

การควบคุมทิศทางของโพลาริเซชันด้วยวิธีการมอดูเลตเฟสของแสง  
โดยใช้เส้นใยแก้วนำแสง

POLARIZATION DIRECTION CONTROL BY OPTICAL FIBER  
PHASE MODULATION TECHNIQUE



สืบตระกูล สุชาติ  
SUEBTARKUL SUCHAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2542

ISBN 974-622-592-8

เลขที่.....  
เลขทะเบียน..... 34563  
วัน, เดือน, ปี 6 พ.ย. 2542

สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไปว่ากรรมโดยหนังสือ ลักษณ์ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**POLARIZATION DIRECTION CONTROL BY OPTICAL FIBER  
PHASE MODULATION TECHNIQUE**



**A THE SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**1999**

**ISBN 974-622-592-8**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 1999**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมทิศทางของโพลาริเซชันด้วยวิธีการมอดูเลตเฟสของแสงโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสง
นักศึกษา	นายสืบตระกูล สุชาติ
รหัสประจำตัว	38625001
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2542
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร. รัชภาคย์ จิตต์อารี
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร. ปรีชา บุพาพิน

### บทคัดย่อ

การทำให้แสงมีสถานะโพลาริเซชันที่สามารถควบคุมได้ตามต้องการนับว่ามีประโยชน์อย่างมากในงานทางด้านการวัดทางแสง ทั้งนี้เพราะทำให้การวิเคราะห์สัญญาณทางแสงเป็นไปอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว สำหรับในงานวิจัยนี้ได้สร้างและควบคุมแสงโพลาริเซชันเชิงเส้นด้วยการมอดูเลตเฟสของแสงซึ่งมีเส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาริเซชันเป็นตัวกลาง ด้วยวิธีการยืดเส้นใยแก้วนำแสงด้วยความถี่ที่คงที่ตามแนวยาว จากการศึกษาพบว่าสัญญาณแสงที่รับได้เป็นแสงโพลาริเซชันเชิงเส้นที่มีมุมอซิมูท (azimuth) ที่สามารถควบคุมได้ และสอดคล้องกับทางทฤษฎี สัญญาณทางแสงที่ได้นี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านการวัดค่าทางแสง เช่น ค่าดัชนีหักเหสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนของพื้นผิวต่างชนิดกัน และหาค่าการเลื่อนเฟสของผลึกหน่วงเฟสได้ โดยผลที่ได้จากการนำไปทดลองหาค่าดัชนีหักเหของตัวอย่างเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งอ้างอิงแล้วมีความผิดพลาดประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ และผลที่ได้จากการนำไปทดลองวัดค่าการเลื่อนเฟสของผลึกหน่วงเฟสได้ค่าความผิดพลาดประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับในส่วนของทฤษฎี

<b>Thesis Title</b>	Polarization Direction Control by Optical Fiber Phase Modulation Technique
<b>Student</b>	Mr. Suebtarkul Suchat
<b>Student ID.</b>	38625001
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Programme</b>	Applied Physics
<b>Year</b>	1999
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Ratchapak Chitaree
<b>Thesis Co-advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Preecha Yupapin

### ABSTRACT

There are obvious advantages of being able to produce and control the state of polarization of coherence light, including the continuity of the measurement and speedy data acquisition. In this work, a technique of the phase modulation of light using polarization maintaining fiber as a medium is employed. The modulation method is performed by stretching the fiber longitudinally, by a modulator with a constant driven frequency. This allows to control the output polarized light, a rotating plane polarized beam, and orientate at a desired azimuth via the phase modulation. The results are similarly satisfied to the preliminary theoretical analysis. According to the study, optical parameters such as index of refraction, reflection coefficients of surfaces and phase shift of wave plate could be determined. Experimentally, the measured refraction indices of the samples obtained comparing to the standard refractive indices, where the measurement error of 3% is noted, and the phase shift measurement error of the wave plate of 2% is recorded.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับการควบคุมทิศทางของแสงโพลาริซซ์ด้วยวิธีการมอดูเลตเฟสของแสง โดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางจาก อ. ดร. รัชภักย์ จิตต์อารี ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. ปรีชา ยูพาพิน ที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำวิจัย ซึ่งช่วยทำให้ผู้วิจัยเข้าใจในปัญหานั้นมากขึ้น ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. วราวุฒิ เถาดีดคาร รศ. สุวรรณ คูตำราญ และ รศ.สมศักดิ์ เชียรศิริกุล ซึ่งเป็นผู้ตรวจทานเนื้อหาและให้คำแนะนำตลอดจนชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ คุณธรรมรัตน์ แต่งตั้ง ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือทางด้านคอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งช่วยให้ผู้ทำวิจัยเข้าใจในปัญหานั้นมากขึ้น

ขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาฟิสิกส์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ และบัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้โอกาสในการศึกษาและทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณทุกคนในครอบครัว เพื่อน ๆ นักศึกษา ผู้ร่วมงานที่คอยเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ บิดามารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน

สืบตระกูล สุชาติ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	6
1.3 การดำเนินการวิจัย.....	6
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	7
บทที่ 2 หลักการพื้นฐาน.....	8
2.1 ธรรมชาติของแสง.....	8
2.2 โพลาริเซชัน.....	12
2.2.1 แสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้น.....	13
2.2.2 แสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลม.....	14
2.2.3 แสงโพลาไรซ์ชนิดวงรี.....	18
2.3 โจนส์แวกเตอร์.....	20
2.4 โจนส์เมตริกซ์.....	28
2.5 สโตกส์แวกเตอร์.....	30
2.6 สรุป.....	34
บทที่ 3 อุปกรณ์.....	35
3.1 อุปกรณ์ทางแสง.....	35
3.1.1 เลเซอร์ฮีเลียมนีออน.....	35
3.1.2 โพลาริเซอร์.....	37
3.1.3 แผ่นผลึกหน่วงเฟสชนิดครึ่งคลื่น.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IV ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.4 แผ่นผลึกหน่วงเฟสชนิดหนึ่งในสี่ช่วงคลื่น.....	41
3.1.5 เส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาไรเซชัน.....	43
3.1.5.1 ชนิดของเส้นใยแก้วชนิดรักษาสถานะโพลาไรเซชัน.....	44
3.1.5.2 การผลิตเส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาไรซ์.....	47
3.2 อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์.....	48
3.2.1 ฟินโฟโอดีไดโอด.....	49
3.2.2 ตัวมอดูเลเตอร์.....	51
3.3 สรุป.....	52
<b>บทที่ 4 การควบคุมทิศทางของโพลาไรเซชันด้วยวิธีการมอดูเลตเฟสของแสงโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสง.....</b>	<b>53</b>
4.1 ทฤษฎี.....	53
4.2 การทดลอง.....	60
4.3 การยืดเส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาไรซ์.....	62
4.4 สรุป.....	65
<b>บทที่ 5 การปรับปรุงและประยุกต์ใช้งานชุดมอดูเลตเฟสของแสงโดยโซ่เส้นใยแก้วนำแสง.....</b>	<b>66</b>
5.1 การปรับปรุงคุณภาพของแสงที่ได้จากชุดมอดูเลต.....	66
5.2 การประยุกต์ใช้งานทางด้านการวัดค่าคุณสมบัติทางแสงของพื้นผิวตัวอย่าง.....	67
5.2.1 ทฤษฎีในการวัดค่า.....	67
5.2.2 การทดลองในการวัดค่าพื้นผิวของตัวอย่าง.....	73
5.3 การประยุกต์ใช้ในการวัดค่าการเลี้ยวเบนเฟสและการหาแกนของผลึกหน่วงเฟส.....	74
5.3.1 ทฤษฎีในการวัดค่า.....	74
5.3.2 การทดลองหาค่าการเลี้ยวเบนเฟสของผลึกหน่วงเฟส.....	77
5.3.3 การทดลองหาแกนเร็วและแกนช้าของผลึกหน่วงเฟส.....	77
5.4 การวิเคราะห์สัญญาณที่ได้จากการทดลอง.....	81
5.5 สรุป.....	84

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 ผลของงานวิจัย.....	86
6.1 ผลการทดลองการควบคุมทิศทางของโพลาริเซชัน.....	86
6.2 การทดลองการยืดเส้นใยแก้วนำแสง.....	93
6.3 ผลการทดลองในการปรับปรุงคุณภาพของชุดมอดูเลตเฟสของแสง.....	93
6.4 ผลการทดลองในการวัดค่าคุณสมบัติทางแสงของพื้นผิวดวอย่าง.....	94
6.4.1 พื้นผิวของตัวอย่างที่มีคุณสมบัติไม่ดुकกลืนทางแสง.....	94
6.4.2 พื้นผิวของตัวอย่างที่มีคุณสมบัติในการดुकกลืนทางแสงต่ำ.....	96
6.4.3 พื้นผิวของตัวอย่างที่มีคุณสมบัติในการดुकกลืนทางแสงสูง.....	97
6.5 ผลการทดลองวัดค่าการเลือนเฟสและการหาแกนของผลึกหน่วงเฟส.....	99
6.6 สรุป.....	100
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	101
7.1 บทสรุป.....	101
7.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น.....	104
7.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป.....	104
เอกสารอ้างอิง.....	105
ภาคผนวก.....	107
ภาคผนวก ก. รายละเอียดอุปกรณ์เพิ่มเติม.....	108
ภาคผนวก ข. วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	116
ภาคผนวก ค. รายชื่องานวิจัยและงานวิจัยหลัก.....	119
ประวัติผู้เขียน.....	147

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงโจนส์เวกเตอร์แบบต่าง ๆ .....	27
2.2 สรุบบโจนส์เมตริกซ์สำหรับโพลาริเซออร์ชนิดต่าง ๆ .....	30
2.3 แสดงนอร์มัลไลซ์พารามิเตอร์สำหรับแสงโพลาริซ์หลาย ๆ สถานะ.....	33
3.1 แสดงค่าดัชนีหักเหของผลึกที่มีแกนทรานสวาซเซอร์เพียงแกนเดียวต่าง ๆ ซึ่งวัดที่ความยาวคลื่น 589.3 นาโนเมตร.....	40
3.2 แสดงค่าต่าง ๆ ของเส้น โยแก้วนำแสงชนิดรีกษาสถานะ โพลาริเซชัน.....	45
6.1 แสดงความเข้มของแสงต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับคำนวณค่าสโตคส์พารามิเตอร์.....	91
6.2 แสดงค่าที่วัดได้ก่อนและหลังใช้วงจรถดสัญญาณความถี่สูง.....	93
6.3 แสดงผลสรุปจากการทดลองวัดค่าพื้นผิวที่ได้เปรียบเทียบกับในส่วนของค่าอ้างอิง.....	98
6.4 แสดงค่าดัชนีหักเหของตัวอย่างจากการทดลองที่มุมตกกระทบต่าง ๆ.....	99
6.5 แสดงผลการทดลองวัดค่าการเลื่อนเฟสของตัวนำเฟสที่ได้จากชุดทดลอง.....	99
6.6 แสดงค่าความเข้มแสงที่ได้ในการวัดค่าหาแกนเร็วและแกนช้าของผลึกหน่วงเฟส.....	100
7.1 แสดงค่า DOP และเอลลิปติกซิตี (e) จากการทดลองเปรียบเทียบกับทฤษฎี.....	102
7.2 แสดงค่าคุณสมบัติทางแสงของตัวอย่างที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับทฤษฎี ที่มุมตกกระทบ $\phi$ เท่ากับ 75 องศา.....	103
7.3 แสดงผลการทดลองวัดค่าการเลื่อนเฟสของผลึกหน่วงเฟส.....	103

# สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 แสดงชุดทดลองการผลิตและควบคุมแสงที่มีสถานะ โพลาริซ์ตามต้องการ โดยใช้ใยแก้วนำแสงเสนอ โดยอูลริช.....	1
1.2 แสดงชุดการมอดูเลตเฟสของแสงซึ่งเสนอโดยคูโบต้าและคณะ.....	2
1.3 (ก) แสดงการมอดูเลตเฟสของแสงซึ่งเสนอโดยลีฟิเวียร์ (ข) แสดงสถานะของแสงที่เคลื่อนที่ผ่านขดเส้นใยแก้วนำแสงในแต่ละส่วน.....	3
1.4 แสดงชุดมอดูเลตเฟสของแสงซึ่งเสนอโดยตาตัมและคณะ.....	4
1.5 แสดงชุดทดลองการควบคุมสถานะ โพลาริซ์ของแสงซึ่งเสนอโดยจอห์นสันและพานเนล.....	5
1.6 แสดงชุดควบคุมสถานะ โพลาริซ์ซึ่งเสนอโดยไฮด์มันน์และวาเลน.....	5
1.7 แสดงชุดผลิตและควบคุมสถานะ โพลาริซ์ซึ่งเสนอโดยเพรทและคณะ.....	5
2.1 แสดงหน้าคลื่นของแสงแบบวงกลมและแบบระนาบ.....	10
2.2 แสดงการสะท้อนและหักเหของแสงที่เดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน.....	10
2.3 แสดงการหักและสะท้อนกลับหมดของแสงในตัวกลางที่เป็นแก้ว ( $n_1$ ) และอากาศ ( $n_2$ ).....	11
2.4 แสดงการสั้นของแสงธรรมชาติ ซึ่งมีสนามไฟฟ้า $E$ ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก $H$ .....	12
2.5 แสดงแสงโพลาริซ์ชนิดเชิงเส้นซึ่งมีมุมที่เปลี่ยนไป (ก) ตามแกน $x$ (ข) ตามแกน $y$ (ค) ทำมุม $45^\circ$ กับแกน $x$ (ง) ทำมุม $26^\circ$ กับแกน $x$ .....	14
2.6 แสดงแสงโพลาริซ์ชนิดวงกลมตามขวาหรือตามเข็มนาฬิกา.....	15
2.7 แสดงการหมุนของเวกเตอร์ไฟฟ้าในกรณีของแสงโพลาริซ์ชนิดวงกลมตามขวา.....	16
2.8 แสดงแสงโพลาริซ์ชนิดวงกลมตามซ้ายหรือทวนเข็มนาฬิกา.....	17
2.9 แสดงการกำหนดทิศทางของการหมุนสำหรับ โพลาริซ์ชนิดวงรี.....	18
2.10 แสดงลักษณะทั่วไปของคลื่นโพลาริซ์ชนิดวงรี.....	19
2.11 แสดงแสงโพลาริซ์ชนิดวงรีตามซ้ายหรือทวนเข็มนาฬิกา.....	20
2.12 แสดงสนามไฟฟ้าของแสงโพลาริซ์เชิงเส้นที่มีการวางตัวของสนามไฟฟ้า ในแนวต่าง ๆ กัน โดยทิศทางที่แสงเคลื่อนที่ไปเป็นทิศ $+Z$ .....	22
2.13 แสดงรูปλισซางูส์สำหรับการสั้นในแนวแกน $x$ และ $y$ ที่มีแอมพลิจูดไม่เท่ากัน และมีความต่างเฟส $\Delta\phi = \phi_y - \phi_x$ ค่าต่าง ๆ.....	24
2.14 แสดงโพลาริซ์ชนิดวงรีในกรณี $\Delta\phi = \pi/2$ .....	25
3.1 แสดงส่วนประกอบของเลเซอร์ชนิดฮีเลียมนีออน ที่ประกอบด้วยแผ่น สะท้อนแสงแบบโค้งทางด้านปลายทั้งสองข้าง.....	36

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.2 แสดงระดับพลังงานของสารตัวกลางภายในเครื่องฉายแสงชนิดซีเลียมनीออน แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงระดับสถานะพลังงานต่าง ๆ .....	36
3.3 แสดงโพลาริเซชันชนิดเชิงเส้น.....	38
3.4 แสดงการหักเหสองแนว.....	39
3.5 แสดงแผ่นผลึกหน่วงเฟสชนิดหนึ่งในสี่ช่วงคลื่น.....	41
3.6 แสดงแสงโพลาริเซชันชนิดเชิงเส้นเมื่อตกกระทบผ่านแผ่นผลึกหน่วงเฟสชนิด หนึ่งในสี่ช่วงคลื่นโดยสนามไฟฟ้า ทำมุม $45^\circ$ กับแกนเร็วหรือแกนช้าก็ตาม จะกลายเป็นแสงโพลาริเซชันวงกลมได้.....	42
3.7 แสดงเส้นใยแก้วนำแสงที่สามารถรักษาสถานะโพลาริเซชันได้ (แบบให้แรงเค้น).....	44
3.8 แสดงชนิดของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาริเซชันจากการ รักษาสถานะโพลาริเซชันแบบเชิงเส้น.....	44
3.9 แสดงความยาวบิตในเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโทมอดเดี่ยว (ก) สถานะของโพลาริเซชัน เทียบกับ $\Phi(z)$ (ข) แสดงความเข้มของแสงที่ครอบคลุมในช่วงของความยาวบิต.....	46
3.10 แสดงลักษณะ โครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษา สถานะโพลาริเซชันแบบต่าง ๆ .....	48
3.11 แสดงรูปแบบ โครงสร้างของพินโฟโต้ไดโอดและการไบแอสให้พินโฟโต้ไดโอด.....	49
3.12 แสดงการไหลของอิเล็กตรอนในรอยต่อของพินโฟโต้ไดโอด.....	51
3.13 แสดงรูปแบบการใช้งานพินโฟโต้ไดโอด.....	51
3.14 แสดงรูปแบบของตัวมอดูเลเตอร์ ซึ่งใช้หลักการของสนามแม่เหล็กผลึกแท่งแม่เหล็ก ที่ยึดกับเส้นใยแก้วนำแสงให้เคลื่อนที่ตามยาวตามจังหวะของสัญญาณที่ใช้ขับ.....	51
4.1 แสดงการรวมกันของแสงโพลาริเซชันวงกลมโดยให้ผลออกมาเป็นแสง โพลาริเซชันเชิงเส้นซึ่งมีมุมอิมพิทเป็น $\phi$ .....	54
4.2 แสดงการจัดชุดทดลองการควบคุมทิศทางของโพลาริเซชันด้วยวิธีการ มอดูเลตเฟสของแสง โดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลาง.....	55
4.3 แสดงการจัดชุดอุปกรณ์ทางแสงเพื่อทำการวัดค่าสโตกส์พารามิเตอร์.....	59
4.4 แสดงการจัดชุดอุปกรณ์ทางแสงเพื่อทำการวัดค่าความเข้มแสงที่มุมต่าง ๆ สำหรับสโตกส์พารามิเตอร์แต่ละตัว.....	60

# สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงและทิศทางของแกน ส่งผ่านแสงของโพลาไรเซเตอร์สำหรับแสงวงกลมที่ได้จากการทดลอง.....	63
4.6 แสดงชุดทดลองการวัดค่าการยี่ดของเส้นใยแก้วนำแสงที่ทำให้เฟสของแสงเปลี่ยน แปลงไปเป็น $2\pi$ .....	64
5.1 แสดงสัญญาณที่ได้จากชุดมอดูเลตเฟสของแสง โดยใช้เส้นใยแก้วนำแสง เมื่อผ่าน วงจรีเล็กทรอนิกส์ (สัญญาณที่อยู่ด้านล่างในภาพ) เปรียบเทียบกับสัญญาณที่ไม่ ได้ใช้วงจรีเล็กทรอนิกส์ (สัญญาณที่อยู่ด้านบนของภาพ).....	67
5.2 แสดงการสะท้อนและการส่งผ่านของระนาบคลื่นแสงที่พื้นผิวระหว่างตัวกลาง (0) และตัวกลาง (1) เมื่อ $\phi_0$ และ $\phi_1$ เป็นมุมของการตกกระทบและหักเหตามลำดับ $p$ และ $s$ เป็นแสงโพลาไรซ์ในแนวขนานและตั้งฉากระนาบของการตกกระทบ.....	68
5.3 แสดงการจัดชุดทดลองการมอดูเลตเฟสของแสง โดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็น ตัวกลางทางแสงสำหรับการวัดทางแสง.....	71
5.4 แสดงชุดทดลองการวัดค่าการเลี้ยวเบนเฟสของตัวอย่าง โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านของแสง.....	74
5.5 แสดงการจัดชุดทดลองในการวัดหาแกนเร็วและช้าของผลึกหน่วงเฟส.....	78
5.6 แสดงความเข้มของแสงเทียบกับเทอมเฟสของแสงที่เปลี่ยนไปเมื่อมีแรงมากระทำ กับโฟโตรีลาสติก.....	79
5.7 แสดงรอยบอกตำแหน่งแกนของผลึกหน่วงเฟสที่ใช้ในการทดลอง.....	80
5.8 แสดงหลักการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้รับจากการทดลองที่เป็นสัญญาณอ้างอิง และสัญญาณตรวจสอบโดยใช้คอมพิวเตอร์.....	81
5.9 แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการหาค่า $I_p, I_s, I_{45}$ .....	82
5.10 แสดงการหาจุดยอดและจุดต่ำสุดของสัญญาณที่เป็นความเข้มแสงในแนว ขนานและตั้งฉากกับระนาบอ้างอิงของสัญญาณอ้างอิง.....	83
5.11 แสดงตำแหน่งของความเข้มแสงที่มีมุม 45 องศา กับแนวอ้างอิงของสัญญาณอ้างอิง.....	84
6.1 แสดงการจัดวงจรอุปกรณ์สำหรับการทดลองในการควบคุมทิศทางของโพลาไรเซชัน ด้วยวิธีการมอดูเลตเฟสของแสง โดยมีเส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลาง.....	86
6.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงและทิศทางของแกน ส่งผ่านของแสงโพลาไรเซเตอร์สำหรับแสงวงกลมที่ได้จากการทดลอง.....	87

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
6.3 แสดงตัวมอดูเลเตอร์ซึ่งใช้ในการดึงเส้นใยแก้วนำแสงให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ความเค้นตามจังหวะของสัญญาณขับ.....	88
6.4 แสดงรูปสัญญาณแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มอดูมิทสามารถควบคุมได้ เปรียบเทียบกับสัญญาณที่ใช้ขั้วรูปไซน์ 20 เฮิรตซ์.....	89
6.5 แสดงสัญญาณเอาต์พุต(สัญญาณ Fringes) ที่ได้เปรียบเทียบกับกราวด์ (สัญญาณเส้นตรง).....	90
6.6 แสดงผลการทดลองหาระยะขีดของเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งทำให้เฟสของแสง มีการเปลี่ยนแปลงไปเป็น $2\pi$ .....	93
6.7 แสดงสัญญาณที่ได้จากชุดมอดูเลตเฟสของแสง โดยใช้เส้นใยแก้วนำแสง เมื่อผ่านวงจรถออิเล็กทรอนิกส์ เปรียบเทียบกับสัญญาณที่ไม่ได้ใช้วงจรถออิเล็กทรอนิกส์.....	94
6.8 แสดงผลการทดลองวัดค่าคุณสมบัติทางแสงของพื้นผิว BK7 ในเทอมของ $\Delta$ และ $\Psi$ เปรียบเทียบกับทฤษฎีที่มุมตกกระทบต่าง ๆ .....	95
6.9 แสดงผลการทดลองวัดค่าคุณสมบัติทางแสงของพื้นผิวเคลือบอะลูมิเนียม ในเทอมของ $\Delta$ และ $\Psi$ เปรียบเทียบกับทฤษฎีที่มุมตกกระทบต่าง ๆ .....	96
6.10 แสดงผลการทดลองวัดค่าคุณสมบัติทางแสงของพื้นผิวของแผ่นทอง (Au) ในเทอมของ $\Delta$ และ $\Psi$ เปรียบเทียบกับทฤษฎีที่มุมตกกระทบต่าง ๆ.....	97

# บทที่ 1

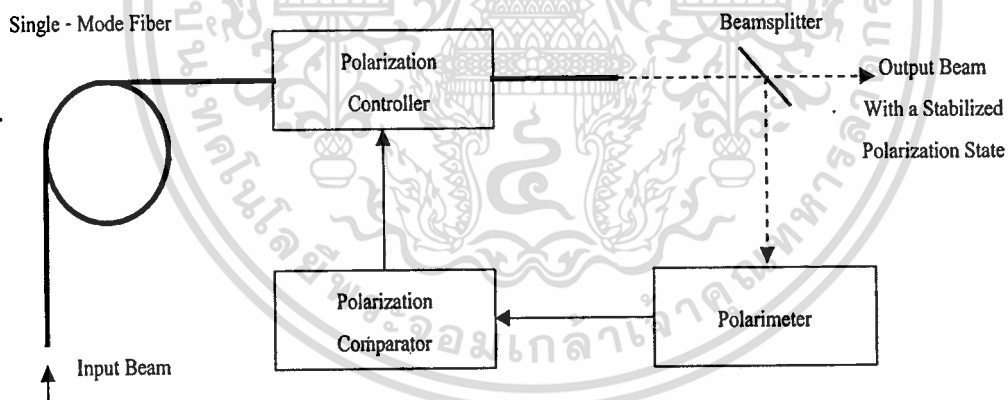
## บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงความสำคัญและที่มาของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย วิธีและขั้นตอนวิจัย ตลอดจนประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย ซึ่งจะกล่าวเรียงตามลำดับเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

