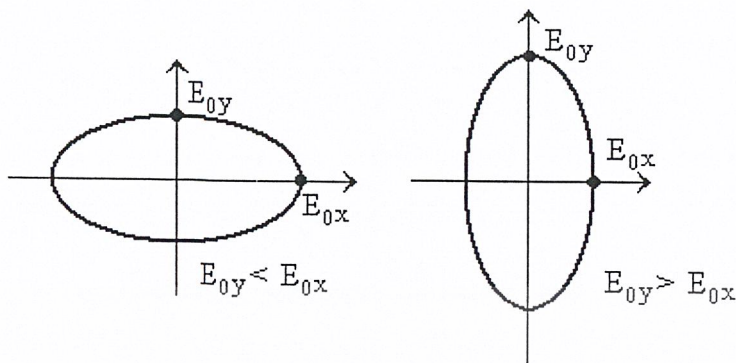
ถ้าพิจารณากรณีที่สนามไฟฟ้าในแนวแกน X และ Y ยังคงมีเฟสต่างกันอยู่ 90° เช่นเดิมแต่มีแอมพลิจูดต่างกัน เช่น $E_{0x} = A$ และ $E_{0y} = B$ เขียนสมการที่ (48) ใหม่ได้

$$\begin{vmatrix} A \\ iB \end{vmatrix} \text{ แทนการกวาดแบบทวนเข็มนาฬิกา}$$

$$\begin{vmatrix} A \\ -iB \end{vmatrix} \text{ แทนการกวาดแบบตามเข็มนาฬิกา}$$

การกวาดนี้จะให้ผลเป็นวงรีดังแสดงในภาพที่ 5 สำหรับกรณีที่ $\Delta\varphi = 90^\circ$ และ 270° (ในกรณีที่ E_x นำ E_y อยู่ 270° จะได้ผลเหมือนกรณีที่ E_y นำ E_x อยู่ 90°) วงรีที่ได้จะมี major axis อยู่ตามแนวแกน X หรือ Y จะขึ้นอยู่กับ E_{0x} มากหรือน้อยกว่า E_{0y} ดังรูปที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 แสดงโพลาริซิงรีในกรณี $\Delta\phi = 90^\circ$

E_y นำ E_x จะได้การกวาดเป็นแบบตามเข็มนาฬิกาหรือวนขวา

E_x นำ E_y จะได้การกวาดเป็นแบบทวนเข็มนาฬิกาหรือวนซ้าย

สรุปได้ว่า Jones vector ที่มีขนาดของ element ทั้ง 2 ตัวไม่เท่ากัน โดยตัวหนึ่งเป็นเลขจินตภาพเท่านั้น จะแทนแสงโพลาริซิงวงรี และ Normalized form จะเป็น

$$\frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}} \begin{bmatrix} A \\ iB \end{bmatrix}$$

ในกรณีของแสงโพลาริซิงวงรีที่มี Principal axes ทำมุมกับแนวแกน X หรือ Y นั้น จะเกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าในแนวแกน X และ Y มีเฟสต่างกันเป็นค่าที่ไม่ใช่ $m\pi$ (ซึ่งเป็นกรณีของแสงโพลาริซิงเส้น) และ $(m + 1/2)\pi$ (ซึ่งเป็นกรณีของแสงโพลาริซิงวงกลม และเชิงวงรีที่มี Principal axes ทำมุมกับแนวแกน X และ Y) โดยที่ m มีค่าเป็น $0, 1, 2, \dots$ เมื่อพิจารณากรณีที่ E_x นำ E_y ด้วยค่า ϵ หรือ $\phi_y - \phi_x = \epsilon$ โดยที่ให้ $\phi_x = 0, \phi_y = \epsilon$ และ $E_{0x} = A, E_{0y} = b$ จะได้ Jones vector เป็น

$$\tilde{E}_0 = \begin{bmatrix} E_{0x} e^{i\phi_x} \\ E_{0y} e^{i\phi_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ b e^{i\epsilon} \end{bmatrix}$$

เมื่อใช้ Euler's formula จะได้

$$b e^{i\epsilon} = b(\cos \epsilon + i \sin \epsilon) = B + iC$$

ดังนั้น

$$\tilde{E}_0 = \begin{bmatrix} A \\ B + iC \end{bmatrix} \quad (49)$$

Normalized form ของ \tilde{E}_0 มีค่าเป็น

$$\frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \begin{bmatrix} A \\ B + iC \end{bmatrix}$$

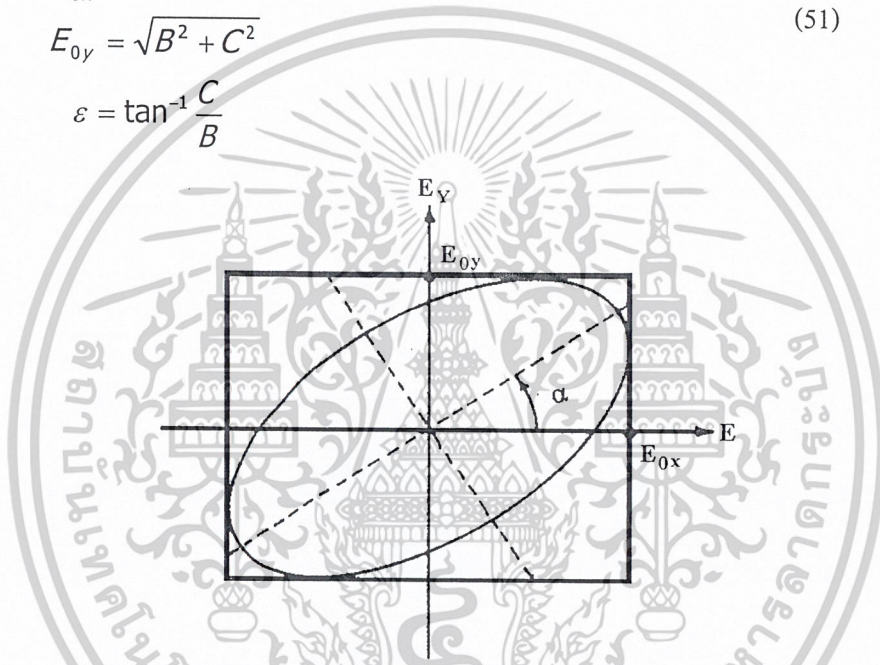
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการนี้ใช้ได้กับทุกกรณีที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด และในกรณีนี้ต้องการทราบค่ามุมที่ Principal axes ของวงรีกระทำกับแกน X หรือแกน Y จะหาได้โดยพิจารณาจากรูปที่ 11 ว่า ถ้า α เป็นมุมที่ major axes กระทำกับแกน X มุมนี้จะมีค่าตามสมการ

$$\tan^2 \alpha = \frac{2E_{0x}E_{0y} \cos \varepsilon}{(E_{0x})^2 - (E_{0y})^2} \quad (50)$$

ในสมการ (49) นี้ค่า A, B, C มีค่าที่เราทราบดังนี้

$$\begin{aligned} E_{0x} &= A \\ E_{0y} &= \sqrt{B^2 + C^2} \\ \varepsilon &= \tan^{-1} \frac{C}{B} \end{aligned} \quad (51)$$



รูปที่ 11 แสดงแสงโพลาไรซ์เชิงวงรีที่มี major axis ทำมุม α กับแนวแกน X

ดังนั้นถ้ามี Jones vector $\begin{vmatrix} 3 \\ 2+i \end{vmatrix}$

จะแสดงได้ว่าเวกเตอร์นี้ใช้แทนแสงโพลาไรซ์เชิงวงรีที่มี

$$E_{0x} = 3$$

$$E_{0y} = \sqrt{2^2 + 1^2} = \sqrt{5}$$

E_x นำ E_y ด้วยมุม ε ซึ่งมีค่าเป็น $\arctan \frac{1}{2} = 26.6^\circ$

มุม α ที่ major axis กระทำกับแกน X มีค่าเป็น

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{(2)(3)\sqrt{5} \cos(26.6^\circ)}{9 - 5} = 35.8^\circ$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากสมการของวงรีตามรูปที่ 10 จะมีค่าเป็น

$$\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)\cos \varepsilon = \sin^2 \varepsilon \quad (52)$$

สำหรับกรณีของ Jones vector ตามตัวอย่างข้างต้นจะได้ สมการของวงรีเป็น

$$\frac{E_y^2}{9} + \frac{E_x^2}{5} - 0.267E_xE_y = 0.2$$

Jones vector ตามสมการ (49) เป็นของกรณีที E_x นำ E_y อยู่ ε หรือ $\varphi_y - \varphi_x = \varepsilon$ ถ้าหากว่า หรือ $\varphi_y - \varphi_x = -\varepsilon$ หรือ E_y นำ E_x ด้วยค่า ε จะทำให้ได้ Jones vector เป็น

$$\tilde{E}_0 = \begin{vmatrix} A \\ B + iC \end{vmatrix}$$

ซึ่งการกวาดของแสงในกรณีนี้จะอยู่ในแบบวนขวา กรณีของสมการ (49) จะเป็นการกวาดแบบวนซ้าย

ประโยชน์ของ Jones vector คือเป็นการแสดงการรวมคลื่นแสงที่มีโพลาไรซ์เซชันชนิดต่างๆ เช่นถ้ารวมแสงโพลาไรซ์เชิงวงกลมแบบวนขวากับวนซ้ายที่มีแอมพลิจูดเท่ากัน จะได้

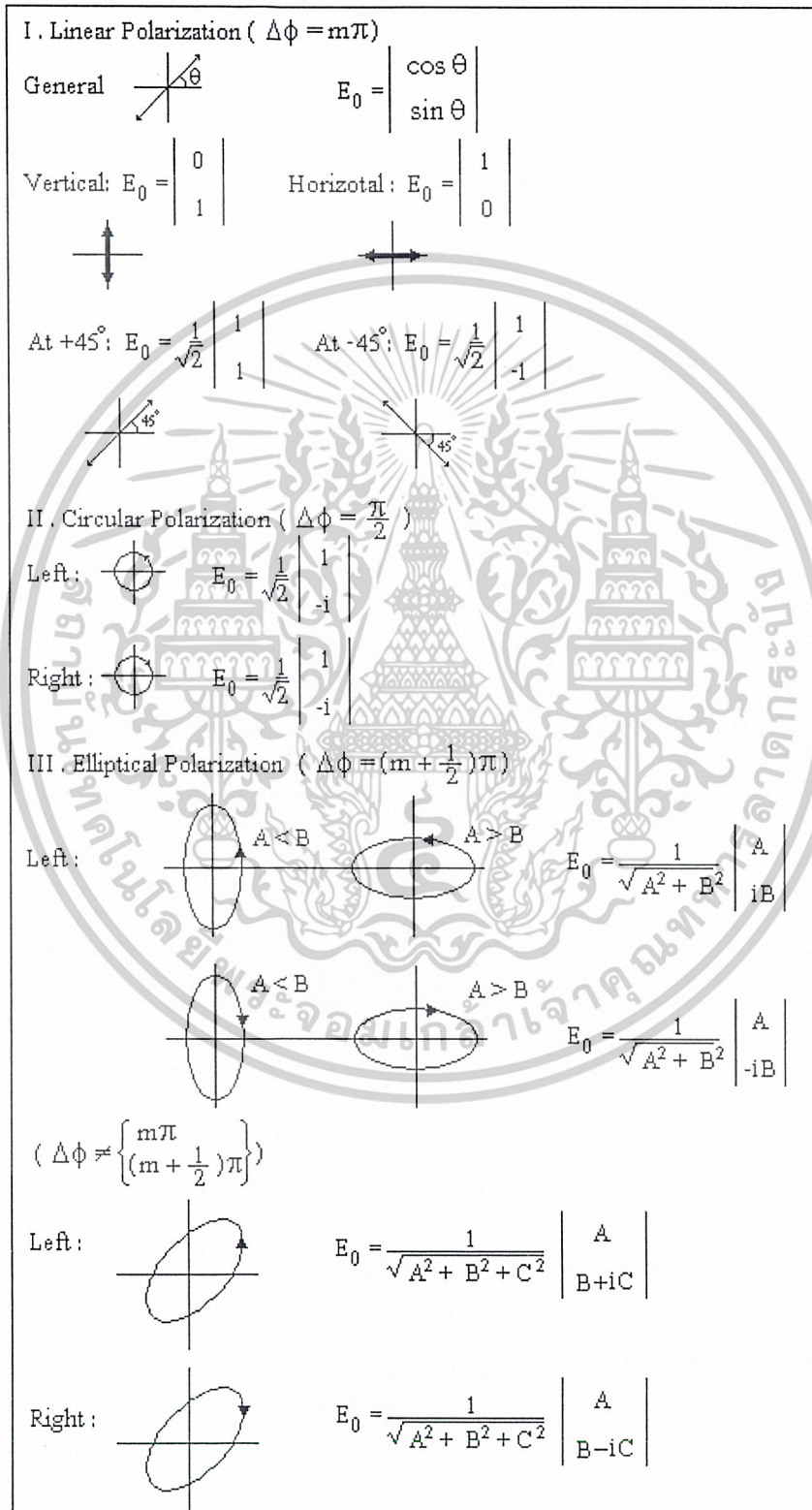
$$\begin{vmatrix} 1 \\ i \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 \\ -i \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1+i \\ 1-i \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2 \\ 0 \end{vmatrix} = 2 \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix}$$

ซึ่งแสดงว่าผลลัพธ์จะเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีสนามไฟฟ้าในแนวราบและแอมพลิจูดเป็น 2 หรือในกรณีที่มีแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีสนามไฟฟ้าในแนวตั้งกับแนวราบรวมกันจะได้

$$\begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \end{vmatrix}$$

ผลลัพธ์ที่ได้เป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีสนามไฟฟ้าในแนวทำมุม 45° กับแกน X สังเกตว่าการรวมแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นในแนวที่ตั้งฉากกันจะให้ผลลัพธ์เป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นอนึ่ง อาจมีการคาดหมายว่าผลลัพธ์นี้ควรจะเป็นแสงที่ไม่มีสมบัติทางโพลาไรเซชัน เนื่องจากเรานิยามแทนแสงที่ไม่มีโพลาไรซ์ด้วยการแยกออกเป็นสนามไฟฟ้าใน 2 แนวที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน อย่างไรก็ตาม Jones vector จะใช้แทนเฉพาะแสงโพลาไรซ์เท่านั้น ไม่มี Jones vector ที่แทนแสงไม่มีโพลาไรซ์

ตารางที่ 1 แสดง Jones vectors แบบต่างๆ



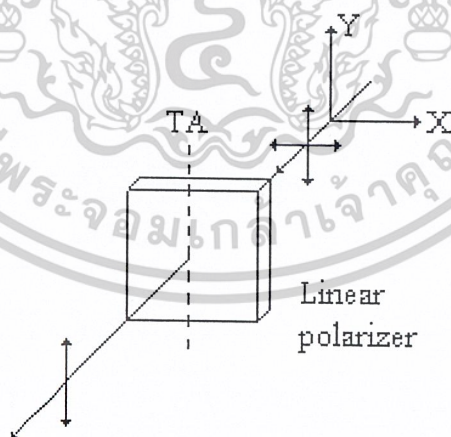
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 Jones matrices

Jones matrices เป็นตัวแทนเชิงคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดโพลาไรเซชันมีอุปกรณ์ทางแสงหลายชนิดที่ทำให้แสงที่ผ่านไป เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะทางโพลาไรเซชัน อุปกรณ์นี้เรียกว่า โพลาไรเซอร์ (Polarizer) แบ่งเป็น 3 ชนิดคือ

1) โพลาไรเซอร์เชิงเส้น (Linear polarizer)

อุปกรณ์ชนิดนี้จะให้สนามไฟฟ้าที่สั่นในทิศทางหนึ่งผ่านไปได้ แต่ไม่ยอมให้สนามไฟฟ้าที่สั่นในแนวที่ตั้งฉากกันผ่าน อย่างไรก็ตามการเลือกนี้อาจทำได้ไม่สมบูรณ์ หรือประสิทธิภาพไม่ถึง 100% แสงที่ผ่านไปได้ อาจเป็นแสงโพลาไรซ์เพียงบางส่วน รูปที่ 12 แสดงให้เห็นหลักการของอุปกรณ์ชนิดนี้ ในรูปแสงที่ไม่โพลาไรซ์เดินทางมาตามแนวแกน +Z และผ่านโพลาไรเซอร์เชิงเส้นที่ยอมให้สนามไฟฟ้าในแนวตั้งผ่านเพียงแนวเดียว แนวที่โพลาไรเซอร์ยอมให้แสงผ่านไปได้ นี้เรียกว่า Transmission axis หรือ TA แสงไม่โพลาไรซ์ สามารถเขียนแทนได้ด้วยสนามไฟฟ้าที่สั่นในแนวตั้งฉากกัน 2 สนาม ซึ่งในภาพให้เป็นแนวแกน X และ Y ดังนั้นแสงที่ผ่านโพลาไรเซอร์เชิงเส้นนี้ไปได้ จึงมีเฉพาะสนามไฟฟ้าแนวตั้งหรือ Y เท่านั้น ส่วนสนามไฟฟ้าในแนวราบจะถูกคัดกลืนไว้หมดไม่สามารถผ่านออกไปได้

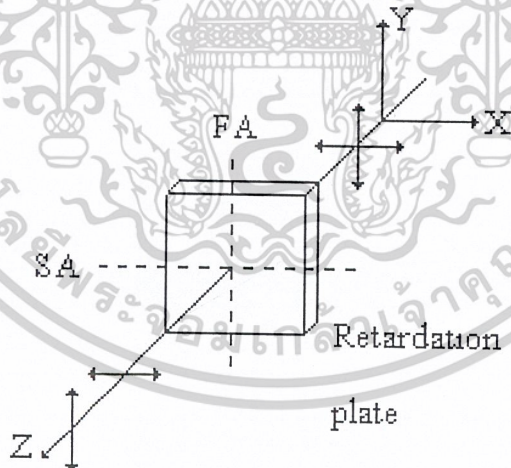


รูปที่ 12 แสดงหลักการทำงานของโพลาไรเซอร์เชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ตัวหน่วงเฟส (Phase retarder)

อุปกรณ์ชนิดนี้จะไม่จำกัดสนามไฟฟ้าในแนวใดแนวหนึ่งให้หมดไปแต่จะทำให้เกิดความต่างเฟสระหว่างสนามไฟฟ้าในแนวตั้งที่ตั้งฉากกัน ถ้าสนามไฟฟ้าในแต่ละแนวนี้มีความเร็วต่างกัน ในอุปกรณ์ชนิดนี้ด้วย ก็จะทำให้มีการสะสมความต่างเฟส $\Delta\phi$ จนกระทั่งสนามไฟฟ้าทั้งสองผ่านพื้นอุปกรณ์นี้ออกมา รูปที่ 13 แสดงให้เห็นผลของการหน่วงเฟส ในภาพแสงไม่โพลาไรซ์เดินทางผ่านตัวหน่วงเฟส โดยที่สนามไฟฟ้าในแนวตั้งเดินทางผ่านได้ด้วยความเร็วที่มากกว่าสนามไฟฟ้าในแนวราบ และแสดงด้วยการแยกห่างกันของสนามไฟฟ้าทั้งสองเมื่อผ่านตัวหน่วงเฟส อย่างไรก็ตาม ที่ทุกๆจุด จะมีสนามไฟฟ้าทั้งสองอยู่พร้อมๆกัน แต่อาจมีลักษณะต่างกัน แนวที่สนามไฟฟ้าผ่านได้ด้วยความเร็วที่สูงกว่า เรียกว่า Fast axis หรือ FA ขณะที่แนวที่สนามไฟฟ้าผ่านได้ด้วยความเร็วที่น้อยกว่าเรียกว่า Slow axis หรือ SA ถ้าความต่างเฟสเมื่อผ่านตัวหน่วงเฟสออกมามีค่าเป็น $\Delta\phi = 90^\circ$ เราเรียกตัวหน่วงเฟสนี้ว่า quarter-wave plate (QWP) และถ้า $\Delta\phi = 180^\circ$ เรียกว่า half-wave plate (HWP)

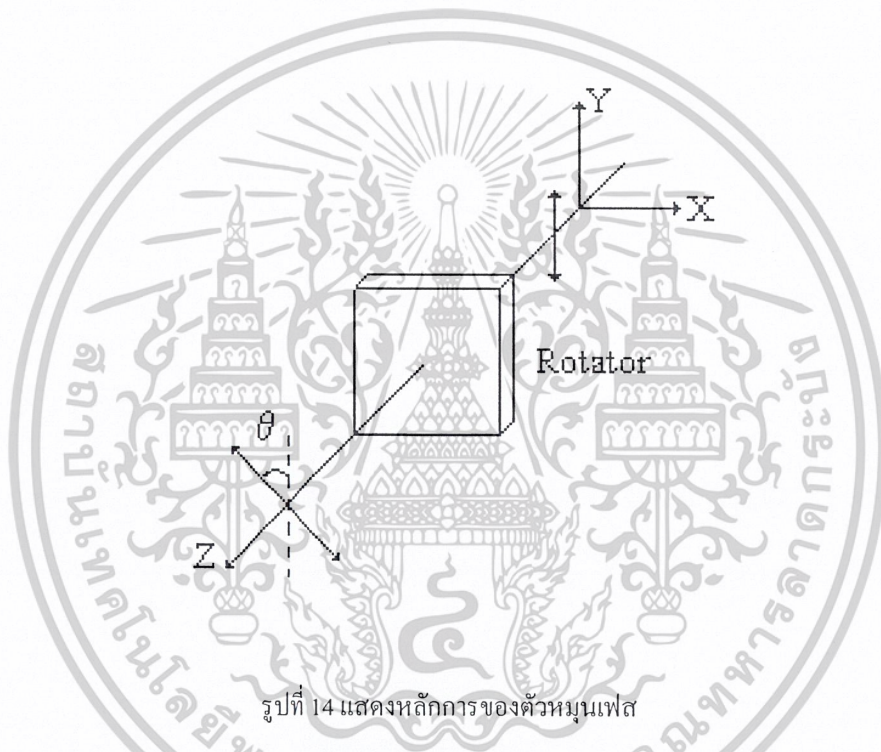


รูปที่ 13 แสดงหลักการของตัวหน่วงเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ตัวหมุนเฟส (Rotator)

อุปกรณ์นี้จะทำให้มีการหมุนทิศของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่ตกกระทบ ขนาดของมุมและทิศทางการหมุนจะขึ้นกับชนิดของสารที่ใช้เป็นอุปกรณ์นี้ รูปที่ 14 ให้แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นในแนวตั้งตกกระทบตัวหมุนเฟส แสงที่ผ่านตัวหมุนเฟสออกไปจะมีแนวของสนามไฟฟ้าหมุนไปเป็นมุม θ โดยหมุนทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 14 แสดงหลักการของตัวหมุนเฟส

เนื่องจากโพลาไรเซอร์ทั้ง 3 ชนิดนี้ จะให้แสงที่ผ่านออกมาเป็นแสงที่มีสถานะทางโพลาไรเซชันต่าง ๆ กัน และเนื่องจากเราใช้ Jones vectors แทนแสงโพลาไรซ์ชนิดต่างๆ แล้ว ดังนั้นถ้าเราสามารถหาเมทริกซ์ที่แทนการกระทำของโพลาไรเซอร์แต่ละชนิด และให้ผลออกมาดังที่กล่าวมาข้างต้นได้ จะทำให้สามารถใช้คณิตศาสตร์ของเมทริกซ์ในการพิจารณาเกี่ยวกับโพลาไรเซชันได้ และก่อให้เกิดความสะดวกขึ้นอย่างมาก ในการพิจารณาหาเมทริกซ์ของโพลาไรเซอร์แต่ละชนิดนั้น จะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

พิจารณากรณีของโพลาไรเซอร์เชิงเส้นที่มี TA อยู่ในแนวตั้งดังรูปที่ 12 ถ้าให้เมทริกซ์

$$\begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix}$$

แทนการกระทำของโพลาริเซอร์นี้ต่อแสงโพลาริซ์เชิงเส้นในแนวตั้ง จะได้ว่าแสงที่ผ่านออกมาเป็นแสงโพลาริซ์เชิงเส้นในแนวตั้งเช่นเดิม ดังนั้นจึงเขียนสมการของเมทริกซ์เป็น

$$\begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix}$$

หรือ $a(0) + b(1) = 0$

$$c(0) + d(1) = 1$$

ซึ่งจะได้ว่า $b = 0$ และ $d = 1$

ต่อไปพิจารณาว่า ถ้าให้แสงโพลาริซ์เชิงเส้นในแนวราบผ่านโพลาริเซอร์นี้ จะไม่มีแสงผ่านออกมาได้เลย หรือเขียนได้ว่า

$$\begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

หรือ $a(1) + b(0) = 0$

$$c(1) + d(0) = 0$$

ซึ่งจะได้ว่า $a = 0$ และ $c = 0$

ดังนั้นจะได้เมทริกซ์ที่แทนโพลาริเซอร์เชิงเส้นที่มี TA ในแนวตั้ง มีค่าเป็น

$$M = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (53)$$

สำหรับ เมทริกซ์ที่แทนโพลาริเซอร์เชิงเส้นที่มี TA ในแนวราบ สามารถหาได้แบบเดียวกับกรณีของ TA อยู่ในแนวตั้งและจะได้เป็น

$$M = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$$

ส่วนกรณีที่ TA อยู่ในแนวที่ทำมุมใดๆกับแกนราบ เช่นทำมุม 45° เพื่อง่ายต่อการพิจารณา เราอาจเขียนแสงไม่โพลาริซ์ใหม่ให้มีสนามไฟฟ้าสั้นในแนวที่ขนานกับ TA และตั้งฉากกับ TA สำหรับไฟฟ้าที่สั้นในแนวของ TA หรือแนวที่ทำมุม 45° กับแกน X จะมี Jones vector เป็น

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \end{vmatrix}$$

และที่สนามไฟฟ้าสั้นในแนวตั้งฉากกับ TA จะมี Jones vector เป็น

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \begin{vmatrix} 1 \\ -1 \end{vmatrix}$$

ดังนั้นเมื่อแสงไมโครเวฟผ่านโพลาไรเซอร์ จะมีเฉพาะสนามไฟฟ้าที่สั้นในแนวขนานกับ TA เท่านั้นที่ผ่านไปได้ หรือจะเขียนเป็นสมการเมทริกซ์ว่า

$$\begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \end{vmatrix}$$

และ

$$\begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 \\ -1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

หรือ

$$a + b = 1$$

$$c + d = 1$$

$$a - b = 0$$

$$c - d = 0$$

ซึ่งจะได้ว่า $a = b = c = d = 1/2$ ทำให้ได้เมทริกซ์สำหรับโพลาไรเซอร์เชิงเส้นที่มี TA ทำมุม 45° กับแนวราบมีค่าเป็น

$$M = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \quad (54)$$

ในทำนองเดียวกัน เราสามารถแสดงได้ว่า เมทริกซ์ของโพลาไรเซอร์เชิงเส้นที่มี TA ทำมุม θ ใดๆ กับแนวราบมีค่าเป็น

$$M = \begin{vmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{vmatrix} \quad (55)$$

สมการ (53) และ (54) สามารถหาได้จาก (55) โดยแทนค่า θ เป็น 0° และ 45° ตามลำดับในกรณีของตัวหนังสือเฟส เราต้องการหาเมทริกซ์ที่ทำให้มีการเปลี่ยนสนามไฟฟ้าเดิม $E_{0x} e^{i\phi_x}$ เป็น $E_{0y} e^{i(\phi_x + \epsilon_x)}$ และ $E_{0y} e^{i\phi_y}$ ให้เป็น $E_{0y} e^{i(\phi_y + \epsilon_y)}$

ซึ่งอาจเขียนได้เป็นสมการเมทริกซ์ว่า

$$\begin{vmatrix} e^{i\epsilon_x} & 0 \\ 0 & e^{i\epsilon_y} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} E_0 e^{i\phi_x} \\ E_0 e^{i\phi_y} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} E_0 e^{i(\phi_x + \epsilon_x)} \\ E_0 e^{i(\phi_y + \epsilon_y)} \end{vmatrix}$$

ดังนั้น เราจึงสามารถใช้เมทริกซ์ที่แทนตัวหนังสือเฟสได้เป็น

$$M = \begin{vmatrix} e^{i\epsilon_x} & 0 \\ 0 & e^{i\epsilon_y} \end{vmatrix} \quad (56)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่นี้ ϵ_x และ ϵ_y หมายถึงเฟสของสนามไฟฟ้าในแนวแกน X และ Y เพิ่มขึ้น เมื่อแสงผ่านตัวหน่วงเฟส ϵ_x และ ϵ_y นี้เราอาจมีค่าเป็นลบก็ได้ สำหรับกรณีของ quarter-wave plate จะมี

$$|\Delta\epsilon| = |\epsilon_x - \epsilon_y| = \pi/2$$

ซึ่งจะแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ

$$\epsilon_y - \epsilon_x = \pi/2 \quad (\text{FA อยู่ในแนวตั้ง})$$

และ
$$\epsilon_x - \epsilon_y = \pi/2 \quad (\text{FA อยู่ในแนวราบ})$$

ในลักษณะแรกคือ FA อยู่ในแนวตั้ง เราอาจให้ $\epsilon_x = -\pi/4$ และ $\epsilon_y = \pi/4$ หรือค่าอื่นๆ ได้อีกมากมาย ดังนั้น Jones matrix ก็จะมีค่าไม่ตายตัว อาจมีได้มากมายขึ้นกับการกำหนดค่า ϵ_x และ ϵ_y ใดๆก็ตาม การกำหนด $\epsilon_x = -\pi/4$ และ $\epsilon_y = \pi/4$ ทำให้ได้ Jones matrix สำหรับตัวหน่วงเฟสที่มีรูปแบบเหมาะสมกับการนำไปใช้งานต่างๆ เนื่องจากมีสมมาตร

$$M = \begin{vmatrix} e^{i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/4} \end{vmatrix} = e^{i\pi/4} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{vmatrix} \quad (57)$$

ในทำนองเดียวกัน QWP ที่มี $\epsilon_x > \epsilon_y$ หรือ FA อยู่ในแนวราบ ถ้าเราให้ $\epsilon_x = \pi/4$ และ $\epsilon_y = -\pi/4$ จะได้ Jones matrix เป็น

$$M = e^{i\pi/4} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} \quad (58)$$

สำหรับ HWP จะมี $|\Delta\epsilon| = \pi$ จะได้ว่า

$$\begin{vmatrix} e^{-i\pi/2} & 0 \\ 0 & e^{i\pi/2} \end{vmatrix} = e^{-i\pi/2} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} \quad (59)$$

สำหรับ HWP ที่มี FA อยู่ในแนวตั้ง

$$\begin{vmatrix} e^{i\pi/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/2} \end{vmatrix} = e^{i\pi/2} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} \quad (60)$$

จะสังเกตได้ว่า elements ของเมทริกซ์ของ HWP ทั้งสองเหมือนกัน ต่างกันที่ตัวคูณข้างหน้าเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากกรณีที่ E_x มีเฟสนำ E_y อยู่ π เรเดียน จะเหมือนกับกรณีที่ E_x มีเฟสตาม E_y อยู่ π เรเดียนนั่นเอง ตัวคูณข้างหน้าบอกให้ทราบถึงการเปลี่ยนเฟสทุก element อย่างเท่าๆกัน

ในกรณีของตัวหมุนเฟสนั้น ถ้ากำหนดให้แนวของสนามไฟฟ้าหมุนไปเป็นมุม β แสดงว่าสำหรับแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีสนามไฟฟ้าในแนวทำมุม θ กับแกนราบ เมื่อผ่านตัวหมุนเฟสจะมีสนามไฟฟ้าอยู่ในแนว $(\theta + \beta)$ แทน หรืออาจเขียนเป็นสมการเมทริกซ์เป็น

$$\begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(\theta + \beta) \\ \sin(\theta + \beta) \end{vmatrix}$$

หรือ

$$a \cos \theta + b \sin \theta = \cos(\theta + \beta) = \cos \theta \cos \beta - \sin \theta \sin \beta$$

$$c \cos \theta + d \sin \theta = \sin(\theta + \beta) = \cos \theta \sin \beta + \sin \theta \cos \beta$$

ซึ่งจะได้

$$a = \cos \beta$$

$$b = -\sin \beta$$

$$c = \sin \beta$$

$$d = \cos \beta$$

หรือได้เป็น

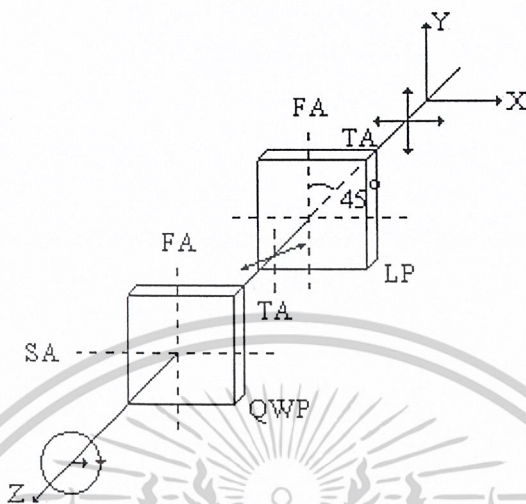
$$M = \begin{vmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{vmatrix} \quad (61)$$

แทนตัวหมุนเฟสที่หมุนแนวของสนามไฟฟ้าไปเป็นมุม β
 สรุปลเมทริกซ์ที่แทนโพลาไรเซอร์ทั้งสามได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุป Jones matrix สำหรับโพลาไรเซอร์ชนิดต่างๆ

I. Linear polarizers					
TA horizontal	$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$	TA vertical	$\begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$	TA at 45 to horizontal	$\frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix}$
II. Phase retarders					
General			$\begin{vmatrix} e^{i\epsilon_x} & 0 \\ 0 & e^{i\epsilon_y} \end{vmatrix}$		
QWP, FA vertical	$e^{-i\pi/4} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix}$	QWP, FA horizontal	$e^{i\pi/4} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{vmatrix}$		
HWP, FA vertical	$e^{-i\pi/2} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{vmatrix}$	HWP, FA horizontal	$e^{i\pi/2} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix}$		
III. Rotator					
Rotator ($\theta \rightarrow \theta + \beta$)			$= \begin{vmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{vmatrix}$		

Jones matrix ที่ได้มาข้างต้นนี้ เป็นประโยชน์มากในการพิจารณาผลของโพลาไรเซอร์ต่อแสง ตลอดจนสามารถใช้ศึกษาการทำให้เกิดแสงโพลาไรซ์ชนิดต่างๆ ด้วยอุปกรณ์เหล่านี้ง่ายขึ้น เช่นสามารถทำให้เกิดโพลาไรซ์เชิงวงกลมโดยการให้แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นผ่าน QWP โดยพิจารณาดังรูปที่ 15 โพลาไรซ์เชิงเส้น (LP) ทำให้เกิดแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีสนามไฟฟ้าในแนว 45° กับแกน X หรือ Y เมื่อแสงนี้ไปผ่าน QWP จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆกัน ตามแนว FA และ SA ทั้ง 2 ส่วนนี้เมื่อผ่าน QWP ออกมาจะมีเฟสต่างกัน 90° จึงทำให้ได้ผลเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงวงกลม



รูปที่ 15 แสดงให้เห็นประโยชน์ของ Jones matrix ในการวิเคราะห์สถานะทางโพลาไรเซชัน

เราพิจารณาโดยใช้แคลคูลัสของ Jones ด้วยการให้เมทริกซ์ของ QWP ไปกระทำต่อแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น ดังสมการ

$$e^{i\pi/4} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{i\pi/4} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ -i & -i \end{vmatrix}$$

ผลที่ได้ออกมาเป็น Jones vector ที่ใช้แทนแสงโพลาไรซ์เชิงวงกลมแบบวนขวา ถ้าเราสลับ FA และ SA ของ QWP จะพบว่าผลที่ได้จะเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงวงกลมแบบวนซ้าย

อีกตัวอย่างหนึ่งที่แสดงให้เห็นประโยชน์ของ Jones matrix และ Jones vector คือการหาผลลัพธ์จากการให้แสงโพลาไรซ์เชิงวงกลมแบบวนซ้ายผ่าน eighth-wave plate หรือตัวหน่วงเฟสที่สนามไฟฟ้าใน 2 แกนที่ตั้งฉากกันออกมาด้วยความต่างเฟส $\pi/4$ เรเดียน เราต้องเริ่มต้นด้วยการหาเมทริกซ์ที่ใช้แทนตัวหน่วงเฟสนี้ก่อน

ในกรณีนี้ $|\Delta\epsilon| = 2\pi/8 = \pi/4$ หรือ 45° ถ้ากำหนดให้ $\epsilon_x = 0$ จะได้ $\epsilon_y = \pi/4$ ดังนั้น

$$\begin{vmatrix} e^{i\epsilon_x} & 0 \\ 0 & e^{i\epsilon_y} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\pi/4} \end{vmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมทริกซ์นี้แทน Eighth-wave plate เมื่อแสงโพลาไรซ์เชิงวงกลมแบบวนซ้ายเคลื่อนที่ผ่านจะได้

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\pi/4} \end{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ ie^{i\pi/4} & -1 \end{vmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ e^{i3\pi/4} & -1 \end{vmatrix}$$

เนื่องจาก $e^{i3\pi/4} = \cos 3\pi/4 + i \sin 3\pi/4 = -\frac{1}{\sqrt{2}} + i\frac{1}{\sqrt{2}}$

แสดงว่าผลลัพธ์ที่ได้ เป็นแสงโพลาไรซ์เชิงวงรีโดยมีค่าต่างๆตามสมการ (59) ดังนี้

$$A = 1 \quad B = -1/\sqrt{2} \quad \text{และ} \quad C = 1/\sqrt{2}$$

อนึ่งเฟสที่ต่างกันของสนามไฟฟ้าในแนวแกน X และ Y หรือ ϵ มีค่าเท่ากับ $\tan^{-1}C/B$ หรือเท่ากับ 135° และเมื่อเปรียบเทียบกับสมการ (55) จะได้ $E_{ox} = 1$ และ $E_{oy} = 1$ และจากสมการที่ (60) จะได้ว่า $\alpha = -45^\circ$

จากตัวอย่างข้างต้นนี้ แสดงให้เห็นว่าถ้าแสงผ่านพลาโรเซอร์หลายๆอัน ก็สามารถใช้วิธีการข้างต้นนี้ได้เช่นกัน โดยผลคูณของเมทริกซ์แต่ละอันจะได้เป็นเมทริกซ์ของระบบดังสมการ

$$(M_m \dots M_3 M_2 M_1) V = M_s V$$

เมื่อ V คือ Jones vector ของเส้นที่ผ่าน M_1 ไปยัง $M_2, M_3 \dots M_m$

และ M_s คือ เมทริกซ์ของระบบมีค่าเท่ากับ $M_m \dots M_3 M_2 M_1$

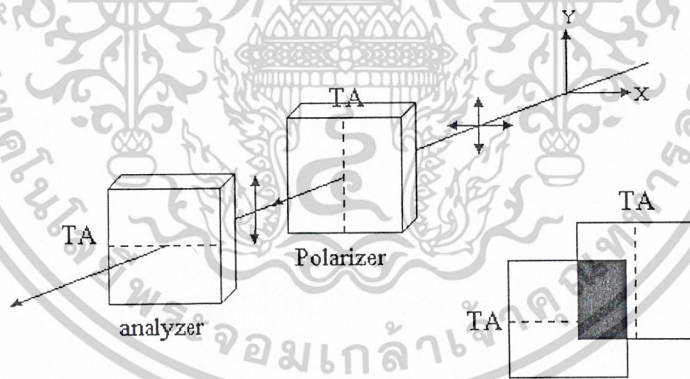
2.4.3 การทำให้เกิดแสงโพลาไรซ์

อันตรกิริยาระหว่างแสงกับสสารที่มีสมบัติทางแสงไม่สมมาตรในแนวตั้งฉากกับแนวการเคลื่อนที่ของแสง จะส่งผลให้เกิดแสงโพลาไรซ์ได้ การทำให้เกิดแสงโพลาไรซ์อาจแบ่งได้เป็น

1) Dichroism-การทำให้เกิดโพลาไรเซชันโดยการดูดกลืนแบบเลือก

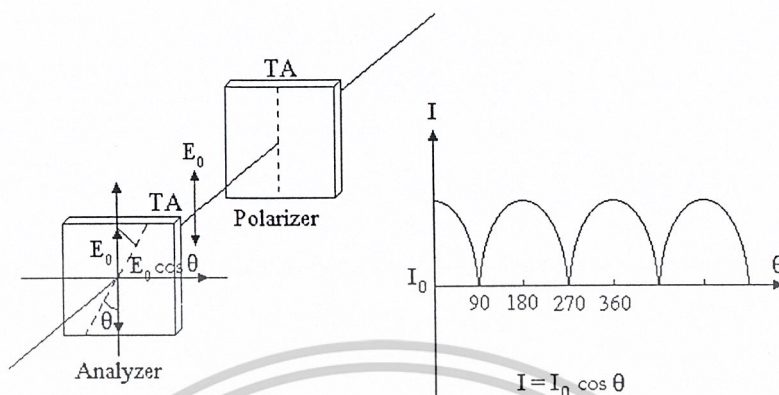
ไดโครอิกโพลาไรเซอร์ (Dicroic polarizer) จะเลือกดูดกลืนแสงที่มีสนามไฟฟ้าในแนวใดแนวหนึ่ง ตามสมบัติเฉพาะของสารประเภทไดโครอิก ดังนั้นโพลาไรเซอร์นี้จะมีเฉพาะแสงที่มีสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับแนวที่ดูดกลืนเท่านั้นที่ผ่านออกไปได้ แนวของสนามไฟฟ้าที่แสงผ่านไปได้นี้เรียกว่า Transmission axis หรือ TA ของโพลาไรเซอร์ สำหรับโพลาไรเซอร์ในอุดมคติ (ideal polarizer) โพลาไรเซชันของแสงนี้สามารถตรวจสอบได้ โดยการใช้ไดโครอิกโพลาไรเซอร์อีกชิ้นหนึ่ง มาทำหน้าที่เป็นตัววิเคราะห์หรือ analyzer รูปที่ 14 ถ้า TA ของตัววิเคราะห์ทำมุม 90° กับ TA ของโพลาไรเซอร์ จะไม่มีแสงใดๆผ่านตัววิเคราะห์ออกไปได้ และถ้าให้ θ เป็นมุมระหว่าง TA ของทั้งสอง จะได้ค่า irradiance สำหรับแต่ละค่า θ เป็นไปตาม Malus' law คือ