นับตั้งแต่ประมาณปี ค.ศ. 1979 จนถึงปัจจุบัน ได้มีงานวิจัยมากมายเกี่ยวข้องกับกรมอดูเลตเฟสของแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลาง โดยมีจุดประสงค์เพื่อที่จะสามารถผลิตและควบคุมสถานะโพลาไรซ์ของแสง

จากการศึกษาพบว่ามิงงานวิจัยที่น่าสนใจเกี่ยวกับการผลิตและควบคุมแสงที่มีสถานะโพลาไรซ์ตามต้องการได้โดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางของแสงอยู่จำนวนหนึ่ง โดยเริ่มจากปี ค.ศ. 1979 อุลริช (Ulrich) [1] ได้เสนอหลักการผลิตแสงที่มีสถานะโพลาไรซ์ตามต้องการโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสง โดยมีส่วนประกอบต่าง ๆ ตามรูปที่ 1.1



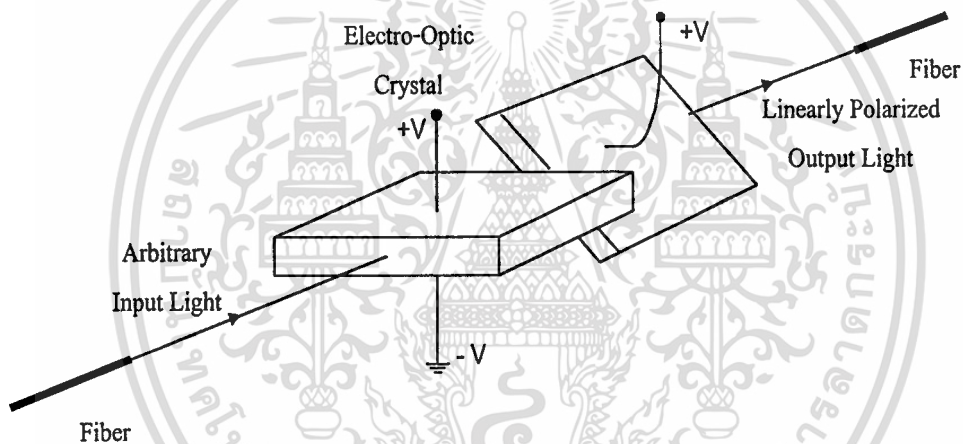
รูปที่ 1.1 แสดงชุดทดลองการผลิตและควบคุมสถานะโพลาไรซ์ของแสงโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงเสนอโดยอุลริช

จากรูปที่ 1.1 ส่วนประกอบหลักของชุดทดลองประกอบด้วย 1) ส่วนการควบคุมสถานะโพลาไรซ์ของแสง (Polarization Controller) 2) ส่วนการเปรียบเทียบสถานะโพลาไรซ์ของแสง (Polarization Comparator) และ 3) ส่วนการตรวจสอบสถานะโพลาไรซ์ของแสง (Polarimeter) โดยมีหลักการทำงานคร่าว ๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะของแสงที่ส่งออกมาจากปลายเส้นใยแก้วนำแสงด้านขาออกจะได้รับการตรวจสอบ โดยส่วนการตรวจสอบสถานะโพลาไรซ์ โดยถ้าผลการตรวจสอบพบความแตกต่างระหว่างสถานะโพลาไรซ์ของแสงที่ตรวจวัดได้กับสถานะโพลาไรซ์อ้างอิงแล้ว ส่วนของการเปรียบเทียบนี้จะส่งสัญญาณป้อนกลับ (Feedback) ไปยังส่วนของการควบคุมสถานะโพลาไรซ์ของแสงทันที โดยในส่วนนี้มีลักษณะการทำงานเป็นแบบเชิงกล ซึ่งเป็นลักษณะของอุปกรณ์ที่สามารถออกแรงขนาดที่พอเหมาะ โดยการกดลงบนเส้นใยแก้วนำแสงเพื่อทำให้เกิดค่าไบรฟรินเจนซ์ (Birefringence) ที่ต้องการบนเส้นใยแก้วนำแสงได้ และยังมีผลทำให้สถานะโพลาไรซ์ของแสงเปลี่ยนแปลงไปตามต้องการ อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวยังมีข้อเสียในแง่ของจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ และรวมถึงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องมีการออกแบบมาเฉพาะ

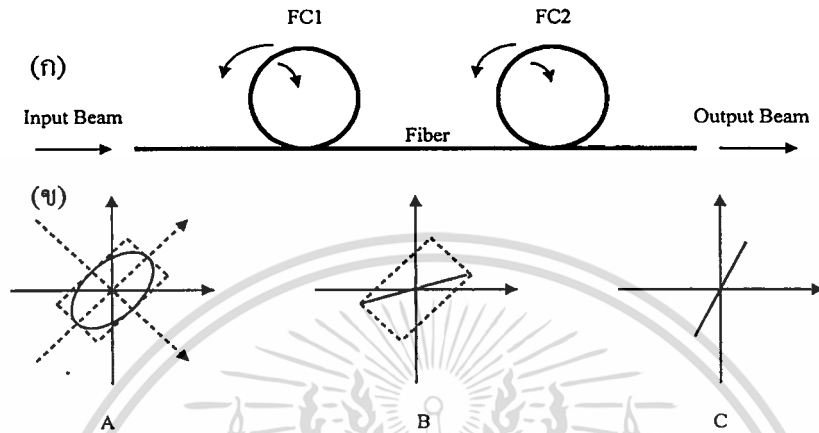
ในปี ค.ศ. 1980 คูโบต้าและคณะ (Kubota *et al.*) [2] ได้เสนอวิธีการใหม่ในการผลิตและควบคุมสถานะโพลาไรซ์ของแสง (รูปที่ 1.2) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสถานะของแสงที่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 1.2 แสดงชุดการมอดูเลตเฟสของแสงซึ่งเสนอโดยคูโบต้าและคณะ เมื่อ  $V$  คือแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นการทำงานของแผ่นผลึก

คูโบต้าและคณะได้ใช้ผลึกชนิดหนึ่ง (Electro-optic Crystal) ซึ่งมีคุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลงค่าไบรฟรินเจนซ์ของแสงที่ผ่านได้ โดยค่าไบรฟรินเจนซ์ที่เปลี่ยนไปจะถูกเลือกให้พอดีกับค่าที่ทำให้ผลึกปฏิบัติตัวเหมือนเป็นแผ่นผลึกหน่วงเฟสของลำแสง (Wave Plate) ข้อดีของวิธีการนี้ก็ คือ อุปกรณ์แสงที่ใช้มีจำนวนน้อย สถานะโพลาไรซ์ของแสงที่ได้ซึ่งมีลักษณะเป็นเชิงเส้นสามารถควบคุมได้ แต่ข้อเสียคือค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นการทำงานของแผ่นผลึกต้องมีค่าถึง 425 โวลต์ รวมถึงโอกาสในการเกิดการสูญเสียแสงก็มีมากเนื่องจากการมอดูเลตแสงนั้นไม่สามารถกระทำได้ภายในเส้นใยแก้วนำแสง

ในปีเดียวกันนี้เองลีฟิเวียร์ (Lefevre) [3] ได้เสนอการผลิตและควบคุมสถานะโพลาไรซ์ของแสงอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งอาศัยหลักการคล้ายคลึงกับวิธีการที่เสนอโดยคูโบด้าและคณะ ที่มีความแตกต่างกันตรงวิธีการ กล่าวคือ ลีฟิเวียร์ทำให้เกิดไบร์ฟรินเจนซ์โดยตรงบนเส้นใยแก้วนำแสงโดยอาศัยการโค้งงอเส้นใยแก้วนำแสงให้มีรัศมีที่เหมาะสมดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 (ก) แสดงการมอดูเลตเฟสของแสงซึ่งเสนอโดยลีฟิเวียร์ โดยที่ FC1,2 : Fiber Coils  
 (ข) แสดงสถานะของแสงที่เคลื่อนที่ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงในแต่ละส่วน โดยที่ A : แสงโพลาไรซ์ชนิดวงรีที่ใช้ส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง B : แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่ได้จากการเปลี่ยนโดยเส้นใยแก้วนำแสงวงแรก C : แสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นที่ได้หลังจากผ่านเส้นใยแก้วนำแสงที่สอง

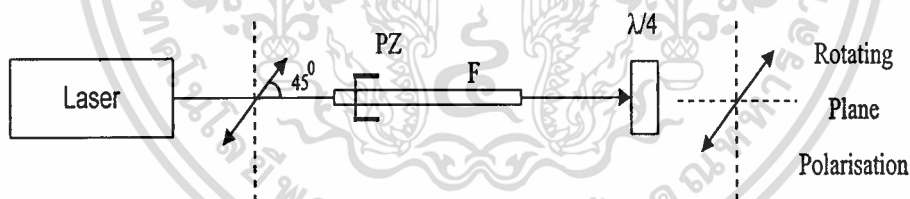
การกระทำในลักษณะดังกล่าวทำให้เส้นใยแก้วนำแสงแต่ละขดประพฤติตัวเหมือนแผ่นผลึกหน่วงเฟสแบบ  $\lambda/4$  (Quarter-Wave Plate) และ  $\lambda/2$  (Half-Wave Plate) ตามลำดับโดยจะมีผลทำให้สภาวะโพลาไรซ์ของลำแสงที่เคลื่อนที่ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงไปตามต้องการ ถึงแม้รูปแบบที่นำเสนอโดยลีฟิเวียร์ นี้จะเป็นระบบของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดซึ่งนับว่าเป็นข้อดี แต่การทำให้เส้นใยแก้วนำแสงเกิดการโค้งงอในลักษณะดังกล่าวก็มีโอกาสทำให้เกิดการสูญเสียของสัญญาณแสงได้

การผลิตและควบคุมสถานะโพลาไรซ์ของแสงยังคงได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่อง โดยในปี ค.ศ. 1985 โอโคชิและคณะ (Okoshi *et al.*) [4] ได้อาศัยปรากฏการณ์ของอันตรกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กกับแสง (Magneto-Optic Effect) ในการควบคุมสถานะโพลาไรซ์ของแสง โดยการเปลี่ยนแปลงค่าครุชนิทกของเส้นใยแก้วนำแสงภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีผลทำให้การควบคุมสถานะโพลาไรซ์ของแสงสามารถกระทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่าสนามแม่เหล็ก

ต่อมาเทคโนโลยีทางด้านเส้นใยแก้วนำแสงได้รับการพัฒนาขึ้นเป็นอย่างมากโดยมีแรงกระตุ้นจากการขยายตัวทางด้านการศึกษาผ่านเส้นใยแก้วนำแสงเป็นสิ่งสำคัญ อุปกรณ์ทางแสงในรูปแบบของเส้นใยแก้วนำแสงได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นอย่างมากมายซึ่งรวมถึงเส้นใยแก้วนำแสงชนิดที่รักษาสถานะโพลาไรซ์ได้ (Polarization Preserving Fibers)

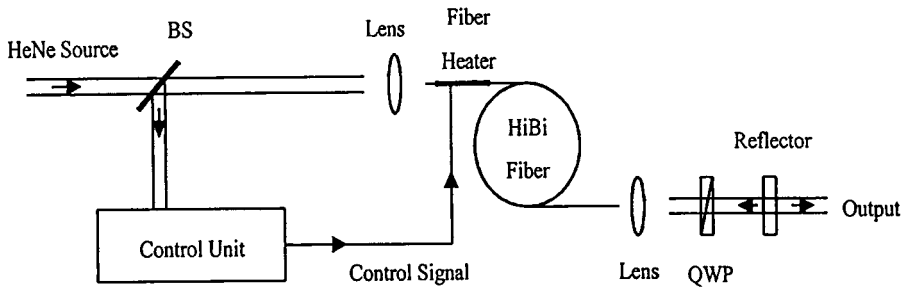
การทำงานของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้ก็คือ ถ้ามีการส่งสัญญาณแสงที่เป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นเข้าไปตามแนวแกนของเส้นใยแก้วนำแสง สัญญาณแสงที่ออกมาจากเส้นใยแก้วนำแสงตามแกนดังกล่าวก็ยังคงเป็นแสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นเช่นเดิม สาเหตุของการรักษาสถานะโพลาไรซ์ของแสงดังกล่าวเกิดจากปรากฏการณ์ไบรฟรินเจนซ์ในเส้นใยแก้วนำแสงนั่นเอง เส้นใยแก้วนำแสงที่สามารถรักษาสถานะของแสงโพลาไรซ์ไว้ได้นี้รู้จักกันในชื่อของเส้นใยแก้วนำแสงไฮไบรฟรินเจนซ์ (Highly Birefringence Fiber : HiBi Fiber) ซึ่งผลจากการประดิษฐ์กรรมดังกล่าวทำให้นักวิจัยมีแนวทางเลือกในการผลิตและควบคุมสถานะโพลาไรซ์ของแสงได้มากขึ้น