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (62)$$



รูปที่ 16 แสดงการวางโพลาไรเซอร์และตัววิเคราะห์ ในลักษณะที่ TA ตั้งฉากกัน

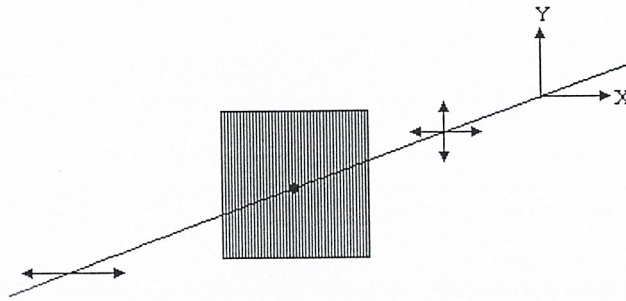
อธิบาย Malus' law ได้โดยพิจารณาจากรูปที่ 17 แสดงสนามไฟฟ้าของแสงที่ผ่านโพลาไรเซอร์ ถ้า E_0 เป็นแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าที่ผ่านโพลาไรเซอร์ จะได้ว่าแอมพลิจูดของแสงที่ผ่านอนาไลเซอร์มีค่า $E_0 \cos \theta$ และ irradiance จะแปรตามกำลังสองของแอมพลิจูด ตามสมการ (62)



รูปที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าที่ผ่านโพลาไรเซอร์และอานาไลเซอร์

การอธิบายพฤติกรรมของสารไดโพลิกที่มีการดูดกลืนแสงในแนวหนึ่งและปล่อยให้แสงในแนวที่ตั้งฉากกันผ่านไปได้นี้ อาจทำได้โดยเปรียบเทียบกับกรรทดลอง โดยใช้ไมโครเวฟดังรูปที่ 18 ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในย่าน 1 มิลลิเมตร ถึง 1 เมตร เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตะแกรงลวดในแนวตั้งที่มีระยะระหว่างซี่ตะแกรงน้อยกว่าความยาวคลื่นของไมโครเวฟ จะพบว่าถ้าไมโครเวฟนี้มีสมบัติโพลาไรซ์เชิงเส้นในแนวตั้งหรือแนวเดียวกับเส้นลวดในตะแกรง จะไม่มีคลื่นไมโครเวฟผ่านตะแกรงออกมาได้หรืออาจออกมาได้น้อยมาก ในทางกลับกันถ้าไมโครเวฟมีสมบัติโพลาไรซ์เชิงเส้นในแนวนอน หรือแนวตั้งฉากกับเส้นลวดในตะแกรง จะพบว่าไม่มีไมโครเวฟผ่านออกไปได้ ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้ด้วยอันตรกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับลวดโลหะ ซึ่งทำหน้าที่เช่นเดียวกับสารไดโพลิก โพลาไรเซอร์ กล่าวคือ ในลวดโลหะมีอิเล็กตรอนอิสระซึ่งจะสั่นไปมาภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าของไมโครเวฟ อิเล็กตรอนที่สั่นนี้จะทำตัวเสมือนไดโพลปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาในทุกทิศทาง ยกเว้นทิศของการสั่น เมื่อรวมคลื่นที่เข้ามาและที่เกิดจากไดโพลทั้งหมด จะพบว่าเกิดการหักล้างกันหมด ไม่มีคลื่นออกไปข้างหน้าเลย ส่วนกรณีของคลื่นที่เข้ามามีทิศของการสั่นในแนวราบ หรือแนวตั้งกับเส้นลวดการสั่นของอิเล็กตรอนจะให้สนามออกมาหักล้างกับสนามที่เข้ามาเพียงเล็กน้อย จึงทำให้มีคลื่นออกมาด้านหน้าได้มากกว่าในกรณีแรก

ในกรณีของคลื่นแสง ส่วนที่มีการนำไฟฟ้าที่เทียบได้กับเส้นลวดนั้น จะต้องมียะยะชิดกันกว่าในกรณีของไมโครเวฟ เนื่องจากความยาวคลื่นแสงสั้นกว่าของไมโครเวฟมาก



รูปที่ 18 แสดงผลของตะแกรงลวดต่อไมโครเวฟ ซึ่งจะมีการดูดกลืนในแนวตั้งได้ดี ถ้าความยาวคลื่นของไมโครเวฟมีค่ามากกว่าระยะระหว่างเส้นลวดในตะแกรง

2) การหักเหเชิงซ้อน-การเกิดโพลาไรเซชันด้วยดัชนีหักเห 2 ค่า

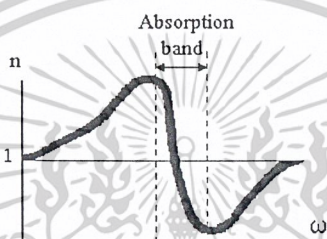
สารประเภทหักเหสองแนว (Birefringence) เป็นสารที่ทำให้เกิดการหักเห 2 ทิศทาง กล่าวคือ ลำแสงตกกระทบลำหนึ่ง จะกระทำให้เกิดลำแสงหักเห 2 ลำ อันเนื่องมาจากสารพวกนี้มีดัชนีหักเห 2 ค่า การที่แรงยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในสารใดโครอิกมีค่าไม่เท่ากันในทุกทิศทาง ทำให้แอมพลิจูดของคลื่นที่เกิดจากการสั่นของอิเล็กตรอนเหล่านี้ภายใต้การกระตุ้นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าไม่เท่ากันในทุกทิศทางด้วย และทำให้เกิดการดูดกลืนคลื่นที่ไม่เท่ากันในทุกทิศทาง ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อความถี่ของคลื่นที่มากระตุ้นจะต้องอยู่ในย่านที่เรียกว่าแถบการดูดกลืน (absorption band) ของสารนั้น รูปที่ 19 แสดงแถบการดูดกลืน ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหกับความถี่ ซึ่งในแถบนี้ค่า dm/dw มีค่าน้อยกว่าศูนย์ หรือเรียกว่าเป็นย่านที่มีการกระจายวิปริต (anomalous dispersion) โดยปกติแถบนี้มักจะอยู่ในย่านอัลตราไวโอเล็ต ในแสงที่แลเห็นได้สารพวกนี้จึงมักจะโปร่งใส ในกรณีเช่นนี้ถึงแม้ว่าจะมีแรงยึดเหนี่ยวที่กระทบต่ออิเล็กตรอนไม่เท่ากันในทุกทิศทาง ก็จะไม่เกิดผลต่อการดูดกลืนแสงในย่านที่แลเห็นได้ นั่นคือไม่แสดงสมบัติใดโครอิก

การที่แรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนในแนวแกน X และ Y มีค่าไม่เท่ากันนี้ ทำให้เกิดความแตกต่างของกราฟดังภาพที่ 15 คือจะมีกราฟสำหรับ n_x ที่สอดคล้องกับสนามไฟฟ้าในแนวแกน X และสำหรับ n_y ที่สอดคล้องกับสนามไฟฟ้าแกน Y ทั้งนี้เนื่องจากคลื่นในทั้งสองทิศทางจะมีความเร็ว ϕ และ ϕ_y ต่างกัน ผลที่ได้คือสารเหล่านี้จะมีสมบัติการหักเหสองแนว เราอาจกล่าวโดยสรุปว่า ในสารใดโครอิก และสารหักเหสองแนว นี้มีสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ 2 ค่า คือ ดัชนีหัก

เท n และ Extinction coefficient k (k นี้แปรตามสัมประสิทธิ์การดูดกลืน) ทั้ง 2 ค่านี้ ขึ้นกับความถี่ของแสง และ 2 ค่านี้ประกอบกันเป็นดัชนีหักเหเชิงซ้อน \tilde{n} โดยที่

$$\tilde{n} = n + ik$$

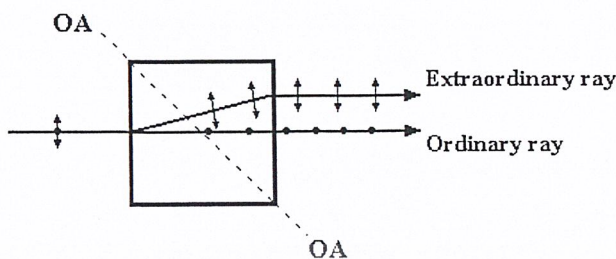
สำหรับสารไดโครอิก $n_x = n_y$ และ $k_x \neq k_y$ ส่วนสารหักเหสองแนว $n_x \neq n_y$ และ $k_x = k_y$ สมบัติทั้งสองของสารเหล่านี้ต่างก็เกี่ยวข้องกับ โครงสร้างผลึกที่ไม่เหมือนกันในทุกทิศทาง และการที่เฟสเปลี่ยนกับค่าความถี่ด้วย



รูปที่ 19 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีหักเหกับความถี่ในย่านใกล้ๆ กับแถบการดูดกลืน

3) การหักเหสองแนว (Double refraction)

แม้ว่าสนามไฟฟ้าทั้งสองของแสงจะเคลื่อนที่ผ่านผลึกออกมาด้วยเฟสที่ต่างกัน แต่ลำแสงก็ยังคงเป็นลำเดียว ถ้าเราจัดให้ OA ของแท่งผลึกทำมุมใดๆ กับแนวของลำแสง ดังแสดงในรูปที่ 20 ลำแสงจะมีการแยกเป็น 2 แนวภายในทำให้ลำแสงที่ผ่านออกมามี 2 ลำด้วย ลำหนึ่งเรียกว่า ordinary อีกลำหนึ่งเรียกว่า extraordinary ลำแสงทั้งสองมีพฤติกรรมแตกต่างกันคือ ลำแสง ordinary เป็นไปตามกฎของสเนลล์ ในขณะที่ลำแสง extraordinary ไม่เป็นไปตามกฎของสเนลล์ ถ้าเรานำแท่งแคลไซต์ ไปวางทับตัวอักษรหรือจุดบนกระดาษ จะสามารถมองเห็นตัวอักษรหรือจุดเป็น 2 ชุด เมื่อมองลงมาจากด้านบน และเมื่อหมุนแท่งแคลไซต์ไป ตัวอักษรหรือจุดที่เกิดจากลำแสง extraordinary จะหมุนไปรอบตัวอักษรหรือจุดที่เกิดจากลำแสง ordinary ที่อยู่ทับที่

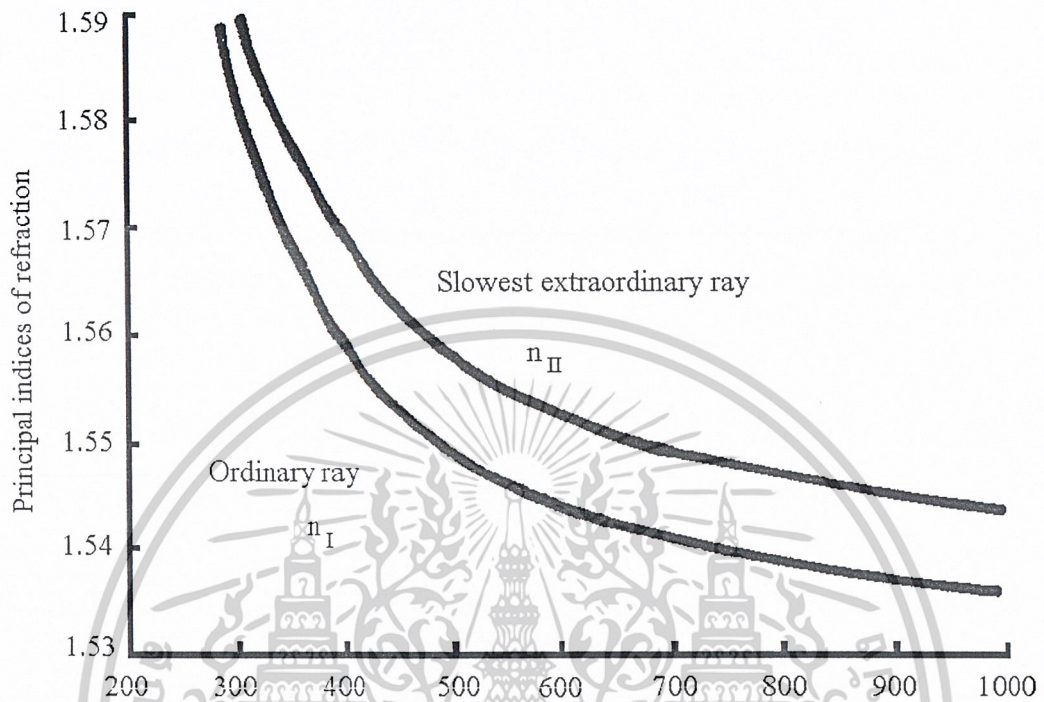


รูปที่ 20 แสดงการหักเหสองแนว

ลำแสงทั้งสองที่ผ่านแท่งผลึกออกมาต่างก็เป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นในทิศที่ตั้งฉากกันโดยลำแสง ordinary จะมีสนามไฟฟ้าในทิศตั้งฉากกับ OA และเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว v_{\perp} ทำให้มีดัชนีหักเหเป็น $n_o = n_{\perp} = c/v_{\perp}$ ส่วนลำแสง extraordinary มีสนามไฟฟ้าในทิศตั้งฉากกับสนามของลำแสง ordinary ภายในผลึก ลำแสง extraordinary มีการแยกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 ตั้งฉากกับ OA และเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว $v_{\perp} = c/v_{\perp}$ เช่นเดียวกับลำแสง ordinary ส่วนที่ 2 ขนานกับ OA และเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว v_{\parallel} และมีดัชนีหักเห $n_e - n_{\parallel} = c/v_{\parallel}$

เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมของลำแสง extraordinary ได้ดีขึ้น ให้พิจารณาภาพที่ 17 ซึ่งแสดงถึงคลื่นฮอยเกนส์ (Huygens' secondary wavelet) ที่เกิดจากลำแสงชนิดนี้ ณ จุดที่ลำแสงตกกระทบผิวผลึกที่จุด P ลำแสงตกกระทบจะแยกเป็น 2 แนว คือแนว aa ขนานกับ OA และแนว bb ตั้งฉากกับ OA แสงในแนว aa จะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของ v_{\parallel} และแสงในแนว bb จะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของ v_{\perp} สำหรับกรณีของแคลไซต์ $v_{\perp} < v_{\parallel}$ ทำให้ได้คลื่นเป็นรูปวงรีที่มี major axis แปรตาม v_{\parallel} และ minor axis แปรตาม v_{\perp} ในรูปที่ 21(2) แสดงให้เห็นคลื่นวงรีหลาย ๆ ลูกและหน้าคลื่นที่สัมผัสคลื่นเหล่านี้ หน้าคลื่นนี้จะเป็นระนาบที่มีเฟสคงที่ และมีทิศตั้งฉากกับ propagation vector k ด้วย สนามไฟฟ้าของหน้าคลื่นวงรีนี้จะอยู่ระหว่างสนาม \mathcal{E}_{\parallel} และ \mathcal{E}_{\perp} ให้สังเกตว่าในกรณีของลำแสง extraordinary สนามไฟฟ้าไม่ได้ตั้งฉากกับ k สำหรับการส่งผ่านพลังงานของคลื่นนั้นจะอยู่ในทิศของ Poynting vector $S = \epsilon_0 c^2 E \times B$ ซึ่งเป็นทิศเดียวกับแนวของลำแสง แนวของลำแสงนี้ไม่ได้ตั้งฉากกับหน้าคลื่น หากแต่เป็นแนวที่ต่อระหว่างจุดเริ่มต้นของคลื่นวงรีกับจุดสัมผัสของ

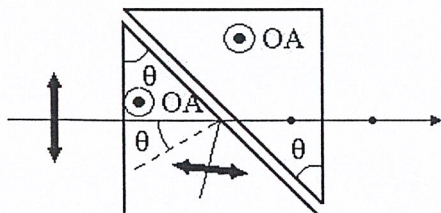
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 22 แสดงค่าดัชนีหักเหของผลึกควอตซ์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ณ อุณหภูมิ 18°

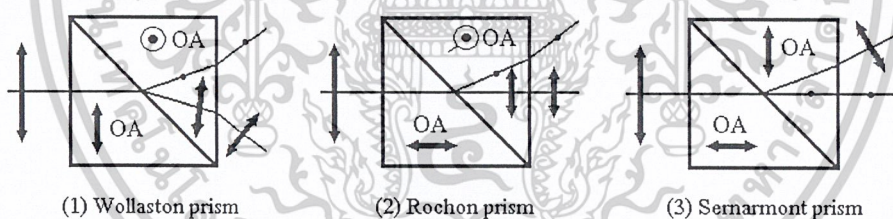
มีอุปกรณ์หลายชนิดที่อาศัยหลักการข้างต้นนี้ อุปกรณ์ที่มีการนำมาใช้งานมากชนิดหนึ่งคือปริซึม Glan-air ดังแสดงในรูปที่ 23 อุปกรณ์ชนิดนี้ทำจากปริซึมของแคลไซต์ 2 อันประกบกันอยู่ทางด้านยาว โดยมีอากาศอยู่ระหว่างกลางและมี OA ขนานกันและขนานกับแนวประกบด้วย ค่ามุมยอด θ จะกำหนดให้เป็นค่าที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดในปริซึมได้ กล่าวคือ ถ้ามีลำแสงตกกระทบบนผิวปริซึมด้านซ้ายมือ ลำแสงนี้จะตกกระทบบริซึมด้านตรงข้ามด้วยมุมตกกระทบที่มีค่าเท่ากับมุมยอดของปริซึมคือ θ ถ้า θ นี้มี ค่ามุมวิกฤตจะทำให้แสงสะท้อนกลับหมดได้ แต่เนื่องจากควอตซ์มีดัชนีหักเห 2 ค่า คือ $n_{\parallel} = 1.4864$ และ $n_{\perp} = 1.6584$ จึงมีค่ามุมวิกฤตที่สอดคล้องกัน 2 ค่าด้วย คือ 42.3° และ 37.1° ตามลำดับ ดังนั้นถ้าเราให้มุมยอดของปริซึมมีค่าระหว่าง 42.3° กับ 37.1° จะทำให้ลำแสงที่มีสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับ OA สะท้อนกลับหมด ปล่อยให้สนามไฟฟ้าที่ขนานกับ OA ผ่านไปได้ ส่วนปริซึมอันที่สองทำหน้าที่จัดให้แสงที่ออกไปเป็นแนวของลำแสงเดิม อุปกรณ์เช่นนี้ทำหน้าที่เป็นโพลาไรซ์เชิงเส้น และถ้าเราบรรจุของเหลวไว้ในระหว่างปริซึม จำเป็นต้องปรับค่า θ ใหม่ เพื่อให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 23 แสดงปริซึม Glan-air

นอกจากอุปกรณ์ที่กล่าวมาแล้ว เรายังอาจสร้างอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดแสงโพลาไรซ์ได้อีกหลายแบบ รูปที่ 24 แสดงการนำแท่งควอตซ์มาเป็นโพลาไรซ์อีก 3 ชนิด โดยมีได้อาศัยหลักการสะท้อนกลับหมด หากแต่มีการจัดให้ OA ของปริซึมแต่ละอันวางตัวตั้งฉากกัน เป็นผลให้ลำแสงหักเหที่ผ่านออกไปทั้งสองลำเป็นลำแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นในทิศตั้งฉากกันและมีแนวที่ต่างกันเราจึงสามารถเลือกใช้แต่ละแนวเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นตามต้องการได้



(1) Wollaston prism

(2) Rochon prism

(3) Sernarmont prism

รูปที่ 24 แสดงปริซึมที่ทำให้เกิดแสงโพลาไรซ์แบบต่าง ๆ

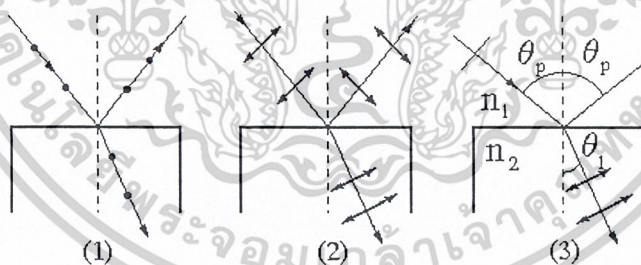
จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าสารหักเหสองแนวนั้น สามารถใช้ทำได้ทั้งโพลาไรเซอร์เชิงเส้นและตัวหน่วงเฟส เช่น QWP เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) โพลาริเซชันจากการสะท้อนที่ผิวไดอิเล็กตริก