ในปี ค.ศ. 1986 ตาตัมและคณะ (Tatam *et al.*) [5] ได้เสนอวิธีการผลิตและควบคุมสถานะโพลาไรซ์ของแสงโดยเฉพาะอย่างยิ่งแสงโพลาไรซ์ในสถานะเชิงเส้น (รูปที่ 1.4) ได้อาศัยเส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะของโพลาไรซ์นี้เป็นตัวกลางของแสง โดยปราศจากการโค้ง บิด ออกแรงกระทำ หรือใช้สนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็ก ต่อเส้นใยแก้วนำแสงในการควบคุมสถานะโพลาไรซ์ของแสง ในชุดทดลองนี้ได้ใช้วิธีการควบคุมสถานะโพลาไรซ์ของแสงผ่านทางารมอดูเลตเส้นใยแก้วนำแสงตามแนวยาวด้วยพิโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ (Piezoelectric Transducer)



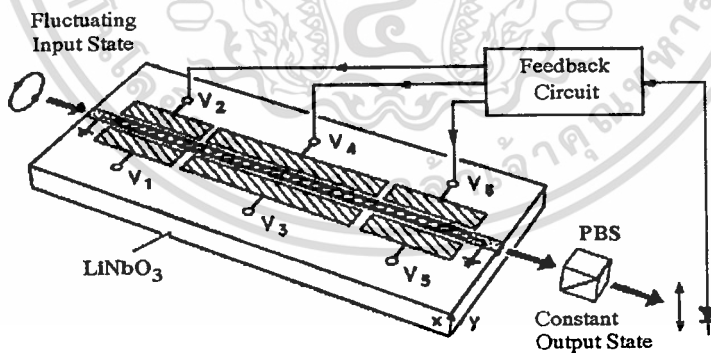
รูปที่ 1.4 แสดงชุดทดลองการมอดูเลตเฟสของแสงซึ่งเสนอโดยตาตัมและคณะ โดยที่ L : Laser, PZ : Piezoelectric Transducer, F : HiBi Fiber ,  $\lambda/4$  : Quarter- Wave Plate.

เมื่อปี ค.ศ. 1992 จอห์นสันและพานเนล (Johnson and Pannell) [6] ได้เสนอวิธีการควบคุมสถานะโพลาไรซ์ของแสงตามรูปที่ 1.5 โดยในชุดทดลองดังกล่าวมี หน่วยควบคุม (Control Unit) ทำหน้าที่ป้อนสัญญาณกลับไปควบคุมสถานะโพลาไรซ์ของแสงที่ถูกปล่อยออกมาจากเส้นใยแก้วนำแสง โดยการเปลี่ยนแปลงค่าไบรฟรินเจนซ์ ด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตัวทำความร้อน (Fiber Heater)



รูปที่ 1.5 แสดงชุดทดลองการควบคุมสถานะโพลาไรซ์ของแสงซึ่งเสนอโดยจอห์นสันและพานเนล โดยที่ BS : Beamsplitter, QWP : Quarter- Wave Plate

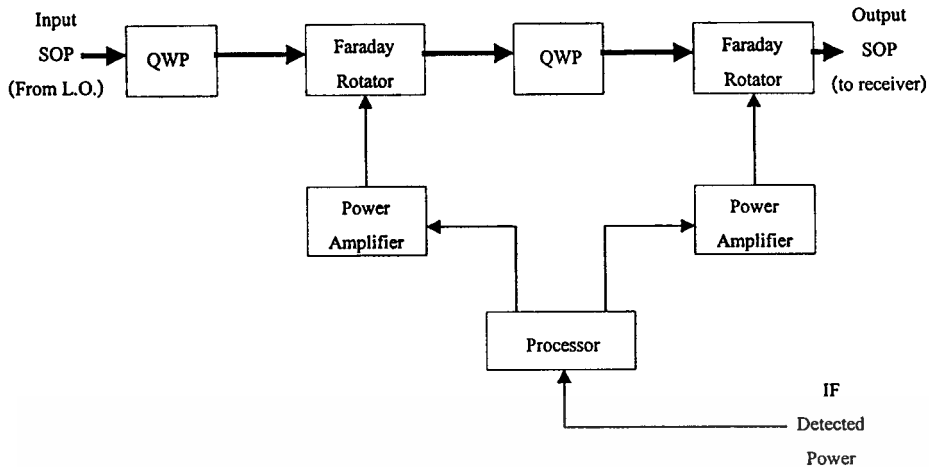
ในปีเดียวกันไฮด์มานน์และวาเลน (Heismann and Whalen) [7] ได้เสนอวิธีการผลิตและควบคุมแสงโพลาไรซ์ของแสงดังแสดงในรูปที่ 1.6 จากแสงโพลาไรซ์ที่มีสถานะเป็นวงรีส่งผ่านเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งมีอิเล็กโตรออปติก (Electro-optic) ชนิดลิเทียมไนโอเบต ( $\text{LiNbO}_3$ ) ทำหน้าที่เปลี่ยนสถานะโพลาไรซ์ของแสงซึ่งเคลื่อนที่ผ่าน โดยใช้วงจรรีเลย์ทรอนิกส์แบบป้อนกลับอย่างง่ายเป็นตัวควบคุมค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสมเพื่อทำให้ส่วนแรกทำหน้าที่เป็น QWP และตามด้วย HWP และ QWP สำหรับส่วนที่สองและสามตามลำดับซึ่งจะเกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน โดยเอาต์พุตที่ได้ออกมาจะมีสถานะโพลาไรซ์ที่คงที่สถานะหนึ่ง ข้อดีก็คือทำให้สามารถควบคุมสถานะโพลาไรซ์ของแสงเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว ข้อเสียคือต้องออกแบบวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ที่ค่อนข้างยุ่งยาก



รูปที่ 1.6 แสดงการควบคุมสถานะโพลาไรซ์ซึ่งเสนอโดยไฮด์มานน์และวาเลน โดยที่  $V_1, V_2 \dots V_6$  คือความต่างศักย์ไฟฟ้า

ต่อมาในปี ค.ศ. 1995 แพรทและคณะ (Prat *et al.*) [8] ได้เสนอวิธีการควบคุมแสงโพลาไรซ์อีกวิธีหนึ่งโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว (Single Mode) ทั้งหมดดังแสดงในรูป 1.7 ซึ่งมีหลักการคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.7 แสดงชุดผลิตและควบคุมสถานะโพลาไรซ์ซึ่งเสนอโดยแพททและคณะ โดยที่ SOP :

State of Polarization ; QWP : Quarter-Wave Plate

ดังนี้ เริ่มจากการนำแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นผ่านเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งมีการม้วนหรือขดให้เป็นวงกลมซึ่งทำหน้าที่เสมือน QWP แล้วใช้ฟาราเดย์โรเตเตอร์ (Faraday Rotator) เป็นตัวควบคุมสถานะโพลาไรซ์โดยทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเข้าไปเปลี่ยนสถานะโพลาไรซ์ของแสงที่ผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งข้อดีคือจะไม่มีการเคลื่อนย้ายในส่วนต่าง ๆ ของอุปกรณ์ที่ใช้ ข้อเสียคือการขดเส้นใยแก้วนำแสงให้เป็น QWP มีโอกาสสูญเสียทางแสงได้มาก

จากรูปแบบต่างๆของการผลิตและควบคุมสถานะโพลาไรซ์ของแสงดังที่ได้กล่าวมาทั้งหมด พบว่าชุดผลิตและควบคุมสถานะโพลาไรซ์ของแสงแบบเชิงเส้นที่เสนอโดยตาตัมและคณะ [5] เป็นหลักการที่น่าสนใจและมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวางจึงเลือกใช้เป็นแนวทางในการทำวิจัยนี้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาการควบคุมทิศทางของโพลาไรเซชันด้วยวิธีการมอดูเลตเฟสของแสงโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะของโพลาไรซ์เป็นตัวกลาง
- 2) เพื่อปรับปรุงและพัฒนาเทคนิคการมอดูเลตเฟสของแสง โดยมีเส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะของโพลาไรซ์เป็นตัวกลาง
- 3) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดค่าทางแสงต่าง ๆ เช่นวัดค่าคงที่ทางแสงของพื้นผิวต่างชนิดกันและค่าของการเลื่อนเฟสของตัวอย่างรวมถึงการนำไปใช้หาตำแหน่งแกนของผลึกทวิเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยในเรื่องการควบคุมทิศทางของโพลาริเซชันด้วยวิธีการมอดูเลตเฟสของแสงโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสง เริ่มจากศึกษาค้นคว้าทฤษฎีของการควบคุมทิศทางของโพลาริเซชันโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลาง โดยเริ่มจากการใช้เลเซอร์ฮีเลียมนีออนเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นแสงโพลาริเซชันเชิงเส้นส่องผ่านผลึกหน่วงเฟสหนึ่งในสี่ช่วงคลื่น (Quarter-Wave Plate : QWP) ทำให้เกิดแสงโพลาริเซชันวงกลม ผ่านเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง และออกมาผ่าน QWP อีกอันหนึ่งทำให้เกิดแสงโพลาริเซชันวงกลมหมุนในทิศทางตรงข้ามกับวงกลมแรก ซึ่งเมื่อแสงโพลาริเซชันวงกลมสองอันรวมกันจะให้แสงโพลาริเซชันเชิงเส้นที่มีมุมใด ๆ วัดเทียบกับแกนอ้างอิง เมื่อทำการมอดูเลตเฟสของแสงโดยการยืดหดเส้นใยแก้วนำแสงจะทำให้มุมของโพลาริเซชันเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมุมที่เปลี่ยนแปลงไปจะขึ้นอยู่กับการมอดูเลตทำให้สามารถควบคุมทิศทางของโพลาริเซชันได้ อีกทั้งยังสามารถนำแสงที่ได้ไปทำการวัดค่าทางพื้นผิวของวัสดุต่างชนิดกันได้ เช่น แก้ว (BK 7) แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) และทอง (Au) ฯลฯ ได้ เมื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับแหล่งอ้างอิงแล้วจะให้ผลที่ใกล้เคียงกันมาก และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดค่าการเลื่อนเฟส (Phase Shift) ของตัวอย่างที่เป็นผลึกหน่วงเฟสและสามารถนำไปวัดหาแกนเร็ว (Fast Axis) และแกนช้า (Slow Axis) ของผลึกหน่วงเฟสได้ซึ่งผลที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่ดี

### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้คือทำให้ทราบถึงเทคนิคการมอดูเลตเฟสของแสงอีกวิธีหนึ่งซึ่งสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการวัดทางแสงต่าง ๆ ได้ ตลอดจนสามารถที่จะประยุกต์ใช้งานทางด้านอุปกรณ์ตรวจรู้ (Sensing Device Applications) โดยอาศัยหลักการเปรียบเทียบสถานะโพลาริเซชันของแสงที่แตกต่างกันก่อนและหลังการตรวจวัด รวมถึงการประยุกต์ใช้เกี่ยวกับการศึกษาพื้นผิวของฟิล์มบาง โดยนำเทคนิคนี้ไปใช้ร่วมกับวิธีการวัดแบบเอลลิปโซเมตรี (Ellipsometry)

## บทที่ 2

# หลักการพื้นฐาน

งานวิจัยเรื่องการควบคุมทิศทางของแสงโพลาไรซ์นี้สิ่งแรกที่ต้องศึกษาปรากฏการณ์พื้นฐานทางแสงก่อนรวมทั้งคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัย ภายในบทนี้จะประกอบไปด้วยหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้คือ ธรรมชาติของแสง โพลาไรเซชัน โจนส์เวกเตอร์ (Jones Vector) โจนส์เมทริกซ์ (Jones Matrices) และสโตกส์เวกเตอร์ (Stokes Vector) ซึ่งจะเสนอเรียงตามลำดับดังต่อไปนี้คือ