แสงสะท้อนจากผิวไดอิเล็กตริก จะมีสมบัติทางโพลาริเซชันอย่างน้อยก็จะเป็นแสงโพลาริเซชันบางส่วน เราสามารถตรวจสอบได้โดยการสังเกตแสงสะท้อนผ่านโพลาริเซอร์ที่หมุนรอบแนวของแสงสะท้อน เมื่อแนวของสนามไฟฟ้าของแสงตั้งฉากกับ TA ของโพลาริเซอร์ จะมองเห็นความเข้มแสงลดลง แวนตาเกินแคคโพลารอยด์ ก็อาศัยหลักการเบื้องต้นเนื่องจากแนวสนามไฟฟ้าของแสงสะท้อนที่เข้าสู่ตาอยู่ในแนวราบ TA ของโพลารอยด์ในแวนตาจึงอยู่ในแนวตั้ง

เพื่อให้เข้าใจหลักการของปรากฏการณ์ข้างต้น พิจารณารูปที่ 25 ซึ่งแสดงถึงลำแสงตกกระทบบนที่มุมต่าง ๆ บนไดอิเล็กตริกผิวเรียบ ถ้าแทนแสงไม่โพลาริเซชันด้วยสนามไฟฟ้า 2 สนามที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน สนามหนึ่งตั้งฉากกับระนาบแสงตกกระทบบ (รูปที่ 25(1)) อีกสนามหนึ่งขนานกับระนาบแสงตกกระทบบ (รูปที่ 25(2)) ระนาบของแสงตกกระทบบคือระนาบที่ประกอบด้วยลำแสงและเส้นปกติที่ลากผ่านจุดที่แสงตกกระทบบ ในที่นี้คือ ระนาบของกระดาษนั่นเอง ถ้าเราใช้สัญลักษณ์ E_s และ E_p แทนสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากและขนานกับระนาบของแสงตกกระทบบตามลำดับ กรณีของ E_s นี้ เรียกว่าเป็น transverse electric (TE) mode และ E_p เรียกว่า transverse magnetic (TM) mode



รูปที่ 25 แสดงการสะท้อนของแสงที่ผิวไดอิเล็กตริก

(1) TE mode

(2) TM mode

(3) มุมตกกระทบบมีค่าเท่ากับมุมบรีวสเตอร์

พิจารณากรณี TE mode ดังรูปที่ 25(1) บทบาทของ E_s ที่กระทำต่ออิเล็กตรอนที่อยู่ผิวไดอิเล็กตริก จะเป็นการกระตุ้นให้เกิดการสั่นในทิศเดียวกันคือทิศที่ตั้งฉากกับกระดาษ การสั่นนี้จะทำให้เกิดแสง 2 ทิศทาง คือแสงสะท้อนและแสงหักเห แสงทั้งสองลำนี้จะเป็นแสงโพลาริเซชันเชิง

เส้นในทิศตั้งฉากกับกระดาษด้วยเช่นกัน ทิศทางของลำแสงสะท้อนและลำแสงหักเหจะเป็นทิศที่ตั้งฉากกับแนวการสั่นของอิเล็กตรอน

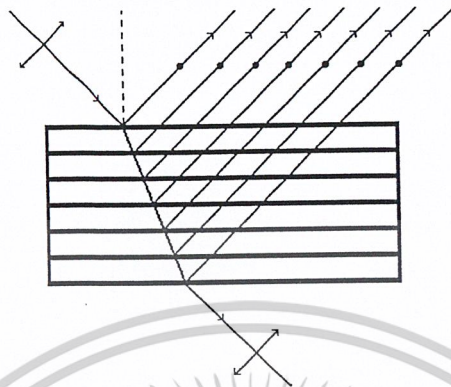
พิจารณากรณีของ E_p และ TM mode ดังรูปที่ 25(2) จากทิศทางของลำแสงหักเห สรุปได้ว่าสนามไฟฟ้าในตัวกลางมีทิศตั้งฉากกับแนวของลำแสงและเนื่องจากแนวของแสงสะท้อนจะใกล้เคียงกับแนวการสั่นของอิเล็กตรอน ทำให้การแผ่คลื่นจากการสั่นในแนวของแสงสะท้อนมีน้อยหรือจะพบ E_p เพียงเล็กน้อยในลำแสงสะท้อน ถ้าเราพิจารณาทั้ง TE กับ TM mode พร้อม ๆ กัน พบว่าลำแสงสะท้อนเป็นแสงโพลาไรซ์บางส่วน โดยมีส่วนของ E_s เป็นส่วนใหญ่และเนื่องจากลำแสงตกกระทบมีการแบ่งพลังงานให้แก่ E_p กับ E_s เท่า ๆ กันดังนั้นจะได้ว่าลำแสงหักเหเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มี E_p เป็นส่วนใหญ่

ถ้าการสั่นของอิเล็กตรอนอยู่ในแนวเดียวกับลำแสงสะท้อน จะไม่พบ E_p ในลำแสงสะท้อนเลย ลำแสงสะท้อนจึงเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นในแบบ TE ส่วนลำแสงหักเหจะเป็นแสงโพลาไรซ์บางส่วนอยู่ ลำแสงสะท้อนกับลำแสงหักเหจะตั้งฉากกัน ดังภาพที่ 25(3)มุมตกกระทบที่ทำให้แสงสะท้อนเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นนี้เรียกว่า มุมโพลาไรซ์หรือมุมบริวสเตอร์ (Polarizing or Brewster's angle, Sir David Brewster ค.ศ. 1781-1868) θ_p และโดยการใช้กฎของสเนลล์ จะได้ว่า

$$n_1 \sin \theta_p = n_2 \sin \theta_r$$

เนื่องจาก $\theta_r = 90^\circ - \theta_p$

จึงสามารถหาได้ว่า $\theta_p = \tan^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$ (64)



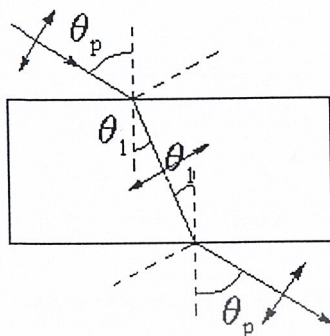
รูปที่ 26 แสดงโพลาริเซชันที่ซ้อนกันหลายๆ ชั้น

มุมบริวสเตอร์นี้มีทั้งการสะท้อนกลับภายนอก ($n_2 > n_1$) และการสะท้อนภายใน ($n_2 < n_1$) ทั้งสองกรณีมีค่ามุมไม่เท่ากัน เช่น ในกรณีของอากาศกับแก้ว ถ้าแสงเคลื่อนที่จากอากาศไปยังแก้วซึ่งมี $n = 1.50$ จะได้ $\theta_p = 56.3^\circ$ ส่วนกรณีของการสะท้อนที่เกิดเมื่อแสงเคลื่อนที่จากแก้วไปอากาศจะได้ $\theta_p = 33.7^\circ$ สังเกตได้ว่ามุมทั้งสองนี้เป็นมุมร่วมมุมฉากกัน คือ รวมกันได้ 90° ทั้งนี้เป็นผลมาจากนิยามของมุมบริวสเตอร์นั่นเอง

อย่างไรก็ตาม การทำให้เกิดแสงโพลาริเซชันเชิงเส้นด้วยวิธีการสะท้อนนี้มีประสิทธิภาพไม่ค่อยดีนัก เนื่องจากพบว่ามีเพียงประมาณ 15% ของ E_s ในลำแสงสะท้อน การเพิ่มประสิทธิภาพสามารถทำได้โดยทำโพลาริเซชันให้เป็นชั้น ๆ ดังรูปที่ 26 การสะท้อนด้วยมุมบริวสเตอร์หลายๆ ครั้งจากแต่ละชั้นนี้ นอกจากนั้นจะเป็นการเพิ่มความเข้มของ E_s ในลำแสงสะท้อนแล้ว ยังเป็นการทำให้ลำแสงหักเหที่ทะลุผ่านออกไปมีค่าน้อยลงเรื่อย ๆ จนหมดไปในที่สุด โดยปกติแล้วโพลาริเซชันประเภทนี้จะเหมาะกับการใช้งานในย่านอัลตราไวโอเล็ตและอินฟราเรด ซึ่งในย่านนี้สารพวกไดโครอิกและเคลือบผิวไม่ค่อยเหมาะในการนำมาใช้

การนำหลักการทำให้เกิดโพลาริเซชัน โดยการสะท้อนไปใช้ประโยชน์ที่น่าสนใจอีกประเภทหนึ่งได้แก่ หน้าต่างบริวสเตอร์ (Brewster window) หลักการทำงานของหน้าต่างนี้แสดงในรูปที่ 27 ถ้าให้แสงโพลาริเซชันเชิงเส้นใน TM mode ตกกระทบด้วยมุมบริวสเตอร์แสงทั้งหมดจะทะลุผ่านเข้าไปในหน้าต่าง และเนื่องจากมุมตกกระทบในหน้าต่าง θ_p นั้นจะเป็นมุมบริวสเตอร์สำหรับการสะท้อนภายใน ดังนั้น TM mode ทั้งหมดจึงทะลุผ่านไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 27 แสดงหลักการของหน้าต่างปริสเตอร์

ในเลเซอร์แก๊สจะมีการบรรจุไว้ในหลอดที่มีปลายทั้งสองเป็นหน้าต่างปริสเตอร์เมื่อแสงสะท้อนกลับไปกลับมาที่กระจกทั้งสองนี้ จะมีเฉพาะ TM mode ผ่านออกไปได้ TE mode จะสะท้อนกลับและหมดไปในที่สุด ทำให้ได้ลำแสงเลเซอร์ออกมาเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นใน TM mode เท่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

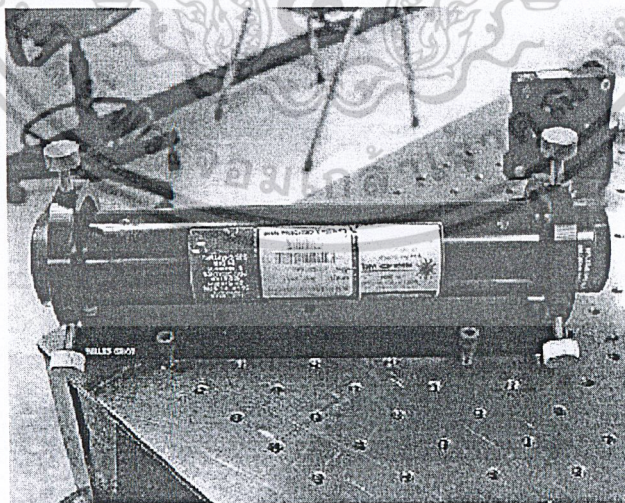
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ในการทดลองต่างๆได้แบ่งออกเป็นขั้นตอนดังนี้

- ศึกษาทฤษฎีและหลักการของ Ellipsometry
- ออกแบบและสร้างชุดทดลองเครื่อง Ellipsometer ความยาวคลื่นเดี่ยว
- จัดเตรียมอุปกรณ์และทำการประกอบอุปกรณ์ตามที่ได้ออกแบบไว้
- ทำการทดลองวัดคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง

3.2 การจัดเตรียมอุปกรณ์

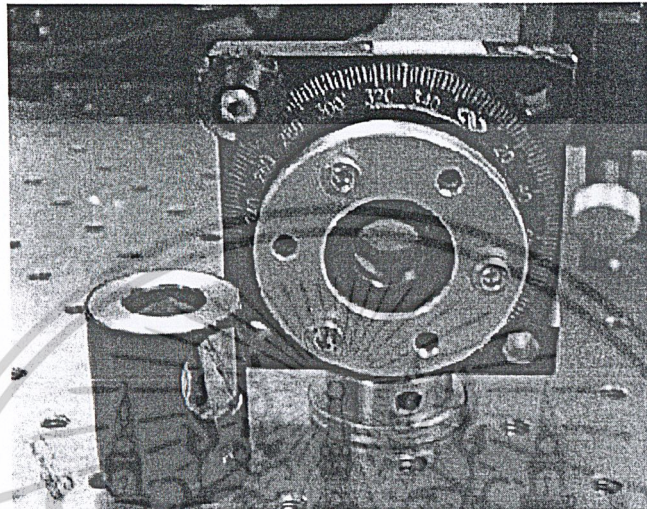
- Light source (HeNe Laser)



รูปที่ 28 อุปกรณ์แหล่งกำเนิดแสง He Ne Laser

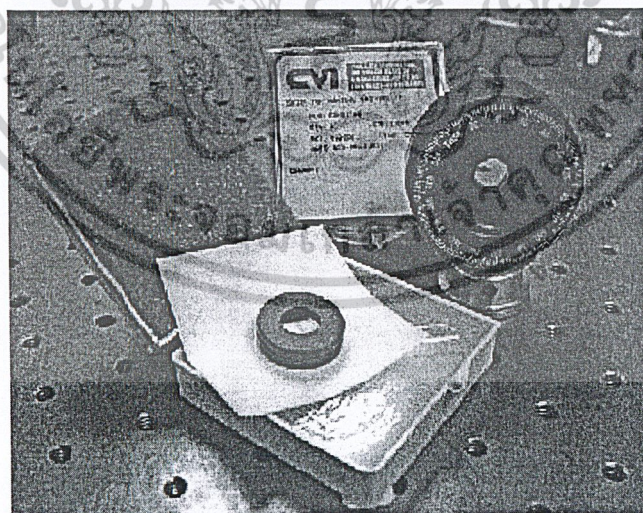
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Polarizing prism
- Analyzer prism



รูปที่ 29 อุปกรณ์ Polarizing prism

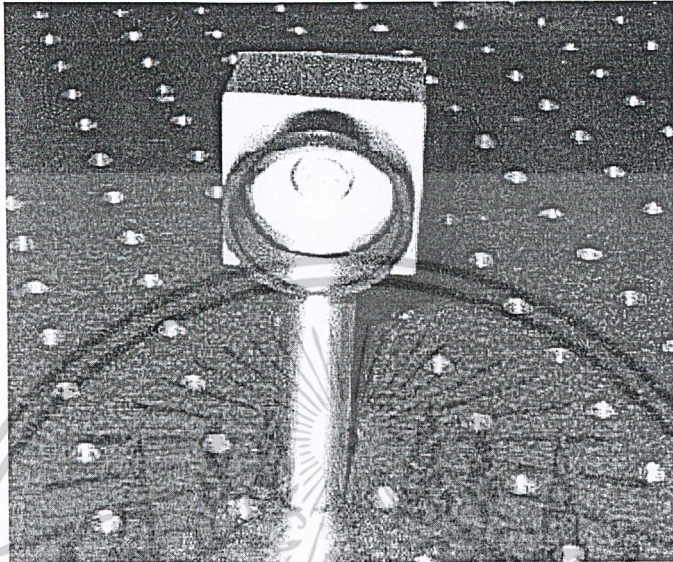
- Quarter wave plate compensator



รูปที่ 30 อุปกรณ์ Quarter wave plate compensator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

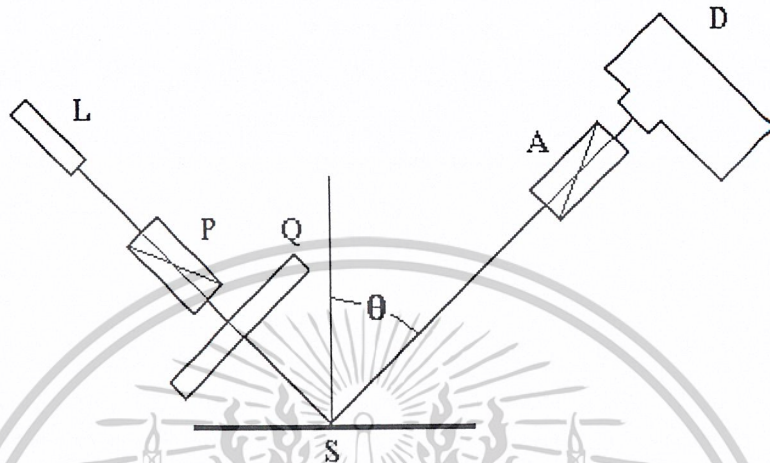
- Photo detector



รูปที่ 31 อุปกรณ์ Photo detector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การจัดชุดอุปกรณ์สร้างเครื่อง Ellipsometer



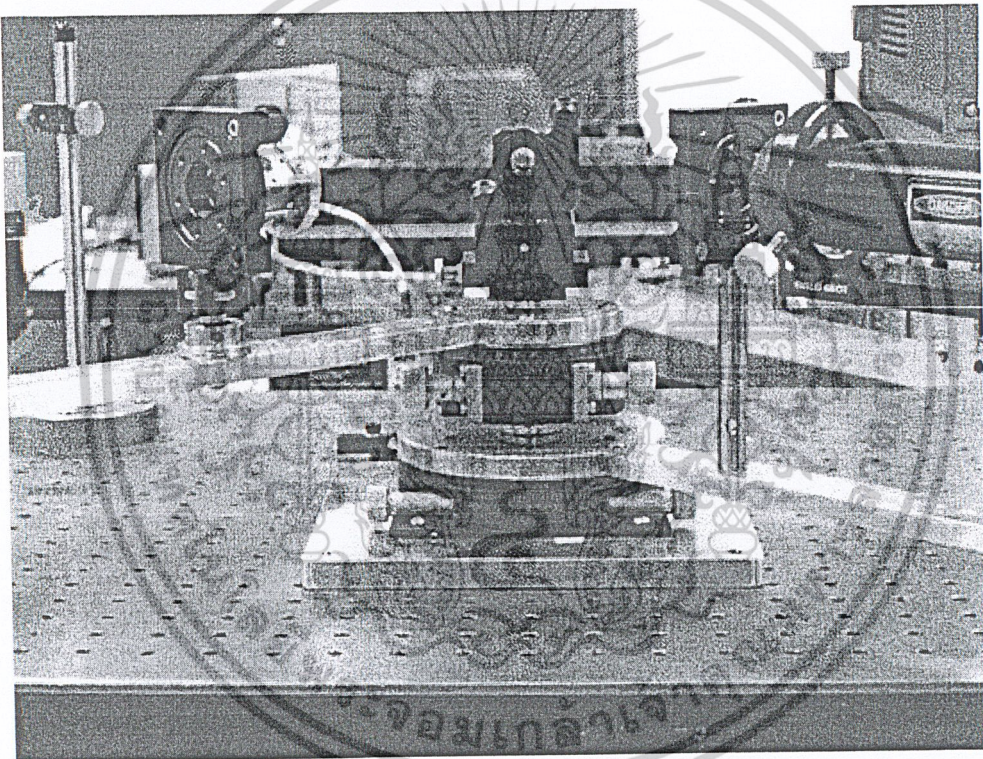
รูปที่ 32 แผนภาพของการจัดวางอุปกรณ์ของเครื่อง Ellipsometer, L = light source, P = polarizing prism, Q = quarter wave plate compensator, S = ตัวอย่างที่ใช้ศึกษา, A = analyzer prism, D = Photo detector

รูปที่ 32 แสดงแผนภาพพื้นฐานของเครื่อง Ellipsometer ที่แสดงการทำมุมตกกระทบและสะท้อน, L แทนแหล่งกำเนิดแสงสีเดียวที่ไม่โพลาไรซ์ซึ่งทำให้ขนานกับลำแสงเล็กที่ลู่ออกมา อุปกรณ์ Polarizing prism (P) วางอยู่ต่อจากแหล่งกำเนิดแสงเพื่อทำให้แสงเมื่อผ่าน Polarizing prism ออกมาเป็นแสง Linear polarized ต่อมานำอุปกรณ์ Compensator (Q) มาวางต่อบนแนวลำแสงที่ออกจาก Polarizing prism, Compensator ที่มีคุณสมบัติสูงเป็นหัวใจสำคัญของเครื่อง Ellipsometer ที่ดี ในทางอุดมคติเราต้องการ quarter-wave plate ที่สมบูรณ์เพื่อทำให้ค่าที่วัดมีความแม่นยำมากขึ้น, ในเครื่อง Ellipsometer ที่สร้างขึ้นนี้ได้ใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็น HeNe Laser ซึ่งแสงที่ออกมาเป็นแสง Linear polarized อยู่แล้ว เราจึงนำอุปกรณ์ Compensator มาวางต่อบนแนวลำแสงได้, S คือตัวอย่างที่นำมาศึกษา ในการศึกษาสภาวะแวดล้อมของตัวอย่างขึ้นอยู่กับขอบเขตบางอย่างที่เราพยายามที่จะวัด ถ้าเราสนใจค่าคงที่ทางแสงที่วัดได้จากพื้นผิวที่บริสุทธิ์แล้วตัวอย่างจะต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่สะอาด (ไม่มีฝุ่น) เป็นต้น อย่างไรก็ตามตัวอย่างจะต้องมีพื้นผิวแบนเรียบเป็นเงาวาวที่สามารถทำให้เกิดการสะท้อนของแสงได้อันเป็นปัจจัยสำคัญในการได้มาของค่าและข้อมูลทาง Ellipsometric ที่สำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ที่วางต่อมาจากตัวอย่างคือ Analyzer prism (A) โดยที่มุมของ Analyzer prism เป็นการวัดอีกครั้งในแนวที่ลำแสงกระทบกับแนวที่ Analyzer prism ขอมให้แสงผ่านได้ โดยใช้ Photo detector (D) วัดความเข้มแสงหลังจากผ่าน Analyzer prism นำไปวิเคราะห์ผลต่อไป