### 2.1 ธรรมชาติของแสง

แสงเป็น “พลังงาน” ที่สามารถทำให้ประสาทตาของคนปกติเกิดความรู้สึกในการมองเห็น และสามารถเปลี่ยนรูปกับพลังงานรูปอื่นได้

ในราวกลางศตวรรษที่ 17 ที่ผ่านมา คนโดยทั่วไปเชื่อว่า แสงประกอบด้วยลำของอนุภาคเล็กๆ ซึ่งถูกปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง เช่น ดวงอาทิตย์ โดยอนุภาคเล็กๆ เหล่านี้จะเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดแสงในแนวเส้นตรง และจะผ่านวัตถุโปร่งแสงไปได้ แต่ถ้าตกกระทบวัตถุทึบแสงจะสะท้อนกลับมาและเมื่ออนุภาคเล็กๆ เหล่านี้กระทบกับดวงตา จะทำให้เราสามารถมองเห็นวัตถุได้ และสามารถที่จะใช้ทฤษฎีของอนุภาคนี้อธิบายการเดินทางเป็นเส้นตรง การสะท้อนกลับจากผิวเรียบ เช่น กระจกเงา ด้วยมุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ และการหักเหเมื่อเคลื่อนผ่านตัวกลางชนิดหนึ่งไปยังตัวกลางอีกชนิดหนึ่ง เช่น จากอากาศไปยังน้ำ

ในขณะเดียวกันมีนักวิทยาศาสตร์บางคนเกิดความคิดว่า แสงบางทีอาจจะไม่ใช่ประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆอย่างเดียว แต่อาจจะเป็นคลื่นบางชนิดก็ได้ ในปี ค.ศ. 1670 ฮอยเกนส์ (Huygens) ได้อธิบายให้เห็นว่า กฎการสะท้อนและการหักเหสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีคลื่น และยังสามารถอธิบายปรากฏการณ์ใหม่ได้อีกด้วย เช่น การหักเหเชิงซ้อน แต่ในขณะนั้นคนส่วนใหญ่ยังไม่ยอมรับฟังความคิดนี้ จึงมีข้อขัดแย้งเกิดขึ้นกล่าวคือ ถ้าแสงเคลื่อนที่เป็นคลื่นจริงแล้วก็ย่อมสามารถมองเห็นแสงอ้อมผ่านมุมห้องได้ ทั้งนี้เพราะคลื่นนั้นสามารถอ้อมผ่านวัตถุได้ อย่างไรก็ตามความยาวช่วงคลื่นของคลื่นแสงนั้นสั้นมาก ซึ่งแม้แสงจะสามารถหักเหผ่านสิ่งกีดขวางได้ก็ตามก็ยังไม่สามารถเห็นได้ ผู้สังเกตเห็นปรากฏการณ์อันนี้คือกริมาลดี (Grimaldi) ในปี ค.ศ. 1665 และเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเลี้ยวเบนของแสง (Diffraction of Light)

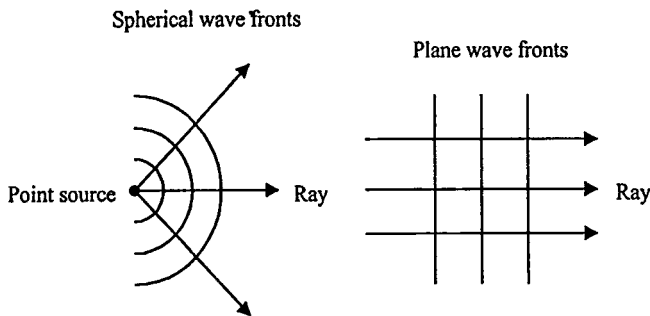
ในปี ค.ศ. 1827 ยู้ง (Young) และเฟรสเนล (Fresnel) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับเรื่อง การแทรกสอด (Interference) และการวัดความเร็วของคลื่นแสงในของเหลว ซึ่งการทดลองนี้แสดงให้เห็น

เห็นว่า การใช้ทฤษฎีของอนุภาคอย่างเดียวนั้นไม่เพียงพอ ต้องใช้ปรากฏการณ์แทรกสอดและเลี้ยวเบนของแสงอธิบายด้วย

ในปี ค.ศ. 1873 แมกซ์เวลล์ (Maxwell) นักวิทยาศาสตร์ชาวสกอตได้พิสูจน์ให้เห็นว่าวัตถุที่สามารถสั่น (Oscillate) ได้ จะต้องแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นสามารถคำนวณได้ประมาณ  $3 \times 10^8$  เมตร/วินาที ซึ่งค่าที่ประมาณได้นี้จะเท่ากับความเร็วในการเคลื่อนที่ของแสงที่วัดได้จริง ๆ จากหลักฐานที่ได้นี้จึงยืนยันได้ชัดเจนว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีความยาวช่วงคลื่นสั้นมาก ภายหลังจากการทดลองของแมกซ์เวลล์แล้ว ในปี ค.ศ. 1888 เฮิร์ตซ์ (Hertz) ได้ใช้วงจรกำเนิดความถี่สร้างคลื่นที่มีความยาวคลื่นสั้นมาก เรียกว่า ไมโครเวฟ (Microwave) และแสดงให้เห็นว่าคลื่นนี้มีคุณสมบัติของคลื่นแสงครบทุกประการ กล่าวคือสะท้อนได้ หักเหได้ โฟกัสไปรวมกันที่จุดหนึ่งโดยใช้เลนส์ได้ และมีสมบัติโพลาไรซ์ได้เช่นเดียวกับคลื่นแสง ดังนั้นทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ และการทดลองของเฮิร์ตซ์จึงนำมาสู่ความคิดที่ว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในราวศตวรรษที่ 19 ผู้คนส่วนใหญ่จึงเชื่อกันว่าแสงเป็นคลื่นชนิดหนึ่ง อย่างไรก็ตามทฤษฎีนี้ยังไม่สามารถที่จะอธิบายถึงปรากฏการณ์ปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากผิวของตัวนำ เมื่อมีคลื่นมาตกกระทบผิวของตัวนำนั้นได้

ในปี ค.ศ. 1905 ไอสไตน์ (Einstein) ได้ตั้งสมมติฐานไว้ว่า พลังงานของลำแสงแทนที่จะถูกปล่อยออกมาผ่านบรรยากาศในรูปของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า นั้นกลับรวมกันเป็นกลุ่มก้อนเรียกว่า โฟตอน (Photon) โดยโฟตอนแต่ละกลุ่มจะมีความถี่โดยเฉพาะ และมีพลังงานแปรผันตามความถี่ของขบวนการปลดปล่อยเนื่องจากไฟฟ้าพลังแสง (Photoelectric Emission) ซึ่งขึ้นอยู่กับการถ่ายเทพลังงานจากโฟตอนไปสู่อิเล็กตรอน และต่อมา มิลลิแกน (Millikan) ได้ทำการทดลองซึ่งสรุปผลที่ได้จากการทดลองได้ว่า พลังงานจลน์ของโฟตอนนั้นเป็นไปตามทฤษฎีของไอสไตน์ทุกประการ

เมื่อแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงพิจารณาค้นแสงด้วยการพิจารณาหน้าคลื่น (Wave Fronts) โดยมีแหล่งกำเนิดของคลื่นแสงเล็ก ๆ เป็นจุดศูนย์กลางรวมอยู่ที่ต้นกำเนิด ตามรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาด้วยหน้าคลื่นทรงกลม (Spherical Wave Fronts) และจุดที่อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดแสงมาก ๆ รัศมีของหน้าคลื่นทรงกลมก็จะใหญ่มาก ดังนั้นจึงสามารถที่จะมองหน้าคลื่นที่อยู่ห่างจากจุดกำเนิดมาก ๆ นี้เป็นหน้าคลื่นระนาบ (Plane Wave Fronts) จากแนวความคิดนี้จึงทำให้สะดวกมากในการมองรังสีของแสง เพราะรังสีจะแสดงการไหลของพลังงานในลำแสง

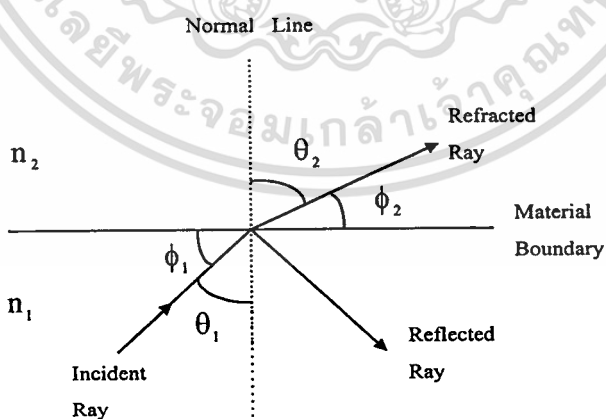


รูปที่ 2.1 แสดงหน้าคลื่นของแสงแบบวงกลมและแบบระนาบ

เมื่อพิจารณาการเดินทางของแสงผ่านตัวกลางใด ๆ จะพบว่าแสงมีความเร็วที่แตกต่างกันไปเนื่องจากค่าดัชนีหักเหในตัวกลางนั้นแตกต่างกัน ซึ่งค่าดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางจะนิยามได้ว่า “เป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วของแสงในสุญญากาศและความเร็วของแสงในตัวกลางที่แสงผ่าน” ถ้าให้  $n$  เป็นดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางใด ๆ จะได้ว่า

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $c$  เป็นค่าความเร็วของแสงในสุญญากาศซึ่งมีค่าประมาณ  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที และ  $v$  เป็นความเร็วของแสงในตัวกลางใด ๆ โดยค่า  $n$  จะมีค่าเป็น 1 ก็ต่อเมื่อเดินทางผ่านสุญญากาศ มีค่าเป็น 1.33 เมื่อเดินทางผ่านน้ำ มีค่าเป็น 1.5 เมื่อเดินทางผ่านแก้ว และมีค่าเป็น 2.42 เมื่อเดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นเพชร เป็นต้น



รูปที่ 2.2 แสดงการสะท้อนและหักเหของแสงที่เดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน เมื่อ  $n_1$  และ  $n_2$  เป็นค่าดัชนีหักเห โดย  $n_2 < n_1$ ,  $\theta_1$  เป็นมุมตกกระทบและ  $\theta_2$  เป็นมุมหักเห

เพื่อให้เข้าใจแนวคิดของการสะท้อนและการหักเหของแสงได้ง่ายขึ้นจะพิจารณาคุณสมบัติของรังสีของแสง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเดินทางของแสงผ่านตัวกลาง นั่นคือเมื่อรังสีของแสงเดินทางไปตกกระทบตัวกลางที่ต่างกันสองชนิด แสงส่วนหนึ่งจะเกิดการสะท้อนกลับเข้าไปในตัวกลางแรกและจะมีแสงอีกส่วนหนึ่งที่เหลืออยู่จะเกิดการเลี้ยวเบน (หักเห) เข้าไปในตัวกลางที่สองดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งเมื่อกำหนดให้  $n_2 < n_1$  แล้วการเลี้ยวเบนหรือการหักเหของแสงที่มีการเชื่อมต่อระหว่างสองตัวกลางนี้เกิดขึ้นเนื่องจากผลต่างของความเร็วแสงในตัวกลางทั้งสอง โดยมีความสัมพันธ์จากระยะของตัวกลางทั้งสองเป็นไปตามกฎของสเนลล์ (Snell's law) และกำหนดจาก

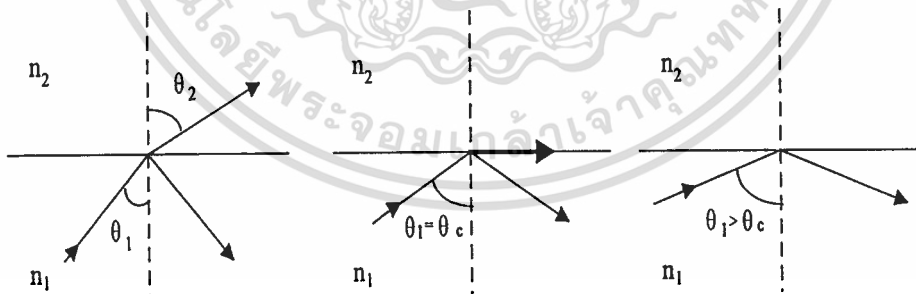
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.2)$$