เครื่อง Ellipsometer เป็นการวัดหาค่าคุณสมบัติทางแสงโดยการปรับอุปกรณ์ทั้งสาม Polarizer, Compensator และ Analyzer เพื่อที่จะทำให้ความเข้มของแสงที่ไปถึงตัววัดความเข้มแสง มีค่าเป็นศูนย์ได้ ถ้าปรับแกน fast axis ของ Compensator ทำมุม $\pm 45^\circ$ แล้วเราจะยังคงหาค่าความเข้มแสงที่น้อยที่สุดในการวัดค่าความเข้มแสงหลังแสงผ่าน Analyzer โดยการปรับ P และ A



รูปที่ 33 เครื่อง Ellipsometer ที่สร้างขึ้นในโรงงานพิเศษ

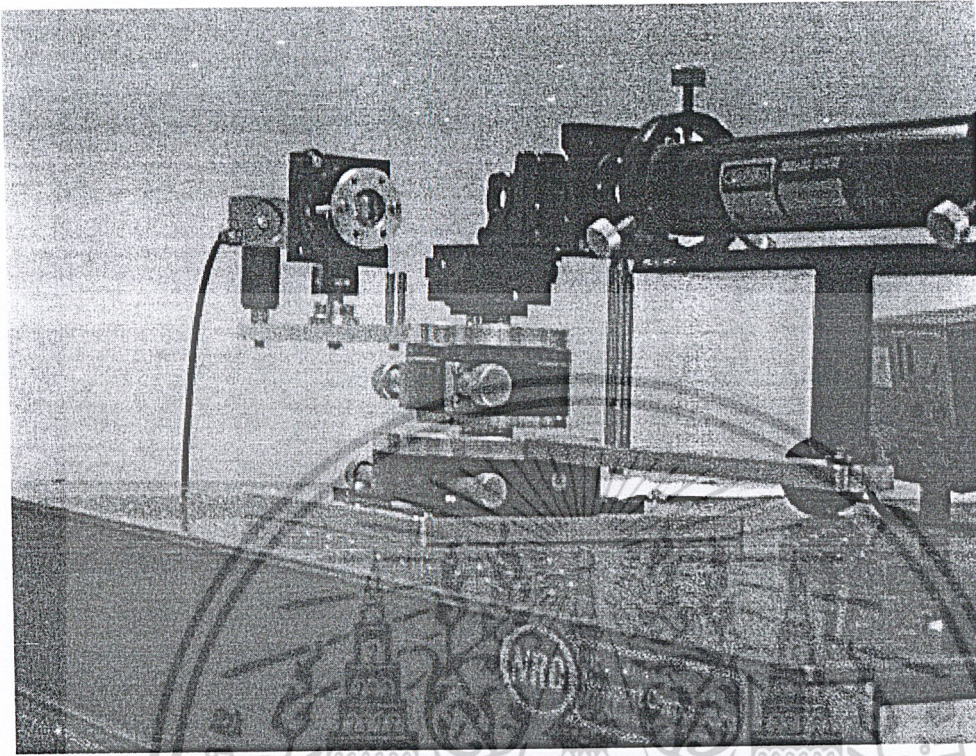
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

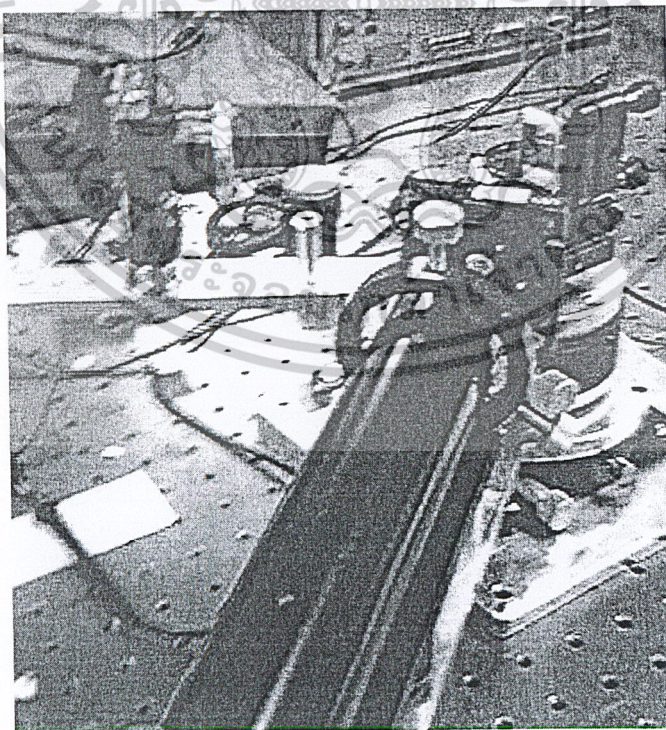
ในการวัดหาค่าความเข้มแสงที่น้อยที่สุด(null-intensity) ที่แนวของลำแสงทำมุมตกกระทบต่างๆ ของเครื่อง Ellipsometer ชนิดปรับมุมได้ มีลำดับขั้นตอนการทดลองวัดดังนี้

- 1) หลังจากทำการติดตั้งอุปกรณ์ให้ทำการ Alignment ชุดอุปกรณ์ โดยให้ระนาบการสั่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเริ่มต้นที่ออกมาจาก He Ne Laser ขนานกับระนาบตกกระทบ, แกน fast axis ของ Compensator ขนานกับระนาบการสั่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเริ่มต้นที่ออกมาจาก He Ne Laser และ แนวที่ยอมให้แสงผ่านของ Analyzer ขนานกับระนาบการสั่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเริ่มต้นที่ออกมาจาก He Ne Laser ด้วยเช่นกัน
- 2) แกนแนวทำมุมตกกระทบ 35° กับตัวอย่างที่นำมาหาค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน ในโครงการพิเศษนี้ ได้ใช้ตัวอย่างเป็นแก้วแผ่นสไลด์ที่มีค่าดัชนีหักเหประมาณ 1.5
- 3) ปรับแกน fast axis ของ Quarter wave plate (C) กำหนดให้เป็น 45° จากแนวแกนเริ่มต้นที่ Alignment
- 4) ปรับแนวแกนที่ยอมให้แสงผ่านของ Polarizer ทีละ 5° จนถึง 45° (ในเครื่อง Ellipsometer ที่สร้างขึ้นในโครงการพิเศษนี้จะเป็นการปรับที่ตัว Quarter wave plate) โดยแต่ละครั้งที่ทำการปรับ Polarizer เราปรับแนวแกนที่ยอมให้แสงผ่านของ Analyzer ทีละ 15° จนถึง 180° เพื่อดูค่าความเข้มแสงช่วงไหนที่ทำให้แนวโน้มค่าความเข้มแสงมีค่าน้อยสุด
- 5) นำช่วงที่ให้แนวโน้มค่าความเข้มแสงที่มีค่าน้อยสุดมาปรับอย่างละเอียดทีละองศา
- 6) นำค่าที่ได้จากการปรับมุม Polarizer (P) และ Analyzer (A) ที่ให้ค่าความเข้มแสงน้อยที่สุดไปแทนค่าในสมการ (27) เพื่อหาค่า ρ และค่า n ของตัวอย่าง ในสมการ (40), ในการทดลอง กำหนดให้ $C = 45^\circ$ ตลอดการทดลอง
- 7) แกนแนวทำมุมตกกระทบ $45^\circ, 55^\circ$ และ 65° และทำตามขั้นตอนที่ 3 ถึง 6
- 8) นำค่า n ที่ได้จากการทดลองมาสอบเทียบกับค่าจริงและสรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 34 แสดงการ Alignment เครื่อง Ellipsometer



รูปที่ 35 แสดงการวัดแบบปรับมุมตกกระทบของเครื่อง Ellipsometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

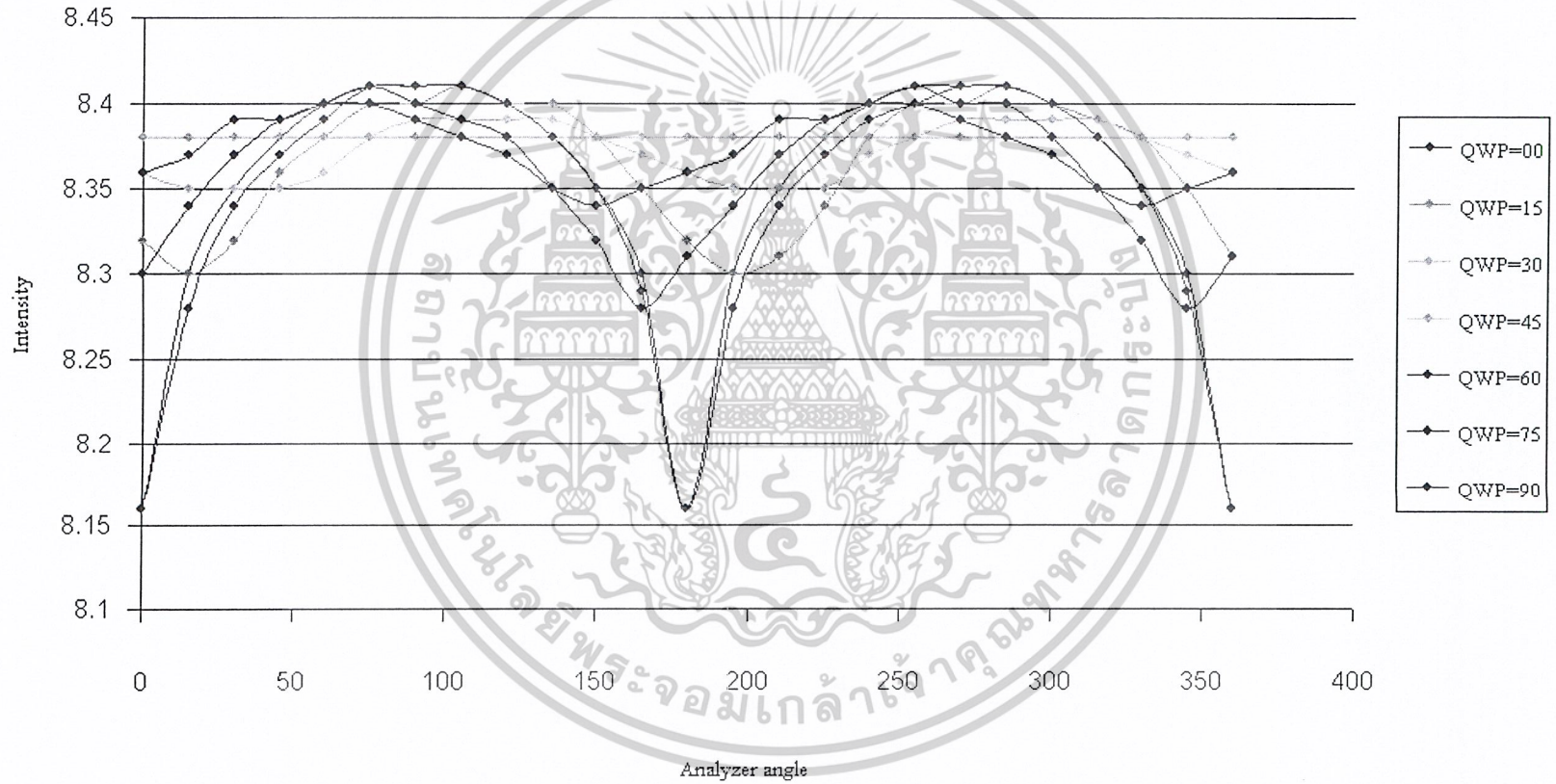
4.1 ผลการทดลองการ Alignment System of Ellipsometer

Analyzer	QWP=00	QWP=15	QWP=30	QWP=45	QWP=60	QWP=75	QWP=90
0	8.16	8.32	8.36	8.38	8.36	8.3	8.16
15	8.3	8.3	8.35	8.38	8.37	8.34	8.28
30	8.35	8.32	8.35	8.38	8.39	8.37	8.34
45	8.38	8.36	8.35	8.38	8.39	8.39	8.37
60	8.4	8.38	8.36	8.38	8.4	8.4	8.39
75	8.41	8.4	8.38	8.38	8.4	8.41	8.41
90	8.41	8.4	8.39	8.38	8.39	8.4	8.41
105	8.41	8.41	8.39	8.38	8.38	8.39	8.41
120	8.4	8.4	8.39	8.38	8.37	8.38	8.4
135	8.38	8.4	8.39	8.38	8.35	8.35	8.38
150	8.35	8.38	8.38	8.38	8.34	8.32	8.35
165	8.29	8.35	8.37	8.38	8.35	8.28	8.3
180	8.16	8.32	8.36	8.38	8.36	8.31	8.16
195	8.3	8.3	8.35	8.38	8.37	8.34	8.28
210	8.35	8.31	8.35	8.38	8.39	8.37	8.34
225	8.38	8.34	8.35	8.38	8.39	8.39	8.37
240	8.4	8.38	8.37	8.38	8.4	8.4	8.39
255	8.41	8.4	8.38	8.38	8.4	8.41	8.4
270	8.41	8.4	8.39	8.38	8.39	8.4	8.41
285	8.41	8.41	8.39	8.38	8.38	8.4	8.41
300	8.4	8.4	8.39	8.38	8.37	8.38	8.4
315	8.38	8.39	8.39	8.38	8.35	8.35	8.38
330	8.35	8.38	8.38	8.38	8.34	8.32	8.35
345	8.3	8.35	8.37	8.38	8.35	8.28	8.29
360	8.16	8.31	8.36	8.38	8.36	8.31	8.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Alignment system of Ellipsometer



4.2 ผลการทดลองการวัดหาค่า Complex reflection index

ตารางผลการทดลองหาแนวโน้มค่าความเข้มแสงต่ำสุดที่มุมตกกระทบ 35°

Analyzer	P = 0	P = 5	P = 10	P = 15	P = 20	P = 25	P = 30	P = 35	P = 40	P = 45
0	8.24	8.24	8.24	8.23	8.24	8.24	8.25	8.25	8.25	8.26
15	8.25	8.25	8.25	8.25	8.26	8.26	8.27	8.27	8.27	8.27
30	8.26	8.26	8.26	8.26	8.27	8.27	8.28	8.28	8.28	8.28
45	8.26	8.26	8.26	8.27	8.27	8.27	8.28	8.28	8.28	8.28
60	8.26	8.26	8.26	8.27	8.27	8.27	8.28	8.28	8.28	8.28
75	8.25	8.26	8.26	8.26	8.27	8.27	8.27	8.27	8.27	8.27
90	8.24	8.25	8.25	8.25	8.26	8.26	8.26	8.26	8.25	8.25
105	8.23	8.23	8.24	8.24	8.24	8.24	8.24	8.23	8.22	8.22
120	8.22	8.22	8.22	8.22	8.21	8.21	8.2	8.19	8.17	8.15
135	8.21	8.21	8.2	8.2	8.18	8.17	8.14	7.65	6.35	7.73
<u>150</u>	<u>8.21</u>	<u>8.21</u>	<u>8.2</u>	<u>8.19</u>	<u>8.18</u>	<u>8.16</u>	<u>8.13</u>	<u>5.61</u>	<u>3.53</u>	<u>6.21</u>
165	8.22	8.21	8.2	8.2	8.19	8.18	8.18	8.19	8.19	8.2
180	8.23	8.23	8.22	8.22	8.21	8.22	8.22	8.23	8.23	8.24

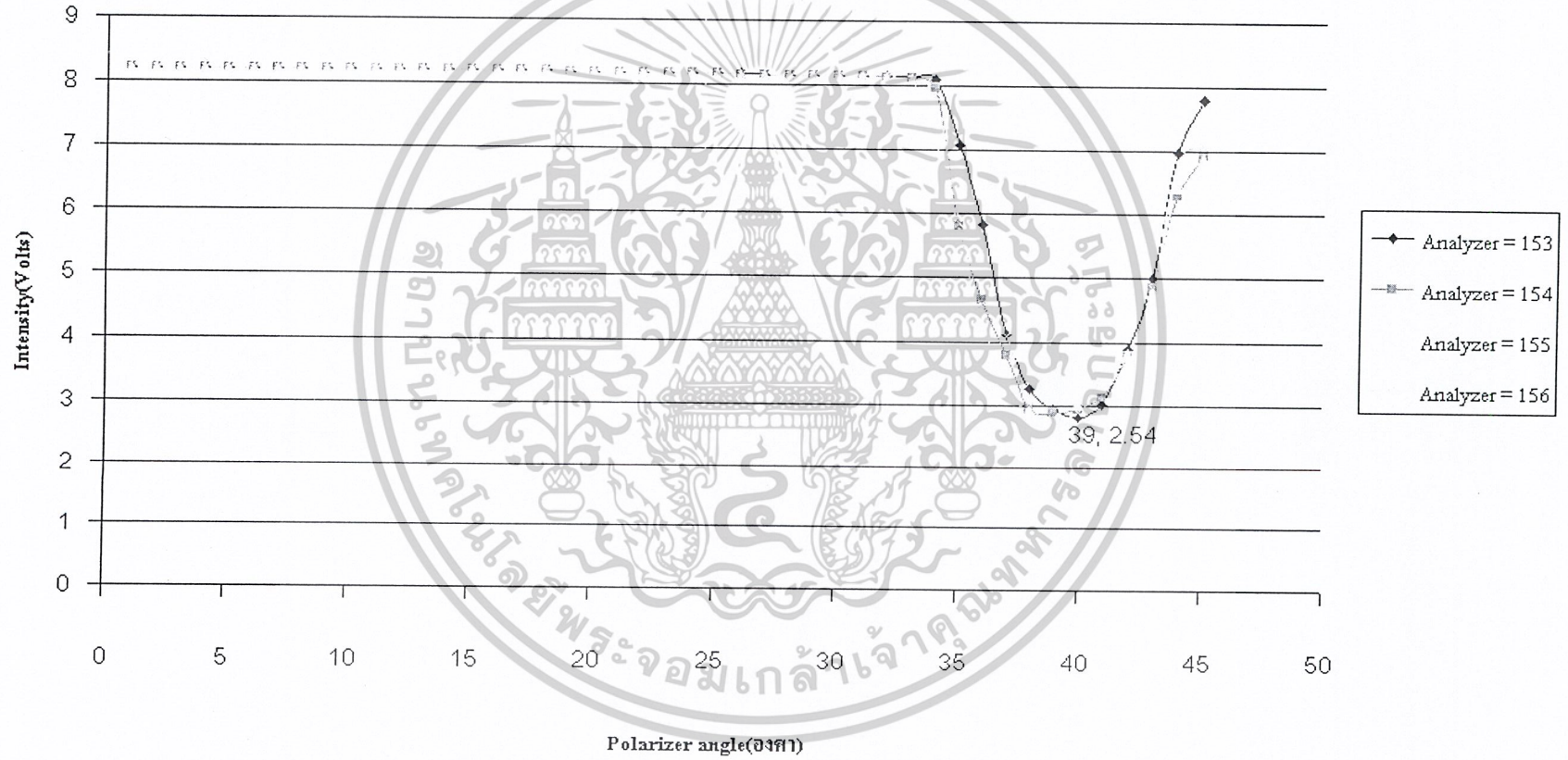
ตารางหาค่าความเข้มแสงที่มีค่าน้อยที่สุดที่มุมตกกระทบ 35°