หรือเท่ากับ

$$n_1 \cos \phi_1 = n_2 \cos \phi_2 \quad (2.3)$$

ซึ่งกำหนดมุมดังรูปที่ 2.2 ดังนั้นแสงที่เดินทางไปตกกระทบกับรอยต่อของตัวกลางทั้งสองซึ่งทำมุม  $\theta_1$  จะต้องเท่ากับมุมของแสงที่สะท้อนออกจากตัวกลางทั้งสองนี้

เมื่อพิจารณาในกรณีที่แสงเดินทางผ่านตัวกลางที่ทึบกว่า (มีค่าดัชนีหักเหสูง) ไปยังตัวกลางที่เบาบางกว่า โดยทำมุมเป็น  $\theta_1$  เมื่อตกกระทบกับตัวกลางก็จะเกิดการหักเหเป็นมุม  $\theta_2$  เมื่อแสงทำมุมเป็นมุมเท่ากับมุมวิกฤตแล้วแสงส่วนหนึ่งจะเดินทางเป็นมุมหักเหขนานกับผิวตัวกลาง ถ้ามุมของแสงที่ตกกระทบยิ่งโตขึ้นก็จะเกิดการสะท้อนกลับหมด (Total Internal Reflection) ของแสงภายในตัวกลางนั้นดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการหักเหและการสะท้อนกลับหมดของแสงในตัวกลางที่เป็นแก้ว ( $n_1$ ) และอากาศ ( $n_2$ )

พิจารณาดวงกลางที่เป็นแก้วกับอากาศดังรูปที่ 2.3 เมื่อแสงผ่านพื้นผิวของแก้วไปตกกระทบกับตัวกลางซึ่งเป็นอากาศ ถ้า  $\theta_2 = 90$  องศา ดังนั้น  $\sin \theta_2 = 1$  มุมวิกฤตในตัวกลางที่เป็นแก้วจะมีค่าเป็น

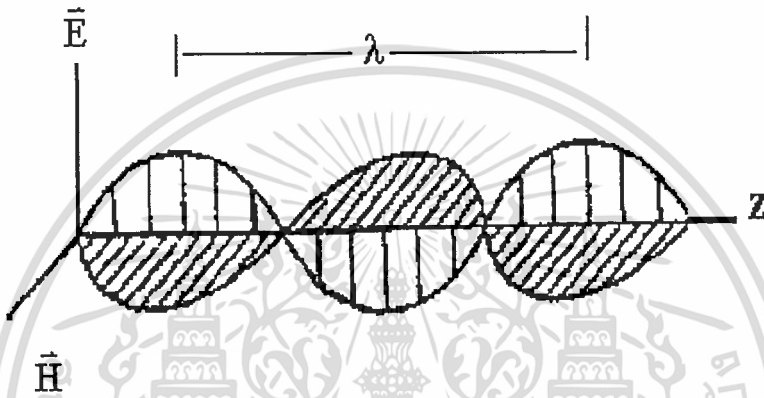
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\theta_c$  คือมุมวิกฤต (Critical Angle)

## 2.2 โพลาริเซชัน

ในที่นี้จะพิจารณาว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามแบบของแมกซ์เวลล์ โดยที่รูปแบบการสั่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีความถี่เท่ากันแต่จะทำมุมตั้งฉากกัน ดังแสดง ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการสั่นของแสงธรรมชาติ ซึ่งมีสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก  $\vec{H}$

พิจารณาแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 2.4 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\vec{E}(z, t) = E_{0x} \sin[2\pi vt - (2\pi z / \lambda) + \phi_0] \quad (2.5)$$

เมื่อแสงเคลื่อนที่ในทิศทางตามแกน  $z$  และเป็นโพลาริซ์เชิงเส้นมีทิศทางของสนามไฟฟ้าตามแกน  $x$  เมื่อ  $v$  เป็นความถี่ของคลื่นแสง  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่น  $E_{0x}$  เป็นแอมพลิจูดสูงสุด และ  $\phi_0$  เป็นค่าคงที่ของเฟส โดยมีความถี่เชิงมุมที่ได้คือ  $\omega = 2\pi v$  และมีเลขคลื่น (Wave Number)  $k = 2\pi/\lambda$  แล้วสมการ (2.5) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\vec{E}(z, t) = E_{0x} \sin[\omega t - kz + \phi_0] \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสนามแม่เหล็กของแสงจะสั้นเหมือนกับสนามไฟฟ้าแค่เวกเตอร์สนามแม่เหล็ก  $\vec{H}$  จะทำมุมตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าในทิศทางตามแกน  $y$  ซึ่งสนามแม่เหล็กมีค่าเป็น

$$\vec{H}(z, t) = H_{0y} \sin[\omega t - kz + \phi_0] \quad (2.7)$$

จากหลักการพื้นฐานของคลื่นแสงธรรมชาตินี้ จะพิจารณาในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการโพลาไรเซชันของแสง ซึ่งในการจำแนกชนิดของโพลาไรเซชันจะพิจารณาความสัมพันธ์ทางเฟส ( $\phi_0$ ) ของทิศทาง  $x$  และ  $y$  และเปรียบเทียบขนาดระหว่าง  $E_x$  และ  $E_y$  ซึ่งสามารถจำแนกชนิดของแสงโพลาไรเซชันได้ดังนี้คือ แสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้น (Linearly Polarized Light) แสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลม (Circularly Polarized Light) และแสงโพลาไรซ์ชนิดวงรี (Elliptically Polarized Light)

### 2.2.1 แสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้น

ในที่นี้จะพิจารณาว่าแสงเป็นส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าเท่านั้น เนื่องจากโพลาไรเซชันเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเฉพาะคลื่นตามขวางเท่านั้น ดังนั้นจากการที่แสงเคลื่อนที่ตามแกน  $z$  จะสามารถแสดงแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีทิศทางตามแกน  $x$  ได้โดย

$$\vec{E}_x = E_{0x} \sin[\omega t - kz + \phi_0] \hat{i} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $E_{0x}$  เป็นแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า และ  $\hat{i}$  เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยตามแกน  $x$  และในทำนองเดียวกันแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นในทิศทางตามแกน  $y$  สามารถเขียนได้โดย

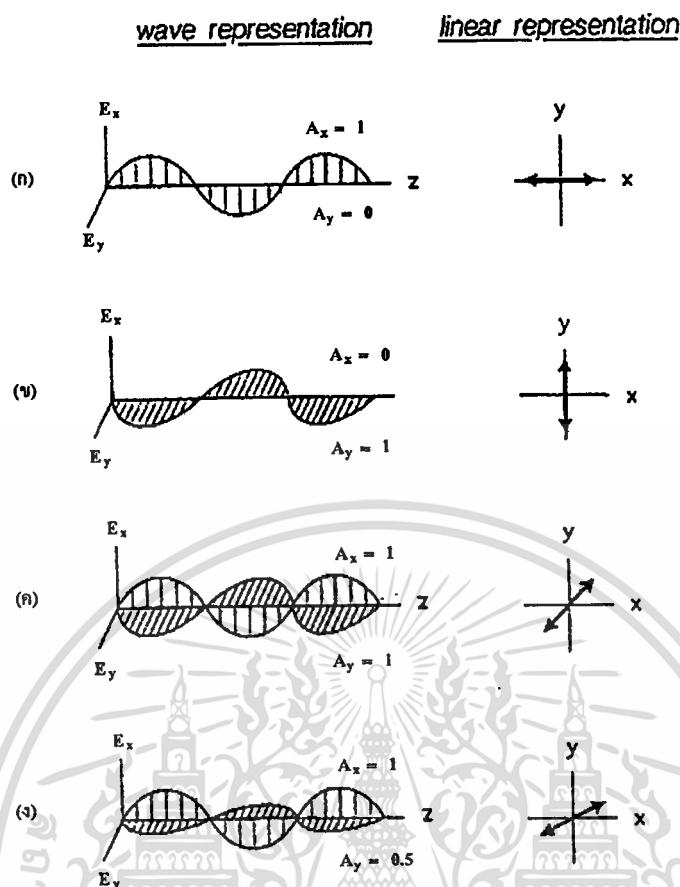
$$\vec{E}_y = E_{0y} \sin[\omega t - kz + \phi_0] \hat{j} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\hat{j}$  เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยตามแกน  $y$  สนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นสามารถกระทำในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่และสามารถแสดงในรูปของผลรวมของเวกเตอร์  $\vec{E}_x$  และ  $\vec{E}_y$  ได้เป็น

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_x + \vec{E}_y \\ &= \{E_{0x} \hat{i} + E_{0y} \hat{j}\} \sin[\omega t - kz + \phi_0] \end{aligned} \quad (2.10)$$

แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นซึ่งมีแกนโพลาไรเซชันทำมุมใด ๆ กับทิศทางในระนาบ  $xy$  สามารถแสดงได้โดยส่วนประกอบทั้งสองตามแกน  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งความสัมพันธ์ของขนาดส่วนประกอบทั้งสองจะเป็นตัวกำหนด การทำมุมกับแกนโพลาไรเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงแสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นซึ่งมีมุมที่เปลี่ยนไป (ก) ตามแกน x (ข) ตามแกน y (ค) ทำมุม  $45^\circ$  กับแกน x (ง) ทำมุม  $26^\circ$  กับแกน x โดยที่  $A_x$  และ  $A_y$  เป็นแอมพลิจูดในแนวแกน x และแกน y ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามในส่วนประกอบทั้งสองจะต้องมีค่าความถี่เชิงมุม  $\omega$  เหมือนกันและมีค่าเฟส  $\phi_0$  เหมือนกันหรือต่างกันเท่ากับ  $\pi$  คอนดို့ไปจะพิจารณาผลของความแตกต่างกันของเฟสจากส่วนประกอบทั้งสองในกรณีอื่น ๆ

## 2.2.2 แสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลม

ในกรณีที่แอมพลิจูดของคลื่นในส่วนประกอบของแกนซึ่งตั้งฉากกันนั้นเท่ากัน กล่าวคือ

$E_{0x} = E_{0y} = E_0$  และปรากฏว่าเฟสต่างกัน  $\phi = \pm \frac{\pi}{2}$  จะได้ว่า

$$\vec{E}_x(z, t) = \hat{i}E_0 \cos(kz - \omega t) \quad (2.11)$$

และ

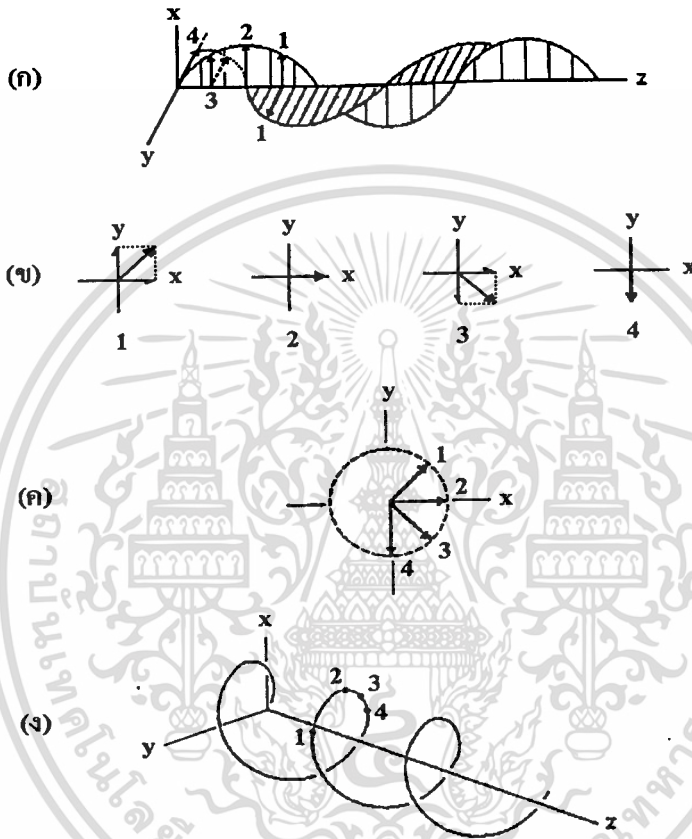
$$\vec{E}_y(z, t) = \hat{j}E_0 \sin(kz - \omega t) \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมีสมการคลื่นรวมเป็นดังนี้

$$\vec{E} = E_0 [\hat{i} \cos(kz - \omega t) + \hat{j} \sin(kz - \omega t)] \quad (2.13)$$

จากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่าแอมพลิจูดของ  $\vec{E}$  คือ  $(\vec{E} \cdot \vec{E})^{1/2} = E_0$  เป็นค่าคงที่ แต่ทิศของ  $\vec{E}$  เปลี่ยนไป



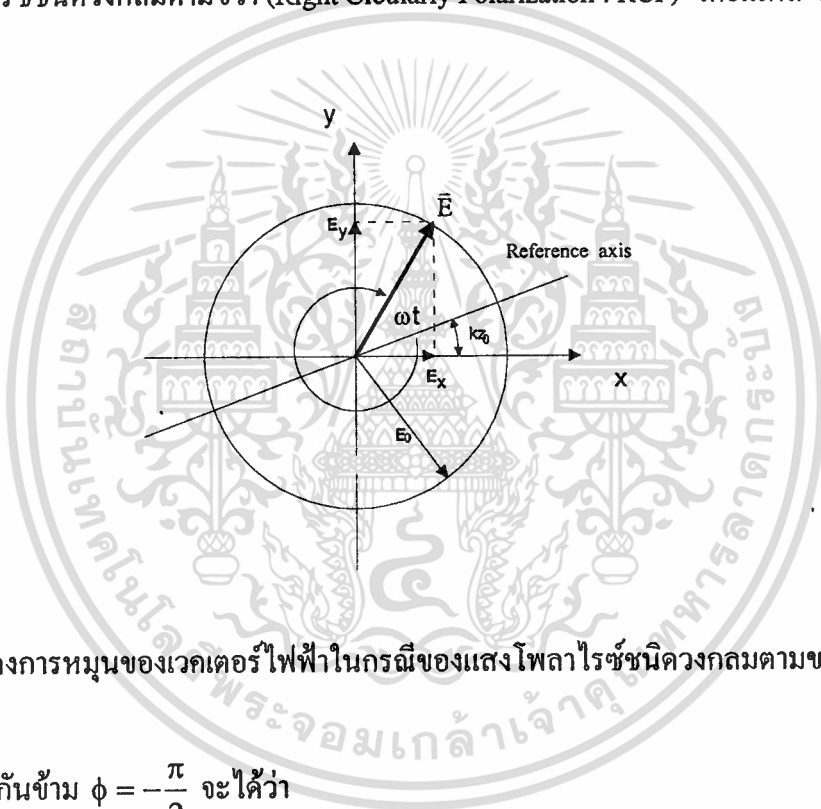
รูปที่ 2.6 แสดงแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามขวางหรือตามเข็มนาฬิกา (ก) ส่วนประกอบของแสงเชิงเส้นที่ตั้งฉากกันมีแอมพลิจูดเท่ากันและเฟสต่างกัน  $90^\circ$  (ข) ผลรวมเวกเตอร์ของส่วนประกอบทั้งสองใน (ก) (ค) แสดงสนามไฟฟ้าในรูปของแผนภาพวงกลมซึ่งมองในทิศทางเข้าไปหาแหล่งกำเนิดแสง (ง) แสดงทางเดินของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า

ตามเวลาโดยไม่อยู่ในระนาบใดระนาบหนึ่งดังในกรณีของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7 จะเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งใด ๆ  $z_0$  บนแกน เมื่อ  $t = 0$   $\vec{E}$  จะอยู่บนแกนที่กำหนดไว้ซึ่งเป็นแกนอ้างอิง (Reference) ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{E}_x = \hat{i}E_0 \cos kz_0 \quad \text{และ} \quad \vec{E}_y = \hat{j}E_0 \sin kz_0 \quad (2.14)$$

เมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่ง  $t = kz_0/\omega$  จะได้ว่า  $\vec{E}_x = \hat{i}E_0$ ,  $\vec{E}_y = 0$  และ  $\vec{E}$  อยู่ในแกน  $x$  คลื่นรวม  $\vec{E}$  จึงหมุนตามเข็มนาฬิกาด้วยความถี่เชิงมุม  $\omega$  โดยมีทิศสวนทางกับทิศการเคลื่อนที่ของแสงตรงไปยังตำแหน่งที่ตั้งของแหล่งกำเนิดแสง หรืออาจกล่าวได้ว่า  $\vec{E}_y$  นำ  $\vec{E}_x$  อยู่  $\frac{\pi}{2}$  เรเดียน ซึ่งหมายความว่า  $\vec{E}_y$  จะมีค่าสูงสุดก่อนที่  $\vec{E}_x$  จะมีค่าสูงสุดล่วงหน้าไปก่อนถึง 1 ใน 4 ของแต่ละรอบ จึงเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าหมุนเป็นวงกลมตามเข็มนาฬิกา และเวกเตอร์  $\vec{E}$  จะหมุนไปครบรอบ โดยแสงจะพุ่งไปข้างหน้าเท่ากับความเร็วหนึ่งช่วงคลื่น เรียกแสงที่มีสถานะโพลาไรเซชันลักษณะนี้ว่า แสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามขวา (Right Circularly Polarization : RCP) โดยมีเฟส  $\phi = +\frac{\pi}{2}$

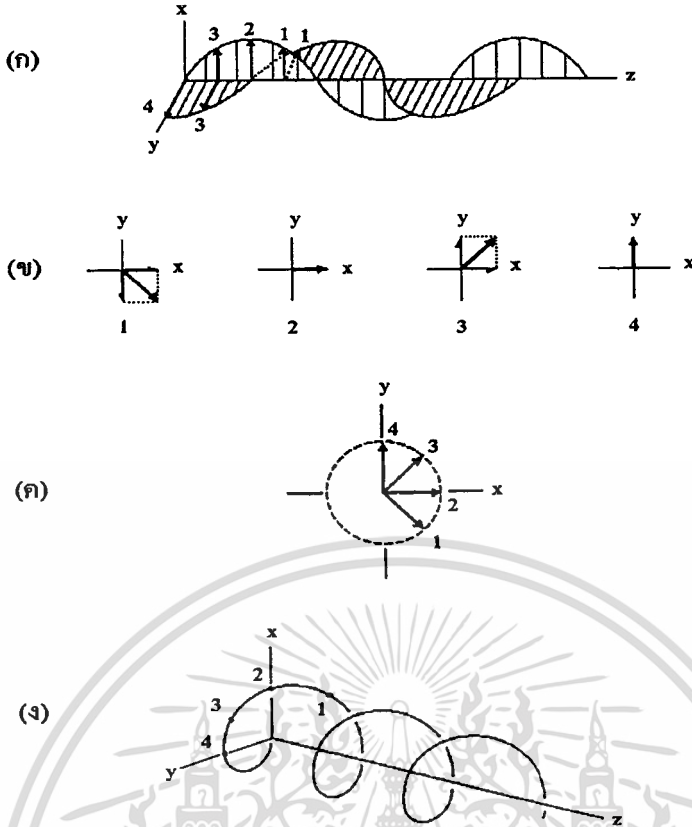


รูปที่ 2.7 แสดงการหมุนของเวกเตอร์ไฟฟ้าในกรณีของแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามขวา

ในกรณีที่ตรงกันข้าม  $\phi = -\frac{\pi}{2}$  จะได้ว่า

$$\vec{E} = E_0 [\hat{i} \cos(kz - \omega t) - \hat{j} \sin(kz - \omega t)] \quad (2.15)$$

จะเห็นได้ว่าแอมพลิจูดไม่ได้ต่างไปจากกรณีข้างต้น แต่  $\vec{E}$  จะหมุนทวนเข็มนาฬิกาจึงเรียกว่าเป็นแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามซ้าย (Left Circularly Polarization :LCP) ซึ่ง  $\vec{E}_y$  จะตามหลัง  $\vec{E}_x$  ไปเป็น 1 ใน 4 ของแต่ละรอบ ทำให้หมุนทวนเข็มนาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามซ้ายหรือทวนเข็มนาฬิกา (ก) ส่วนประกอบของแสงเชิงเส้นที่ตั้งฉากกันมีแอมพลิจูดเท่ากันและเฟสต่างกัน  $90^\circ$  (ข) ผลรวมเวกเตอร์ของส่วนประกอบทั้งสองใน(ก) (ค) แสดงสนามไฟฟ้าในรูปของแผนภาพวงกลมซึ่งมองในทิศทางเข้าไปหาแหล่งกำเนิดแสง (ง) แสดงทางเดินของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า

พิจารณาโดยทั่ว ๆ ไปจะพบว่าสถานะโพลาไรซ์ชนิดวงกลมทั้งสองแบบนี้จะเป็นไปได้เมื่อเฟส  $\phi$  มีค่าต่าง ๆ กันตามลำดับดังต่อไปนี้

เมื่อ  $\phi = +\frac{\pi}{2} + 2m\pi$  โดยที่  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  คือชนิดวงกลมตามขวา

เมื่อ  $\phi = -\frac{\pi}{2} + 2m\pi$  โดยที่  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  คือชนิดวงกลมตามซ้าย

ถ้านำแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมทั้งสองแบบนี้ซึ่งมีแอมพลิจูดเท่ากันมารวมกันก็จะกลายเป็นแสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นไป ตัวอย่างเช่น คลื่นโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามขวาในสมการ (2.14) และคลื่นโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามซ้ายในสมการ (2.15) เมื่อนำมารวมกันจะได้สมการของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า ดังนี้

$$\vec{E} = 2E_0 \hat{i} \cos(kz - \omega t) \tag{2.16}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะเห็นว่าคลื่นนี้มีแอมพลิจูดคงที่และมีรูปแบบเป็นไปตามลักษณะของโพลาไรเซชันชนิดเชิงเส้น

### 2.2.3 แสงโพลาไรซ์ชนิดวงรี

จากการพิจารณาที่ผ่านมารวมกันในส่วนประกอบของแสงโพลาไรซ์ที่มีส่วนประกอบของเฟสเหมือนกันหรือต่างกัน  $\pi$  นั้นแสงโพลาไรซ์จะเป็นชนิดเชิงเส้น ในกรณีที่เฟสต่างกัน  $\frac{\pi}{2}$  หรือ  $-\frac{\pi}{2}$  และมีแอมพลิจูดเท่ากันจะเป็นส่วนประกอบของโพลาไรซ์จะเป็นวงกลม แต่ถ้าส่วนประกอบในการรวมกันนั้นทำให้ไม่เท่ากันจะเป็นกรณีของโพลาไรซ์จะเป็นวงรี

พิจารณาเมื่อ  $E_{ox} \neq E_{oy}$  และ  $\phi = \pm\frac{\pi}{2}$  จะได้ว่า

$$\vec{E}_x = E_{ox} \cos(kz - \omega t)\hat{i} \quad (2.17)$$

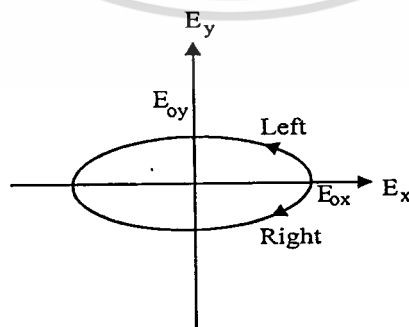
และ

$$\vec{E}_y = E_{oy} \cos(kz - \omega t + \phi)\hat{j} \quad (2.18)$$

หรือเขียนใหม่ได้ว่า

$$\frac{E_x^2}{E_{ox}^2} + \frac{E_y^2}{E_{oy}^2} = \cos^2(kz - \omega t) + \cos^2(kz - \omega t + \phi) = 1 \quad (2.19)$$

จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์นี้คือสมการวงรีที่มีแกนหลักเป็น  $2E_{ox}$  และ  $2E_{oy}$  ตามแนวแกน x กับแนวแกน y ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.9 โดยเมื่อ  $\phi = +\frac{\pi}{2}$  สนามไฟฟ้าจะเคลื่อนที่เป็นวงรีตามขวา แต่ถ้า  $\phi = -\frac{\pi}{2}$  สนามไฟฟ้าจะเคลื่อนที่เป็นวงรีตามซ้าย



รูปที่ 2.9 แสดงการกำหนดทิศทางของการหมุนสำหรับโพลาไรเซชันชนิดวงรี

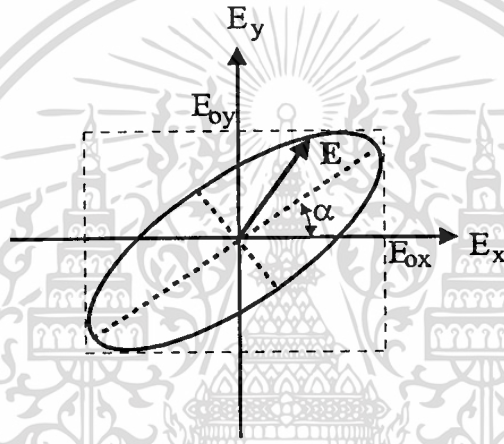
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีทั่ว ๆ ไปสมการวงรีจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)\cos\phi = \sin^2\phi \quad (2.20)$$