Polarizer	Analyzer= 153	Analyzer= 154	Analyzer= 155	Analyzer=156
1	8.21	8.21	8.21	8.21
2	8.21	8.21	8.21	8.21
3	8.21	8.21	8.21	8.21
4	8.21	8.21	8.21	8.21
5	8.21	8.21	8.21	8.21
6	8.21	8.2	8.2	8.2
7	8.2	8.2	8.2	8.2
8	8.2	8.2	8.2	8.2
9	8.2	8.2	8.2	8.2
10	8.2	8.2	8.2	8.2
11	8.2	8.2	8.2	8.2
12	8.2	8.2	8.2	8.2
13	8.2	8.2	8.19	8.2
14	8.19	8.19	8.19	8.19
15	8.19	8.19	8.19	8.19
16	8.19	8.19	8.19	8.19
17	8.19	8.19	8.19	8.19
18	8.19	8.19	8.19	8.19
19	8.18	8.18	8.18	8.18
20	8.18	8.18	8.18	8.18
21	8.18	8.18	8.18	8.18
22	8.18	8.18	8.18	8.18
23	8.17	8.17	8.17	8.17
24	8.17	8.17	8.17	8.17
25	8.17	8.17	8.17	8.17
26	8.17	8.16	8.16	8.16
27	8.16	8.16	8.16	8.16
28	8.16	8.16	8.16	8.16
29	8.15	8.15	8.15	8.15
30	8.15	8.15	8.15	8.14
31	8.15	8.14	8.14	8.13
32	8.14	8.13	8.13	8.12
33	8.13	8.12	8.11	8.11
34	8.11	7.98	7.14	7.85
35	7.08	5.81	5.68	5.87
36	5.83	4.66	4.37	4.59
37	4.11	3.78	3.2	4.08
38	3.27	2.95	2.91	2.98
39	2.95	2.88	2.54	2.78
40	2.82	2.94	3.02	2.89
41	3.01	3.13	3.28	3.45
42	3.89	3.79	3.82	3.82
43	5.02	4.86	4.79	4.86
44	6.98	6.31	6.42	6.87
45	7.8	6.9	6.88	7.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเข้มแสงที่มุมตกกระทบ 35 องศา



จากผลการทดลองที่มุมตกกระทบ (i) = 35° จะได้ $A = 153^\circ$, $P = 39^\circ$, $C = 45^\circ$

แทนค่าใน
$$\rho = \frac{\tan A(\tan C + a_c \tan(P - C))}{a_c \tan C \tan(P - C) - 1}$$

จะได้
$$\rho = \frac{\tan 153(\tan 45 + i \tan(39 - 45))}{i \tan 45 \tan(39 - 45) - 1}$$

$$\rho = \frac{-0.509(1 - 0.1051i)}{-0.1051i - 1}$$

ค่า $\rho = 0.4984 - 0.0969i$

แทนค่า ρ ใน
$$\frac{n_2}{n_1} = \tan i \left[1 - \frac{4\rho}{(1 + \rho)^2} \sin^2 i \right]^{\frac{1}{2}}$$
 เมื่อ $i = 35^\circ$, $n_1 = 1$, $\rho = 0.4984$

จะได้
$$n_2 = \tan 35 \left[1 - \frac{4 \times 0.4984}{(1 + 0.4984)^2} \sin^2 35 \right]^{\frac{1}{2}}$$

ค่า $n_2 = 1.33$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองหาแนวโน้มค่าความเข้มแสงต่ำสุดที่มุมตกกระทบ 45°

Analyzer	P=0	P=5	P=10	P=15	P=20	P=25	P=30	P=35	P=40	P=45
0	8.22	8.22	8.23	8.23	8.23	8.24	8.24	8.24	8.25	8.25
15	8.26	8.26	8.27	8.27	8.28	8.28	8.28	8.29	8.29	8.29
30	8.29	8.29	8.29	8.3	8.3	8.31	8.31	8.31	8.31	8.31
45	8.3	8.3	8.31	8.31	8.32	8.32	8.32	8.33	8.33	8.32
60	8.31	8.31	8.32	8.32	8.33	8.33	8.33	8.34	8.34	8.34
75	8.31	8.31	8.32	8.32	8.33	8.33	8.34	8.34	8.34	8.34
90	8.31	8.31	8.32	8.32	8.32	8.33	8.33	8.34	8.34	8.34
105	8.3	8.3	8.31	8.31	8.32	8.32	8.32	8.32	8.33	8.33
120	8.28	8.28	8.29	8.29	8.3	8.3	8.3	8.31	8.31	8.32
135	8.25	8.26	8.26	8.26	8.27	8.27	8.27	8.28	8.27	8.28
150	8.22	8.22	8.21	8.21	8.2	8.2	8.2	8.19	8.19	8.19
<u>165</u>	<u>8.19</u>	<u>8.19</u>	<u>8.19</u>	<u>8.18</u>	<u>8.17</u>	<u>8.15</u>	<u>8.1</u>	<u>5.2</u>	<u>2.98</u>	<u>2.12</u>
180	8.22	8.22	8.23	8.23	8.23	8.23	8.23	8.24	8.25	8.25

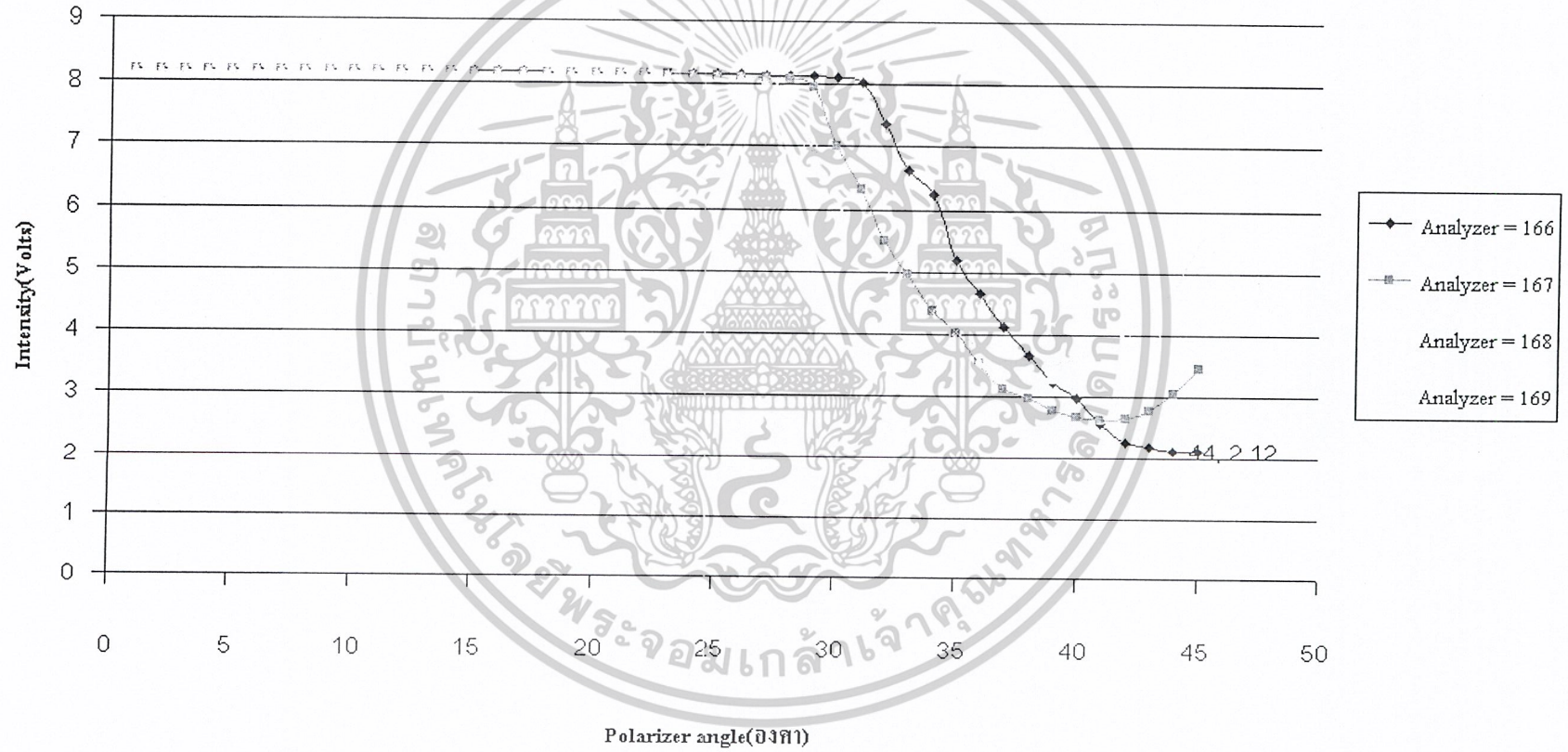
ตารางหาค่าความเข้มแสงที่มีค่าน้อยที่สุดที่มุมตกกระทบ 45°

Polarizer	Analyzer= 166	Analyzer= 167	Analyzer= 168	Analyzer=169
1	8.19	8.19	8.19	8.19
2	8.19	8.19	8.19	8.19
3	8.19	8.19	8.19	8.19
4	8.19	8.19	8.19	8.19
5	8.19	8.19	8.19	8.19
6	8.19	8.19	8.19	8.19
7	8.19	8.19	8.19	8.19
8	8.19	8.19	8.19	8.19
9	8.19	8.18	8.18	8.18
10	8.18	8.18	8.18	8.18
11	8.18	8.18	8.18	8.18
12	8.18	8.18	8.18	8.18
13	8.18	8.18	8.18	8.18
14	8.18	8.18	8.18	8.18
15	8.18	8.17	8.17	8.17
16	8.18	8.17	8.17	8.17
17	8.18	8.17	8.17	8.17
18	8.17	8.17	8.17	8.17
19	8.17	8.17	8.16	8.16
20	8.17	8.16	8.16	8.16
21	8.17	8.16	8.15	8.15
22	8.16	8.16	8.15	8.15
23	8.16	8.15	8.14	8.14
24	8.16	8.14	8.13	8.13
25	8.15	8.13	8.12	8.12
26	8.15	8.12	8.11	8.11
27	8.14	8.1	8.08	8.05
28	8.14	8.09	7.39	7.79
29	8.13	7.96	6.78	6.97
30	8.1	7.01	6.09	6.14
31	8.04	6.33	5.66	5.63
32	7.37	5.51	5.11	5.28
33	6.63	4.97	4.67	4.88
34	6.25	4.39	4.24	4.37
35	5.2	4.03	3.92	4.06
36	4.66	3.54	3.58	3.8
37	4.12	3.13	3.44	3.6
38	3.66	2.99	3.35	3.55
39	3.23	2.78	3.31	3.54
40	2.98	2.68	3.37	3.63
41	2.58	2.63	3.52	3.79
42	2.26	2.66	3.64	4.05
43	2.2	2.78	3.83	4.4
44	2.12	3.05	4.29	4.76
45	2.12	3.46	4.62	5.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเข้มแสงที่มุมตกกระทบ 45 องศา



จากผลการทดลองที่มุมตกกระทบ (i) = 45° จะได้ $A = 166^\circ$, $P = 44^\circ$, $C = 45^\circ$

แทนค่าใน
$$\rho = \frac{\tan A(\tan C + a_c \tan(P - C))}{a_c \tan C \tan(P - C) - 1}$$

จะได้
$$\rho = \frac{\tan 166(\tan 45 + i \tan(44 - 45))}{i \tan 45 \tan(44 - 45) - 1}$$

$$\rho = \frac{-0.2493(1 - 0.0175i)}{-0.0175i - 1}$$

ค่า $\rho = 0.2491 - 0.0087i$

แทนค่า ρ ใน
$$\frac{n_2}{n_1} = \tan i \left[1 - \frac{4\rho}{(1 + \rho)^2} \sin^2 i \right]^{\frac{1}{2}}$$
 เมื่อ $i = 45$, $n_1 = 1$, $\rho = 0.2491$

จะได้
$$n_2 = \tan 45 \left[1 - \frac{4 \times 0.2493}{(1 + 0.2493)^2} \sin^2 45 \right]^{\frac{1}{2}}$$

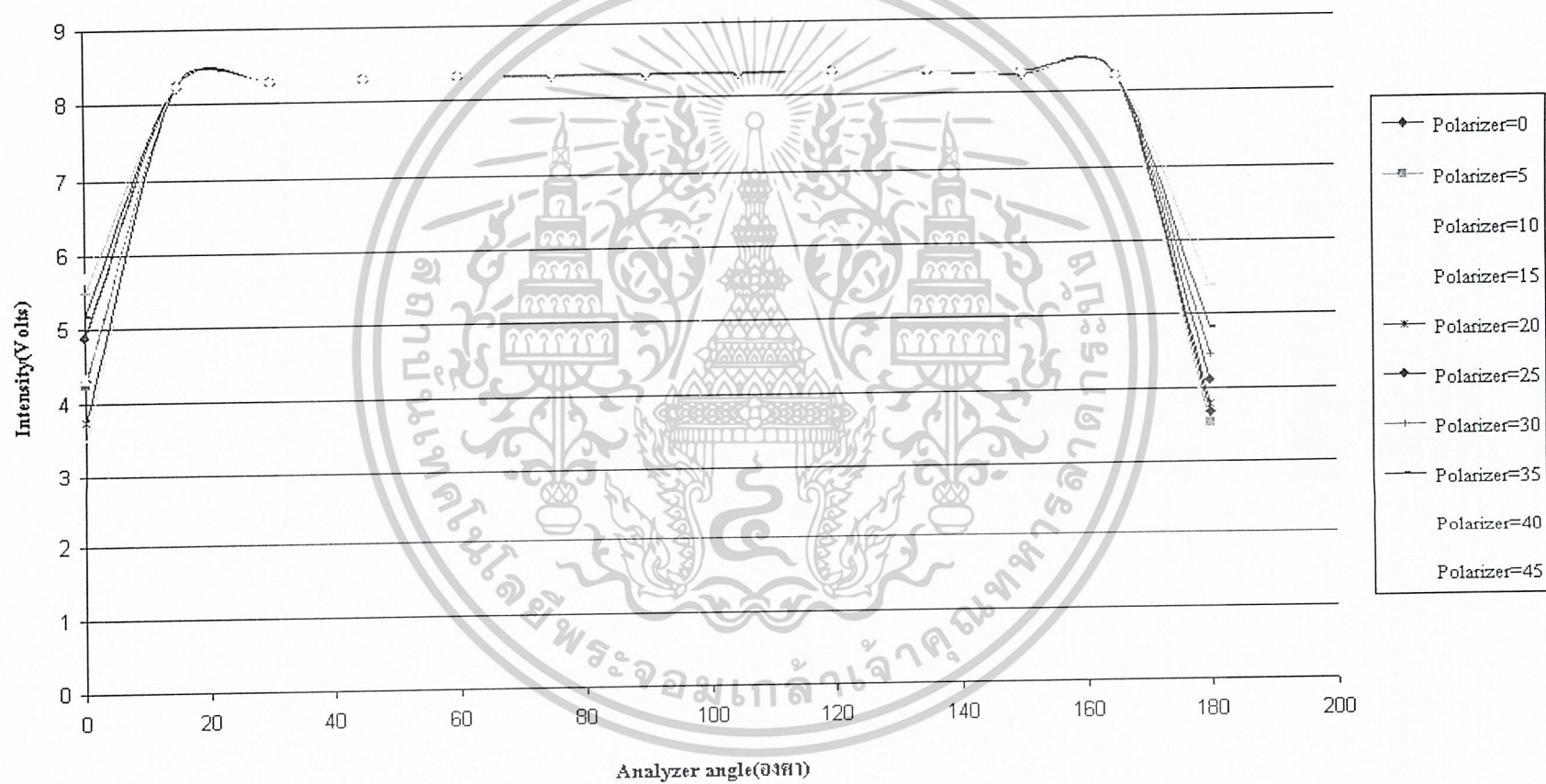
ค่า $n_2 = 1.37$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดสอบหาแนวโน้มค่าความเข้มแสงต่ำสุดที่มุมตกกระทบ 55°

Analyzer	P=0	P=5	P=10	P=15	P=20	P=25	P=30	P=35	P=40	P=45
0	4.32	4.24	4.33	3.48	3.75	4.87	4.9	5.18	5.49	5.71
15	8.22	8.22	8.23	8.23	8.23	8.24	8.24	8.24	8.25	8.25
30	8.26	8.26	8.27	8.27	8.28	8.28	8.28	8.29	8.29	8.29
45	8.29	8.29	8.29	8.3	8.3	8.31	8.31	8.31	8.31	8.31
60	8.3	8.3	8.31	8.31	8.32	8.32	8.32	8.33	8.33	8.32
75	8.31	8.31	8.32	8.32	8.33	8.33	8.33	8.34	8.34	8.34
90	8.31	8.31	8.32	8.32	8.33	8.33	8.34	8.34	8.34	8.34
105	8.31	8.31	8.32	8.32	8.32	8.33	8.33	8.34	8.34	8.34
120	8.3	8.3	8.31	8.31	8.32	8.32	8.32	8.32	8.33	8.33
135	8.28	8.28	8.29	8.29	8.3	8.3	8.3	8.31	8.31	8.32
150	8.25	8.26	8.26	8.26	8.27	8.27	8.27	8.28	8.27	8.28
165	8.2	8.2	8.2	8.22	8.22	8.22	8.22	8.22	8.22	8.21
<u>180</u>	<u>3.68</u>	<u>3.52</u>	<u>3.28</u>	<u>3.41</u>	<u>3.78</u>	<u>4.09</u>	<u>4.45</u>	<u>4.82</u>	<u>5.39</u>	<u>5.64</u>

ค่าความเข้มแสงที่มุมตกกระทบ 55 องศา



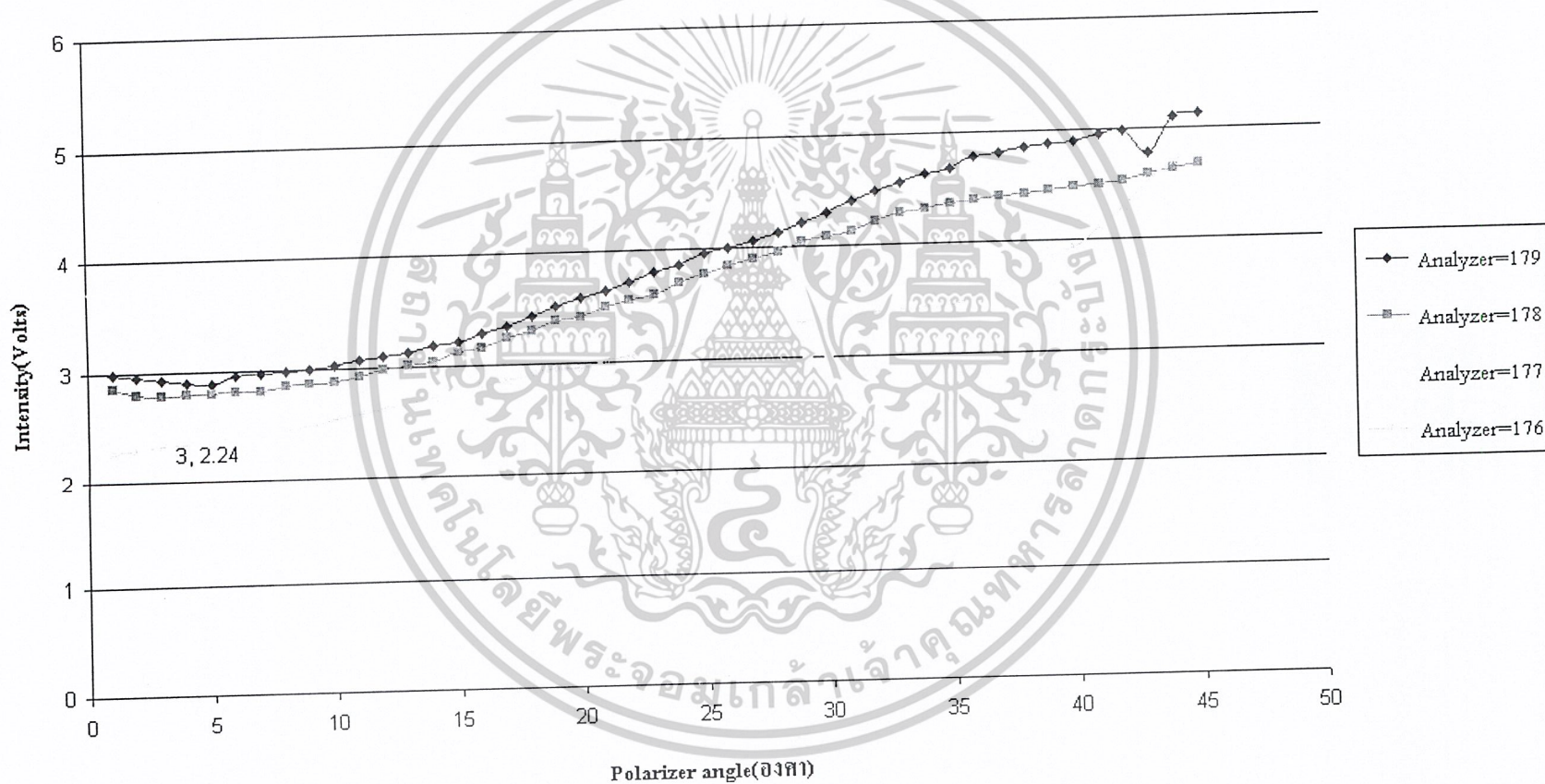
ตารางหาค่าความเข้มแสงที่มีค่าน้อยที่สุดที่มุมตกกระทบ 55°

Polarizer	Analyzer=179	Analyzer=178	Analyzer=177	Analyzer=176
1	2.99	2.85	2.25	2.27
2	2.95	2.8	2.26	2.29
3	2.93	2.79	2.24	2.32
4	2.9	2.8	2.24	2.34
5	2.89	2.8	2.25	2.37
6	2.96	2.81	2.25	2.39
7	2.97	2.82	2.26	2.42
8	2.98	2.86	2.29	2.46
9	3	2.87	2.31	2.48
10	3.03	2.89	2.33	2.54
11	3.07	2.93	2.36	2.58
12	3.1	2.98	2.38	2.62
13	3.13	3.01	2.4	2.67
14	3.18	3.05	2.43	2.72
15	3.22	3.13	2.46	2.77
16	3.28	3.16	2.69	2.82
17	3.34	3.24	2.52	2.86
18	3.43	3.3	2.55	2.91
19	3.51	3.39	2.6	2.95
20	3.59	3.41	2.65	2.96
21	3.65	3.5	2.67	3.01
22	3.72	3.56	2.7	3.06
23	3.81	3.61	2.76	3.1
24	3.86	3.7	2.8	3.14
25	3.96	3.78	2.85	3.19
26	4	3.84	2.88	3.23
27	4.06	3.91	2.91	3.27
28	4.13	3.96	2.96	3.3
29	4.22	4.05	2.99	3.32
30	4.31	4.09	3.03	3.36
31	4.4	4.14	3.06	3.37
32	4.5	4.22	3.09	3.39
33	4.56	4.29	3.12	3.4
34	4.63	4.32	3.17	3.43
35	4.68	4.36	3.24	3.45
36	4.78	4.39	3.26	3.51
37	4.81	4.42	3.27	3.63
38	4.85	4.44	3.29	3.72
39	4.88	4.47	3.31	3.9
40	4.9	4.5	3.34	3.94
41	4.95	4.51	3.36	4.12
42	4.98	4.53	3.39	4.29
43	4.78	4.6	3.41	4.54
44	5.1	4.64	3.45	4.7
45	5.13	4.68	3.51	4.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเข้มแสงที่มุมตกกระทบ 55 องศา



จากผลการทดลองที่มุมตกกระทบ (i) = 55° จะได้ $A = 177^\circ$, $P = 3^\circ$, $C = 45^\circ$

แทนค่าใน
$$\rho = \frac{\tan A(\tan C + a_c \tan(P - C))}{a_c \tan C \tan(P - C) - 1}$$

จะได้
$$\rho = \frac{\tan 177(\tan 45 + i \tan(3 - 45))}{i \tan 45 \tan(3 - 45) - 1}$$

$$\rho = \frac{-0.0524(1 - 0.9004i)}{-0.9004i - 1}$$

ค่า $\rho = 0.0055 - 0.0251i$

แทนค่า ρ ใน
$$\frac{n_2}{n_1} = \tan i \left[1 - \frac{4\rho}{(1 + \rho)^2} \sin^2 i \right]^{\frac{1}{2}}$$
 เมื่อ $i = 55^\circ$, $n_1 = 1$, $\rho = 0.0055$

จะได้
$$n_2 = \tan 55 \left[1 - \frac{4 \times 0.0055}{(1 + 0.0055)^2} \sin^2 55 \right]^{\frac{1}{2}}$$

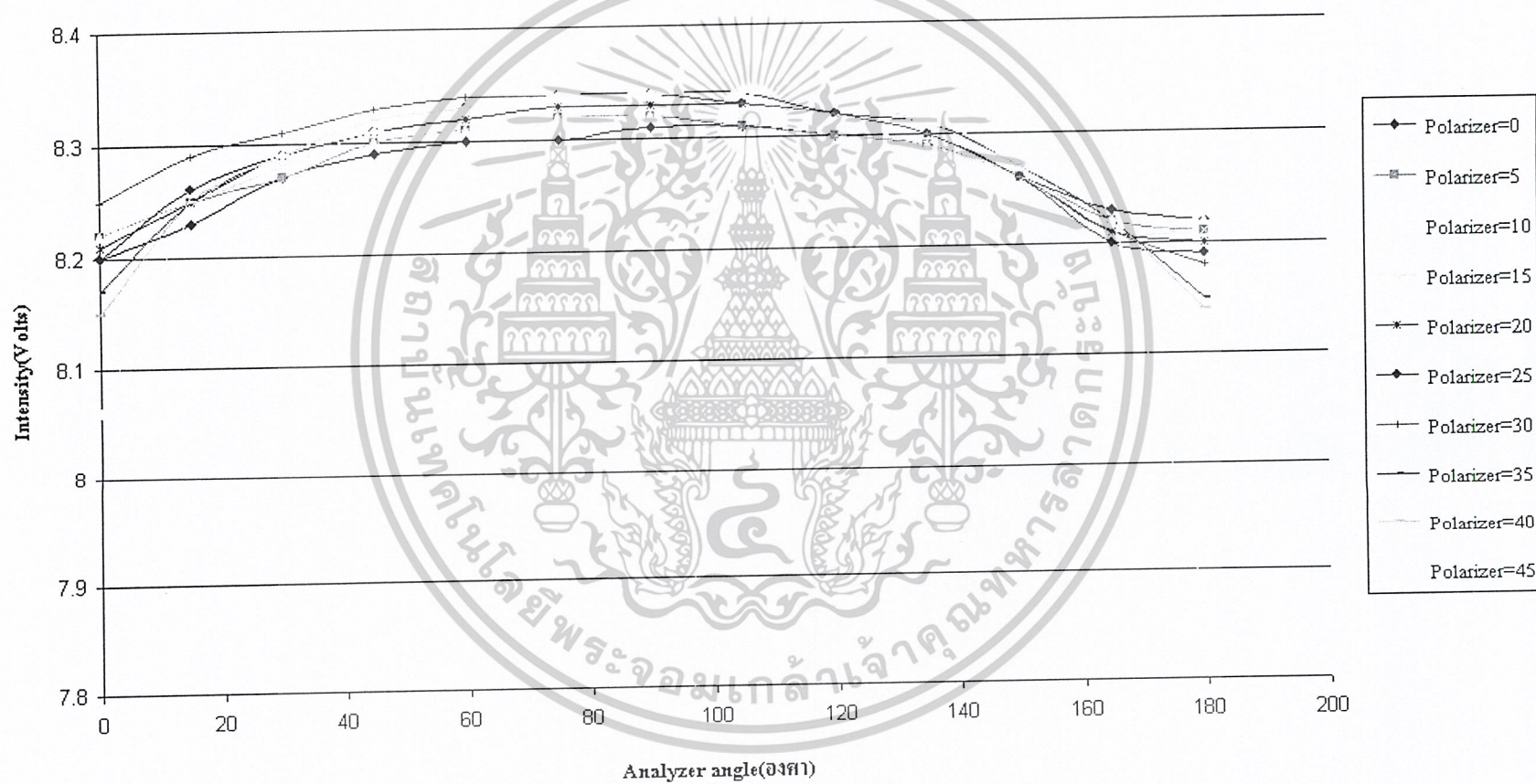
ค่า $n_2 = 1.449$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองหาแนวโน้มค่าความเข้มแสงต่ำสุดที่มุมตกกระทบ 65°

Analyzer	P=0	P=5	P=10	P=15	P=20	P=25	P=30	P=35	P=40	P=45
0	8.2	8.22	8.22	8.21	8.21	8.2	8.25	8.17	8.15	8.06
15	8.23	8.25	8.25	8.25	8.25	8.26	8.29	8.25	8.25	8.24
30	8.27	8.27	8.28	8.28	8.29	8.29	8.31	8.29	8.29	8.29
45	8.29	8.3	8.3	8.31	8.31	8.31	8.33	8.32	8.32	8.31
60	8.3	8.31	8.31	8.32	8.32	8.33	8.34	8.33	8.33	8.33
75	8.3	8.32	8.32	8.33	8.33	8.34	8.34	8.34	8.34	8.34
90	8.31	8.32	8.32	8.33	8.33	8.34	8.34	8.34	8.34	8.34
105	8.31	8.31	8.32	8.32	8.33	8.33	8.33	8.34	8.34	8.34
120	8.3	8.3	8.31	8.31	8.32	8.32	8.32	8.32	8.33	8.33
135	8.29	8.29	8.29	8.29	8.3	8.3	8.3	8.31	8.31	8.31
150	8.26	8.26	8.26	8.26	8.26	8.26	8.26	8.27	8.27	8.28
165	8.23	8.22	8.22	8.21	8.21	8.2	8.21	8.22	8.22	8.22
<u>180</u>	<u>8.22</u>	<u>8.21</u>	<u>8.22</u>	<u>8.21</u>	<u>8.2</u>	<u>8.19</u>	<u>8.18</u>	<u>8.15</u>	<u>8.14</u>	<u>7.85</u>

ค่าความเข้มแสงที่มุมตกกระทบ 65 องศา



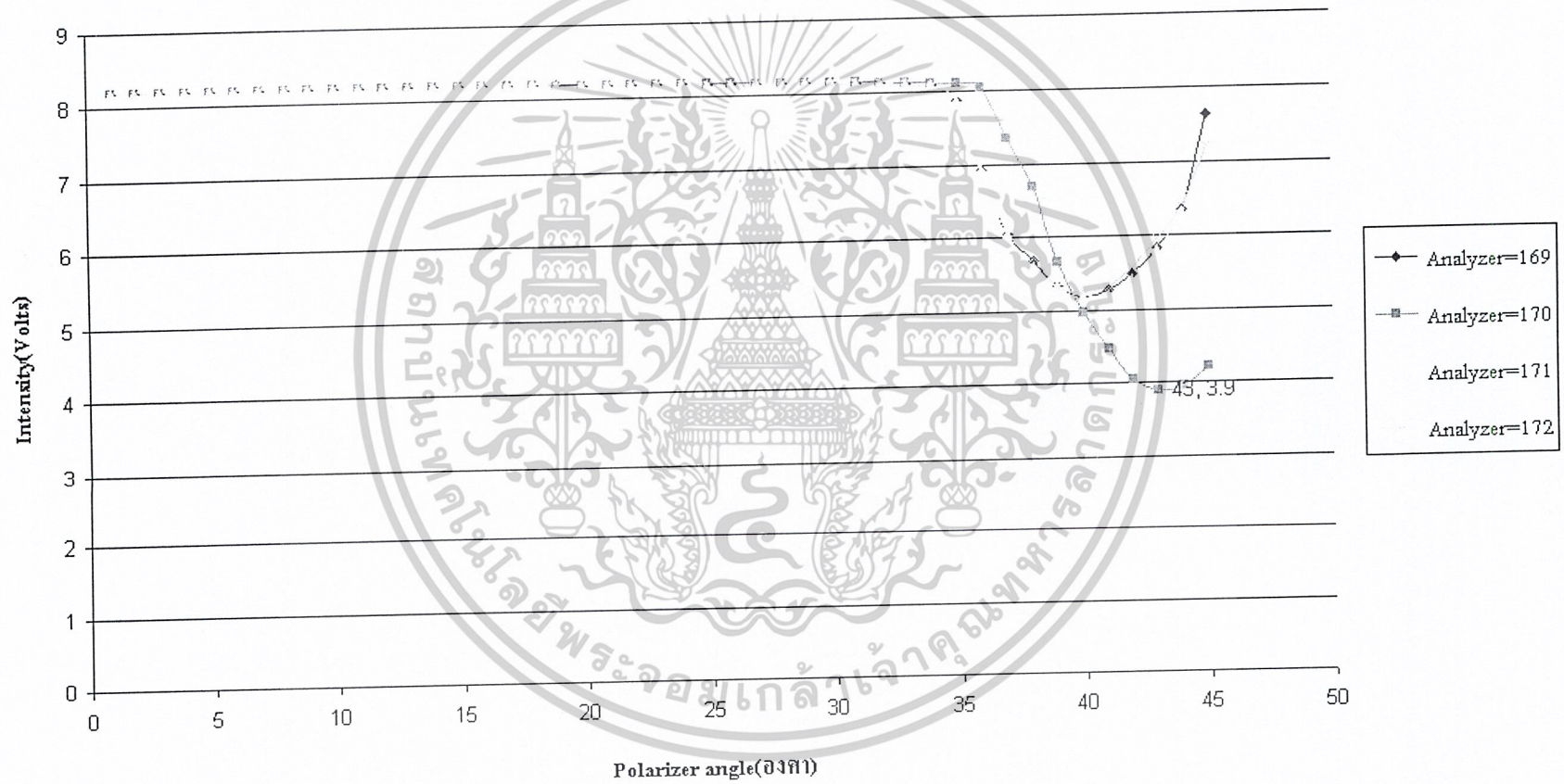
ตารางหาค่าความเข้มแสงที่มีค่าน้อยที่สุดที่มุมตกกระทบ 65°

Polarizer	Analyzer=169	Analyzer=170	Analyzer=171	Analyzer=172
1	8.21	8.21	8.21	8.21
2	8.21	8.21	8.21	8.21
3	8.21	8.21	8.21	8.21
4	8.21	8.21	8.21	8.21
5	8.21	8.21	8.21	8.21
6	8.21	8.21	8.21	8.21
7	8.21	8.21	8.21	8.21
8	8.21	8.21	8.21	8.21
9	8.21	8.21	8.21	8.21
10	8.21	8.21	8.21	8.21
11	8.21	8.21	8.21	8.21
12	8.21	8.21	8.21	8.2
13	8.21	8.2	8.21	8.2
14	8.2	8.2	8.21	8.2
15	8.2	8.2	8.2	8.2
16	8.2	8.2	8.2	8.2
17	8.2	8.2	8.2	8.19
18	8.2	8.2	8.2	8.19
19	8.2	8.19	8.19	8.19
20	8.19	8.19	8.19	8.19
21	8.19	8.19	8.19	8.19
22	8.19	8.19	8.18	8.18
23	8.18	8.19	8.18	8.18
24	8.18	8.18	8.18	8.18
25	8.17	8.18	8.17	8.17
26	8.17	8.18	8.17	8.17
27	8.17	8.17	8.17	8.17
28	8.16	8.17	8.16	8.16
29	8.15	8.16	8.15	8.15
30	8.15	8.16	8.15	8.14
31	8.14	8.15	8.14	8.14
32	8.13	8.14	8.13	8.13
33	8.11	8.13	8.11	8.11
34	8.09	8.12	8.09	8.08
35	7.89	8.11	7.89	7.88
36	6.94	8.05	6.94	6.89
37	6.05	7.36	6.06	6.07
38	5.68	6.7	5.6	5.72
39	5.33	5.67	5.33	5.32
40	5.19	4.98	5.18	5.25
41	5.27	4.48	5.22	5.31
42	5.48	4.04	5.4	5.57
43	5.83	3.9	5.82	5.97
44	6.35	3.96	6.32	6.39
45	7.64	4.22	7.34	7.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเข้มแสงที่มุมตกกระทบ 65 องศา



จากผลการทดลองที่มุมตกกระทบ (i) = 65° จะได้ $A = 170^\circ$, $P = 43^\circ$, $C = 45^\circ$

แทนค่าใน
$$\rho = \frac{\tan A(\tan C + a_c \tan(P - C))}{a_c \tan C \tan(P - C) - 1}$$

จะได้
$$\rho = \frac{\tan 170(\tan 45 + i \tan(43 - 45))}{i \tan 45 \tan(43 - 45) - 1}$$

$$\rho = \frac{-0.1763(1 - 0.0349i)}{-0.0349i - 1}$$

ค่า $\rho = 0.1759 - 0.0123i$

แทนค่า ρ ใน
$$\frac{n_2}{n_1} = \tan i \left[1 - \frac{4\rho}{(1 + \rho)^2} \sin^2 i \right]^{\frac{1}{2}}$$
 เมื่อ $i = 65$, $n_1 = 1$, $\rho = 0.1759$

จะได้
$$n_2 = \tan 65 \left[1 - \frac{4 \times 0.1759}{(1 + 0.1759)^2} \sin^2 65 \right]^{\frac{1}{2}}$$

ค่า $n_2 = 1.57$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการสอบเทียบ

ตารางแสดงผลที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าจริง

มุมตกกระทบ	ดัชนีหักเหจากทฤษฎี	ดัชนีหักเหจากการทดลอง	ค่าผิดพลาด
35	1.5	1.33	11%
45	1.5	1.37	8.60%
55	1.5	1.45	5.40%
65	1.5	1.57	4.60%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาระบบการวัดของ Ellipsometer แบบชนิดปรับมุมได้โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงความถี่เดียวซึ่งได้แก่

- การศึกษาทฤษฎีของ Polarization Light
- การศึกษากฎการสะท้อนของ Fresnel
- การศึกษาคุณสมบัติของ Compensator
- การศึกษา Jones's vector และ Matrix ในการอธิบายสถานะของ Polarization light

การออกแบบสร้างชุดจำลองระบบ Ellipsometer แบบชนิดปรับมุมได้โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงความถี่เดียวและทดลองทำการวัดกับตัวอย่างแบบง่ายที่ทราบค่าดัชนีหักเห ซึ่งตัวอย่างที่ได้นำมาทดลอง คือ กระจกแผ่นสไลด์ซึ่งมีค่าดัชนีหักเหของแสง (n) ประมาณ 1.5 เมื่อนำมาแทนค่าในสมการ

$$\frac{n_2}{n_1} = \tan i \left[1 + \frac{4\rho}{(1+\rho)^2} \sin^2 i \right]^{\frac{1}{2}}$$

เพื่อหาค่า Complex reflective index (ρ) ที่ทำมุมตกกระทบ (i) กับตัวอย่าง เทียบกับค่าที่ได้จากชุดอุปกรณ์ Ellipsometer ที่สร้างขึ้น ซึ่งใช้สมการ

$$\rho = \frac{\tan A [\tan C + a_t \tan(P-C)]}{a_t \tan C \tan(P-C) - 1}$$

เมื่อ A คือ มุม Analyzer (แกนTA) เทียบกับแกน p , C คือ มุมของ Fast axis เทียบกับแกน p , และ P คือ มุม Polarizer (แกนTA) เทียบกับแกน p

จากผลการทดลองที่ได้พบว่ามีความไวแม่นยำใกล้เคียงกับค่าจริงตามทฤษฎี ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองคลาดเคลื่อนประมาณ 7% อันเนื่องมาจากการปรับแต่งติดตั้งอุปกรณ์ อาจกล่าวได้ว่าเราสามารถสร้างชุดทดลอง Ellipsometer แบบชนิดปรับมุมได้โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงความถี่เดียวได้ ซึ่งสามารถนำมาพัฒนาระบบให้ดียิ่งขึ้น ไปอีกได้ตามความเหมาะสม เพื่อทำการวัดค่าคงที่ทางแสงของตัวอย่างที่มีหลาย layer ได้ โดยสมการที่ใช้จะเปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำความสะอาดเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับแสง เช่น Polarizer , ตัวอย่าง, Compensater เป็นต้น เพื่อลดการกระเจิงของแสง
2. ก่อนทำการวัดควรทำการ Alignment เครื่องมือเครื่องวัดให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าที่วัดที่ถูกต้องและแม่นยำ
3. ควรทำการทดลองในห้องมืด หรือในห้องที่มีแสงสลัวเพื่อไม่ให้เกิดสัญญาณรบกวน
4. ควรต่อสายกราวด์หากใช้เครื่องมือที่สามารถเกิดสัญญาณรบกวนได้เพื่อลดปัญหาการเกิดสัญญาณรบกวน
5. การวัดค่า Null Intensity ควรปรับค่าอย่างละเอียดเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

5.3 แนวทางพัฒนา

1. ยืดอุปกรณ์ต่างๆทางแสงให้มั่นคงเพื่อเวลาทำการวัดมีความแม่นยำมากขึ้น
2. พัฒนาให้ชุดอุปกรณ์สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อสะดวกในการวัดผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

รศ.สุวรรณ คูสำราญ , ทัศนศาสตร์กายภาพ , คณะวิทยาศาสตร์ , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , ธันวาคม 2537 , หน้า 142-176.

Azzam , R. M. A., and Bashara , N. M., **Ellipsometry and Polarized Light** , North-Holland , Amsterdam , 1977.

Born, M., and Wolf, E., **Principles of Optics**, 3rd ed., Pergamon Press, New York, 1965.

Heavens, O. S., **Optical Properties of Thin Solid Films** , Dover, New York, 1965.

Vasicek, A., **Optics of Thin Films** , North-Holland , Amsterdam , 1960.

Strong, J., **Concepts of Classical Optics** , Freeman , San Francisco , 1959.

Abeles, F., in **Progress in Optics** , Vol. II (E. Wolf, ed.), North-Holland , Amsterdam ,

Stone, J. M., **Radiation and Optics** , McGraw-Hill , New York , 1963.

Hecht, E., and Zajac, A., **Optics** , Addison-Wesley , Reading , MA , 1974.

Gerrard , A., and Burch, J. M., **Introduction to Matrix Methods in Optics** , Wiley ,

Clarke, D., and Grainger, J. F., **Polarized Light and Optical Measurement** , Pergamon Press , Oxford , 1971.

Shurcliff, W. A., **Polarized Light** , Harvard University Press , Cambridge , Mass., 1962- and 1966.

Tompkins, H. G., **A User's Guide to Ellipsometry** , Academic Press , Boston , Mass., 1993.

Swindell, W., editor , “ Polarized Light ” **Benchmark papers in Optics; V. 1** , Dowden , Hatchinson and Ross , New York , Distributed by Halsted Press , 1975.

Archer, R. J., **Ellipsometry** , Gaertner Scientific Corp., Chicago , 1968.

Winterbottom, A. B., **In Ellipsometry in the Measurement of Surfaces and Films** , Symp. Proc., Washington, DC, 1963, (E. Passagliai et al., eds.) , N.B.S. Miscellaneous Publ. 256. 256 , Washington , DC , 1964 , p. 97.

Kliger, D. S., J. W. Lewis and C. Randall, **Polarized Light in Optics and Spectroscopy**, Academic Press , New York , 1990.

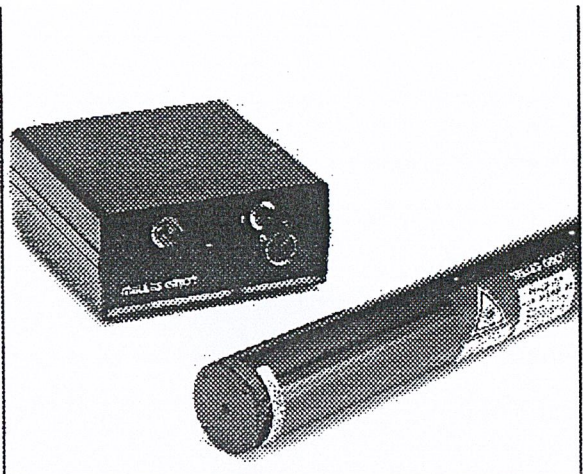
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Available in:
 ✓ Production Quantities
 ✓ Custom Configurations



Cylindrical Helium Neon Laser Systems

- Red, green, yellow, orange, or near infrared output
- Complete systems, including power supply
- CDRH and CE (230 Vac only) compliant

Melles Griot manufactures a wide variety of cylindrical HeNe laser systems, only a few of which are represented here. All laser heads are mounted in rugged aluminum housings and come with a matched power supply. All systems meet CDRH requirements for laser equipment and -230 volt versions are CE compliant. Lasers are available in randomly polarized or linearly polarized versions (with >500:1 extinction ratio).

SPECIFICATIONS: CYLINDRICAL HELIUM NEON LASER SYSTEMS

Output Mode: TEM₀₀ (>95%)
Quality Factor (M²): <1.05 (TEM₀₀, typical)
Angular Drift: <0.03 mrad after 15 min

Static Alignment:

Centered to outer cylinder within 0.25 mm
 Bore sighted to <0.1 mrad

Amplitude Stability:

Noise (30 Hz to 10 MHz)**: <0.5% rms
 Long-Term Drift: ±2%

Electrical Specifications:

Input Voltage: 100, 115, or 230 Vac ±10%
Input Frequency: 50–60 Hz

General Specifications:

Temperature:
 Operating: -20°C to +40°C
 Nonoperating: -40°C to +80°C

Humidity:
 Operating: 0–90%, Nonoperating: 0–100%

Shock: 25 g for 11 msec

Red (632.8 nm) Cylindrical Helium Neon Laser Systems

CW Output Power (mW)	Beam Diameter 1/e ² (mm)	Beam Divergence (mrad)	Max. Mode Sweep (%)	Polarization	Longitudinal Mode Spacing (MHz)	Laser Head Dimensions Length x Diameter (mm)	Power Supply Style	Safety Classification		PRODUCT NUMBER*
								CDRH	IEC	
0.5	0.46	1.77	10	Random	1063	177.8 x 31.8	A	II	2	25 LHR 213
0.5	0.46	1.77	10	Linear	1063	177.8 x 31.8	A	II	2	25 LHP 213
1.0	0.59	1.35	5	Random	687	271.8 x 44.5	A	IIIa	3B	25 LHR 111
1.0	0.59	1.35	5	Linear	687	271.8 x 44.5	A	IIIa	3B	25 LHP 111
2.0	0.76	1.06	5	Random	636	279.9 x 35.1	A	IIIa	3B	25 LHR 073
2.0	0.76	1.06	5	Linear	636	279.9 x 35.1	A	IIIa	3B	25 LHP 073
2.0	0.59	1.35	5	Random	687	271.8 x 44.5	A	IIIa	3B	25 LHR 121
2.0	0.59	1.35	5	Linear	687	271.8 x 44.5	A	IIIa	3B	25 LHP 121
2.5	0.52	1.53	10	Random	822	224.8 x 31.8	A	IIIa	3B	25 LHR 691
2.5	0.52	1.53	10	Linear	822	224.8 x 31.8	A	IIIa	3B	25 LHP 691
5.0	0.80	1.00	2	Random	438	396.2 x 44.5	A	IIIb	3B	25 LHR 151
5.0	0.80	1.00	2	Linear	438	396.2 x 44.5	A	IIIb	3B	25 LHP 151
7.0	1.02	0.79	2	Random	373	455.9 x 44.5	B	IIIb	3B	25 LHR 171
7.0	1.02	0.79	2	Linear	373	455.9 x 44.5	B	IIIb	3B	25 LHP 171
10.0	0.65	1.24	2	Random	341	483.9 x 44.5	B	IIIb	3B	25 LHR 991
10.0	0.65	1.24	2	Linear	341	483.9 x 44.5	B	IIIb	3B	25 LHP 991
17.0	0.96	0.84	2	Random	257	637.3 x 44.5	B	IIIb	3B	25 LHR 925
17.0	0.96	0.84	2	Linear	257	637.3 x 44.5	B	IIIb	3B	25 LHP 925

*Add the appropriate dash number to indicate input voltage: -249 for 115 Vac, -230 for 230 Vac, or -461 for 100 Vac.

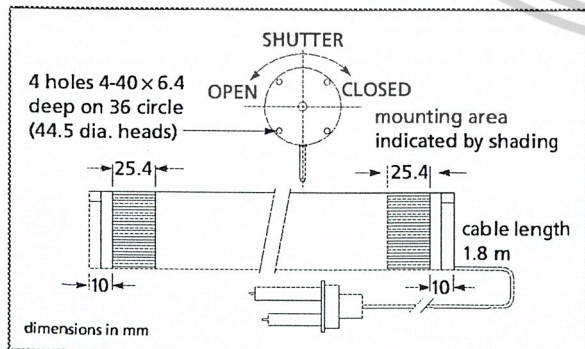
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Green, Yellow, Orange, and Near Infrared Cylindrical HeNe Laser Systems

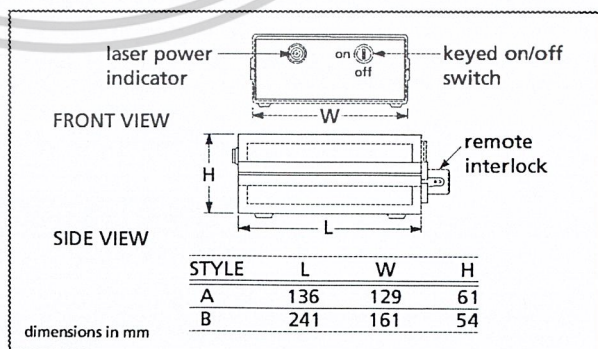
Output Power (mW)	Beam Diameter 1/e ² (mm)	Beam Divergence (mrad)	Max Mode Sweep (%)	Polarization	Longitudinal Mode Spacing (MHz)	Laser Head Dimensions Length × Diameter (mm)	Power Supply Style	Safety Classification		PRODUCT NUMBER*
								CDRH	IEC	
Wavelength: 543.5 nm (green)										
0.20	0.63	1.26	14	Random	732	240.9 × 35.1	A	II	2	25 LGR 025
0.30	0.77	0.90	10	Linear	438	396.2 × 44.5	A	IIIa	3B	25 LGP 151
0.30	0.79	0.89	5	Linear	373	455.9 × 44.5	A	IIIa	3B	25 LGP 173
0.50	0.80	1.01	10	Random	438	396.2 × 44.5	A	IIIa	3B	25 LGR 151
0.80	0.79	0.88	5	Random	373	455.9 × 44.5	A	IIIa	3B	25 LGR 173
1.00	0.88	0.81	5	Linear	328	510.3 × 44.5	B	IIIa	3B	25 LGP 193
1.50	0.86	0.81	5	Random	328	510.3 × 44.5	B	IIIa	3B	25 LGR 193
2.00	0.86	0.81	5	Random	328	510.3 × 44.5	B	IIIa	3B	25 LGR 393
Wavelength: 594.1 (yellow)										
0.35	0.63	1.26	14	Random	732	240.9 × 35.1	A	II	2	25 LYR 025
0.75	0.80	1.01	10	Random	438	396.2 × 44.5	A	IIIa	3B	25 LYR 151
1.00	0.75	0.92	5	Linear	373	455.9 × 44.5	A	IIIa	3B	25 LYP 173
2.00	0.75	0.92	5	Random	373	455.9 × 44.5	A	IIIa	3B	25 LYR 173
Wavelength: 611.9 nm (orange)										
0.50	0.63	1.26	14	Random	732	240.9 × 35.1	A	II	2	25 LOR 025
2.00	0.75	1.05	10	Random	438	396.2 × 44.5	A	IIIb	3B	25 LOR 151
Wavelength: 1.523 μm (infrared)**										
0.80	1.26	1.59	10	Linear	438	396.2 × 44.5	A	IIIb	3B	25 LIP 151
0.80	1.33	1.48	10	Linear	373	455.9 × 44.5	B	IIIb	3B	25 LIP 171
1.00	1.26	1.59	10	Random	438	455.9 × 44.5	A	IIIb	3B	25 LIR 151
1.00	1.33	1.48	10	Random	373	455.9 × 44.5	B	IIIb	3B	25 LIR 171

*Add the appropriate suffix to the product number to indicate input voltage: -249 for 115 Vac, -230 for 230 Vac, or -461 for 100 Vac.

** Noise unspecified for 1.523 μm 25 LIRIP series.



Cylindrical helium neon Laser head



Cylindrical helium neon laser power supplies

ULTRA LOW NOISE PIN PHOTODIODES

SPECIFICATIONS

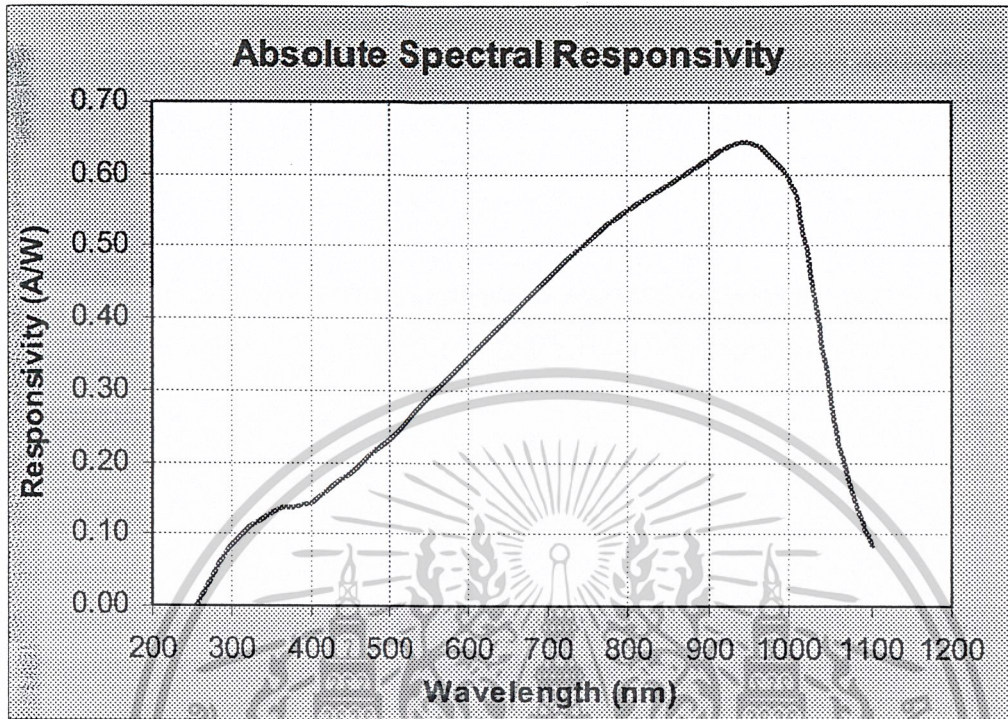
Responsivity: 0.32 A/W min., 0.38 A/W typ. @ 632.8nm; 0.50 A/W min., 0.62 A/W typ. @ 900nm

Part Number	Total Area (mm ²)	Active Area (in)	Shunt Resistance ¹ Min. (MΩ)	Dark Current ¹ at 5V		Breakdown Voltage ² at 10μA Typ. (V)	Capacitance ³ Typ.		NEP ⁴ Typ. (W/√Hz)	Max Linear Current ⁵ Typ. (mA)	Response Time ⁶ at 5V Typ. (ns)
				Typ. (nA)	Max. (nA)		at 0V (pF)	at 5V (pF)			
SD 057-14-21-011	1.67	0.051 x 0.051	1600	0.1	0.5	50	28	9	1.0x10 ⁻¹⁴	0.17	10
SD 076-14-21-011 isolated -211	2.91	0.105 x 0.043	900	0.2	0.9	50	50	15	1.4x10 ⁻¹⁴	0.29	11
SD 100-14-21-021 isolated -221	5.1	0.100 (dia.)	600	0.3	1.6	50	87	26	1.8x10 ⁻¹⁴	0.51	15
SD 172-14-21-021 isolated -221	15	0.185 x 0.125	200	1.0	5.0	50	255	76	3.0x10 ⁻¹⁴	1.5	30
SD 200-14-21-041 isolated -241	20.3	0.200 (dia.)	140	1.3	6.5	50	345	102	3.8x10 ⁻¹⁴	2.03	45
SD 290-14-21-041 isolated -241	42.6	0.300 x 0.220	65	2.5	13	50	725	217	5.6x10 ⁻¹⁴	4.76	70
SD 445-14-21-305	100	0.394 x 0.394	30	6.0	30	50	1700	500	8.6x10 ⁻¹⁴	10.0	200

* All values at 23°C

- Dark Current and Shunt Resistance vary with temperature as follows; for $T \neq 23^\circ\text{C}$, $I_{DT} = I_{D23} \cdot 1.09^{\Delta T}$, $R_{SHT} = R_{SH23} \cdot 0.9^{\Delta T}$, where $\Delta T = (T - 23)$ and I_{D23} and R_{SH23} are values at 23°C.
- Typical values listed. Minimum value shall be 50% of typical.
- Typical values listed. Maximum value shall be 20% higher than the typical.
- Test conditions are $V_B = -5\text{V}$, and 950 nm.
- In photovoltaic mode. Maximum linear current specifies the level at which the output current characteristic deviates more than 10% from the straight line. The short circuit current saturates at approximately 10 times this level.
- Response Time (transition time between 10% and 90% of the output signal amplitude) measured at 670 nm with a 50Ω load. Shorter wavelengths will result in faster rise and fall times.
- Storage and Operating Temperature Range for all photodiodes is -40°C to 110°C, except for the SD 445-14-21-305, which is -20°C to 75°C.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



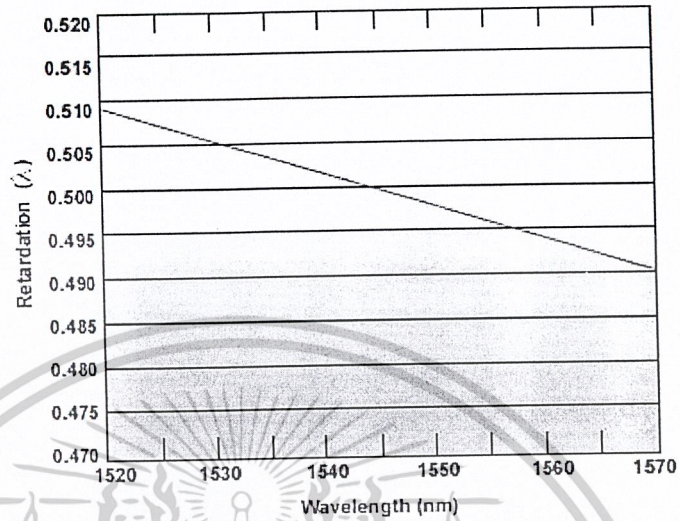
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

QWPF

First Order Waveplates

► Back to Telecommunications Page

- 1/2 wave, 3/4 wave, 7/8 wave retardations
- Retardation tolerance to $\lambda/600$
- Insertion loss less than 0.02dB



CVI QWPF Series first order waveplates are optically active crystal quartz waveplates designed to retard linearly polarized light at 0.5, 0.75, and 0.875 waves and other user specified retardations. They incorporate low loss, ultra hard CVI AR coatings with less than 0.5 arc seconds of surface parallelism to deliver an extinction ratio greater than 30dB. The waveplates also have a retardation tolerance better than $\lambda/100$ over 1529nm-1561nm C Band or 1561nm-1620nm L Band wavelengths. QWPF waveplates have been designed specifically for use with DWDM variable attenuators, circulators and analyzers, and may be used in combination with CVI PBS Polarizing Beamsplitter Cubes to form optical circulators.



Wavelength C Band 1529-1561nm

Wavelength L Band 1561-1620nm and user specified

Substrate Material Crystal Quartz

Optic Axis Tolerance ± 30 arc min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dimension 1mm to 50mm

Dimension Tolerance $\pm 0.10\text{mm}$ to 0.25mm

Thickness $99\mu\text{m}$ to $160\mu\text{m}$ typical

Retardation Values $\lambda/2$, $3/4 \lambda$, $7/8 \lambda$ or other user specified values

Retardation Tolerance $\lambda/200$ to $\lambda/600$

Temperature Sensitivity 10^{-4} waves/ $^{\circ}\text{C}$ at 1550nm

Extinction Ratio $> 30\text{dB}$

Insertion Loss $< 0.02\text{dB}$

Parallelism < 0.5 arc sec

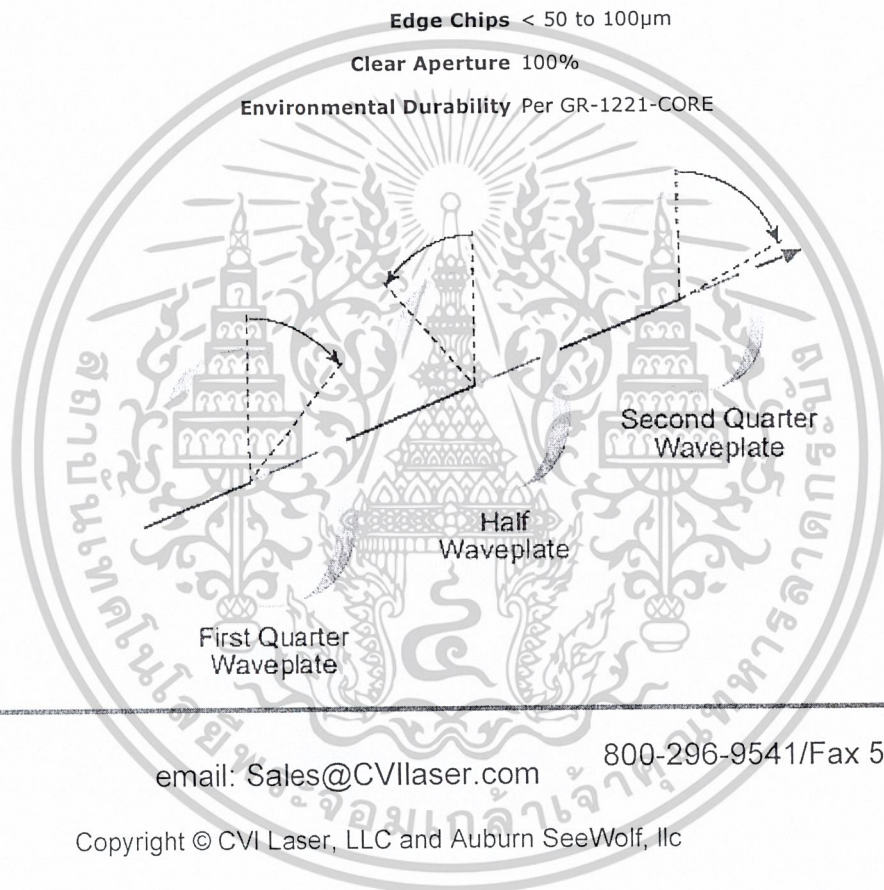
Surface Quality 10-5

Transmitted Wavefront Distortion $\lambda/20$ PV per mm^2 at 633nm

Edge Chips < 50 to $100\mu\text{m}$

Clear Aperture 100%

Environmental Durability Per GR-1221-CORE



CVI Laser LLC

email: Sales@CVIlaser.com

800-296-9541/Fax 505-298-9908

Copyright © CVI Laser, LLC and Auburn SeeWolf, llc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้