โดยที่แกนหลัก (Major Axis) จะทำมุม  $\alpha$  กับแกน x ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\tan 2\alpha = \frac{2E_{0x}E_{0y}\cos\phi}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะทั่วไปของคลื่นโพลาไรซ์ชนิดวงรี

ซึ่งแกนหลักจะเป็นแกนเดียวกับแกน x โดยที่  $\alpha = 0$  เมื่อเฟสสัมพันธ์มีค่าดังนี้

$$\phi = \pm \frac{\pi}{2}, \pm \frac{3\pi}{2}, \pm \frac{5\pi}{2}, \dots$$

และจะได้ว่า

$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} = 1 \quad (2.22)$$

ซึ่งจะเห็นว่าตรงกับที่ได้พิจารณาแล้วในความสัมพันธ์ ตามสมการ (2.19)

ในกรณีที่  $E_{0x} = E_{0y}$  จะได้ว่า  $E_x^2 + E_y^2 = A_x^2$  เป็นความสัมพันธ์ในรูปแบบของโพลาไรเซชันชนิดวงกลมนั่นเอง และถ้าเฟสสัมพันธ์  $\phi$  มีค่าเป็นจำนวนเท่าของ  $\pi$  จะได้ว่าสมการ (2.20)

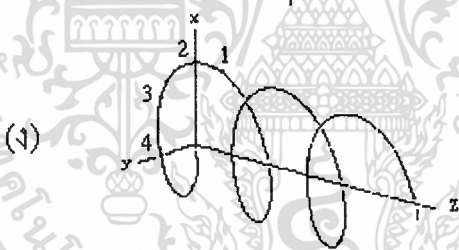
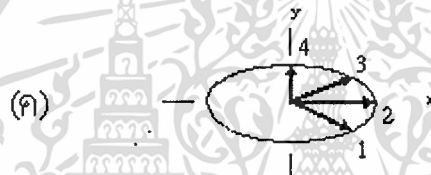
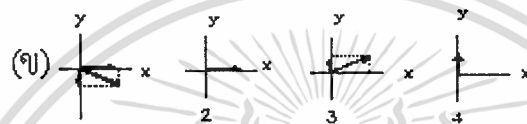
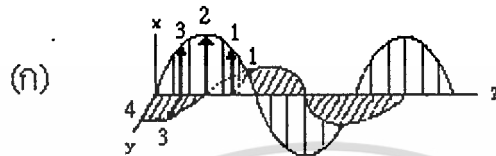
จะกลายเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_y = \pm \frac{E_{0y}}{E_{0x}} E_x \quad (2.23)$$

ซึ่งนับว่าอยู่ในรูปแบบของโพลาไรเซชันเชิงเส้นที่มีความชันเป็น  $\pm E_{0y}/E_{0x}$

ในรูปที่ 2.11 นี้จะเป็นการแสดงลักษณะของคลื่นแสงโพลาไรซ์ชนิดวงรีตามซ้าย



รูปที่ 2.11 แสดงแสงโพลาไรซ์ชนิดวงรีตามซ้ายหรือทวนเข็มนาฬิกา (ก) ส่วนประกอบของแสงเชิงเส้นที่ตั้งฉากกันมีแอมพลิจูดเท่ากันและเฟสต่างกัน  $90^\circ$  (ข) ผลรวมเวกเตอร์ของส่วนประกอบทั้งสองใน (ก) (ค) แสดงสนามไฟฟ้าในรูปของแผนภาพวงกลมซึ่งมองในทิศทางเข้าไปหาแหล่งกำเนิดแสง (ง) แสดงทางเดินของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า

### 2.3 โจนส์เวกเตอร์

เป็นตัวแปรทางคณิตศาสตร์ที่ใช้บรรยายการโพลาไรเซชันของแสง ซึ่งก่อนที่จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของโจนส์แคลคูลัส (Jones Calculus) นั้น จะพิจารณาเวกเตอร์สนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นในทิศทาง  $x$  และ  $y$  (เคลื่อนที่ตามแกน  $z$ ) กำหนดเป็น

$$\vec{E}_x = A_x \sin[kz - \omega t + \phi_0] \hat{j}_i \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{E}_y = A_y \sin[kz - \omega t + \phi_0] \hat{j} \quad (2.25)$$

(กรณีนี้ใช้  $A_x$  และ  $A_y$  แทน  $E_{0x}$  และ  $E_{0y}$  จากที่ผ่านมา) เมื่อแสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นทำมุมในทิศทางเฉพาะ นั้นการรวมกันของส่วนประกอบทั้งสอง (สมมติให้เฟสเหมือนกัน) คือ

$$\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_y = A_x \sin(kz - \omega t + \phi) \hat{i} + A_y \sin(kz - \omega t + \phi) \hat{j} \quad (2.26)$$

กรณีทั่วไปของแสงโพลาไรซ์ชนิดวงรีนั้นเฟสขององค์ส่วนประกอบ  $x$  และ  $y$  จะไม่เหมือนกัน ดังนั้นเฟสที่ให้เฉพาะคือ  $\phi_x$  และ  $\phi_y$  ตามลำดับจะได้

$$\vec{E} = A_x \sin(kz - \omega t + \phi_x) \hat{i} + A_y \sin(kz - \omega t + \phi_y) \hat{j} \quad (2.27)$$

เวกเตอร์สนามไฟฟ้าในเวลาใด ๆ ที่ได้จากจุดบนแกน  $x$  เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์สมการ (2.27) จะเขียนในรูปจำนวนเชิงซ้อนได้ดังนี้

$$\vec{E} = A_x e^{i(kz - \omega t + \phi_x)} \hat{i} + A_y e^{i(kz - \omega t + \phi_y)} \hat{j} \quad (2.28)$$

โดยสมการที่ (2.28) สามารถเขียนให้เท่ากันในเครื่องหมายคอดล์มเวกเตอร์ได้

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} \vec{E}_x \\ \vec{E}_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_x e^{i(kz - \omega t + \phi_x)} \\ A_y e^{i(kz - \omega t + \phi_y)} \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

แยกตัวประกอบออกมาจะได้

$$\vec{E} = e^{i(kz - \omega t)} \begin{pmatrix} A_x e^{i\phi_x} \\ A_y e^{i\phi_y} \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

เมื่อเราตัดเทอมของเวลาออกไปเวกเตอร์ในสมการ (2.30) คือโจนส์เวกเตอร์ (หรือ Maxwell Column) ในการคำนวณหาค่าความเข้มของแสงที่ใช้ในการทดลองนั้น โจนส์เวกเตอร์ จะมีประโยชน์มากสำหรับการหาความเข้มแสง กรณีนี้ความเข้มของแสง  $I$  หาได้จาก

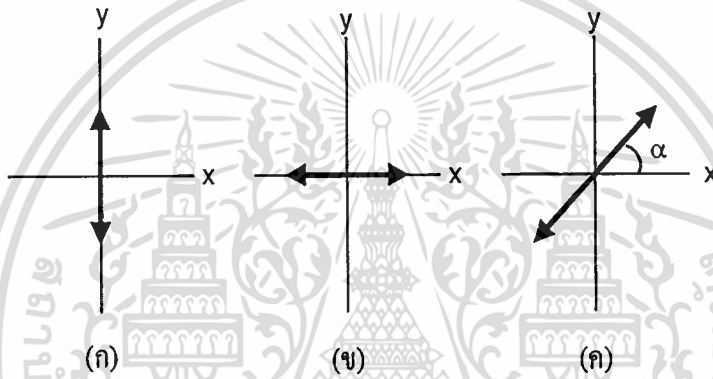
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = e^{-i\omega t} e^{i\omega t} \left| A_x e^{-i\phi_x} \quad A_y e^{-i\phi_y} \right| \begin{array}{l} A_x e^{i\phi_x} \\ A_y e^{i\phi_y} \end{array} \quad (2.31)$$

ซึ่งเท่ากับ

$$I = A_x^2 + A_y^2 \quad (2.32)$$

พิจารณารูปแบบของโหนดเวกเตอร์ที่ใช้แทนสถานะของโพลาไรเซชันเชิงเส้น วงกลม วงรี โดยพิจารณาประกอบกับรูปที่ 2.12 รูปนี้แสงเคลื่อนที่ในทิศ +z (ทิศทางพุ่งออกจากกระดาษ) ในรูป (ก) เป็นการแสดงโพลาไรซ์เชิงเส้นในแนวตั้ง ในกรณีนี้จะไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน x หรือ  $E_{0x} = 0$  และแอมพลิจูดในแนวแกน y มีค่า A หรือ  $E_{0y} = A$



รูปที่ 2.12 แสดงสนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีการวางตัวของสนามไฟฟ้าในแนวต่างๆ กัน โดยทิศที่แสงเคลื่อนที่ไปทิศทาง +z

เพื่อความสะดวกกำหนดให้  $\phi_y = 0$  จะได้โหนดเวกเตอร์สำหรับแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นในแนวตั้งเป็น

$$\vec{E} = \begin{vmatrix} 0 \\ A \end{vmatrix} = A \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (2.33)$$

เราอาจกำหนดให้ A มีค่าเป็น 1 และได้โหนดเวกเตอร์สำหรับแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นในแนวตั้งเป็น

$$\vec{E} = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวกเตอร์ที่ได้นี้ก็คือรูปแบบนอร์มัลไลซ์ (Normalized) ของเวกเตอร์เดิมนั่นเองสำหรับเวกเตอร์  $\begin{vmatrix} a \\ b \end{vmatrix}$  ใด ๆ จะเขียนในรูปแบบของนอร์มัลไลซ์ได้ก็ต่อเมื่อ  $|a|^2 + |b|^2 = 1$  หรืออาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งคือนอร์มัลไลซ์เวกเตอร์หรือเวกเตอร์ที่มีขนาดเท่ากับ 1 ในรูปที่ 2.12(ข) นั้น  $E_{0y} = 0$  และ  $E_{0x} = A$  ถ้าให้  $\phi_x = 0$  จะได้โจนส์เวกเตอร์สำหรับแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวนอนเป็น

$$\bar{E} = \begin{vmatrix} A \\ 0 \end{vmatrix} = A \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix} \quad (2.35)$$

สำหรับรูปที่ 2.12(ค) เป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีแนวการสั่นของสนามไฟฟ้าอยู่ในทิศที่ทำมุม  $\alpha$  กับแนวแกนนอน  $x$  ในกรณีสนามไฟฟ้านั้น สนามไฟฟ้าจะมืองค์ประกอบทางแกน  $x$  และ  $y$  อยู่ด้วยกันซึ่งแนวการสั่นของสนามไฟฟ้านี้สามารถเปลี่ยนไปเป็นอยู่ในแนวตั้งหรือแนวนอนซึ่งได้ค่าของ  $\alpha = \pi/2$  หรือ  $0$  ตามลำดับ โดยองค์ประกอบทั้งสองของแสงในกรณีนี้จะต้องมีเฟสที่ตรงกันหรือมีความต่างเฟสเป็น  $\pm \pi$  โดยอาจกำหนดเพื่อความสะดวก ให้  $\phi_x$  และ  $\phi_y$  มีค่าเป็น  $0$  และถ้าให้สนามไฟฟ้ามีแอมพลิจูดเป็น  $A$  จะได้องค์ประกอบในแนวแกน  $x$  และ  $y$  มีค่าดังนี้

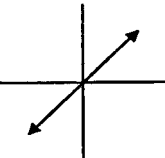
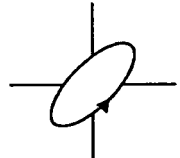
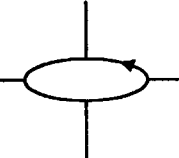
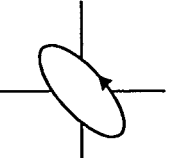
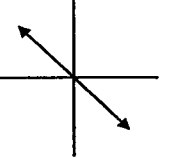
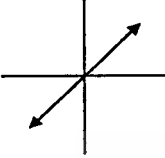
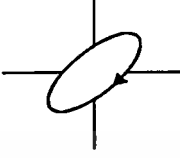
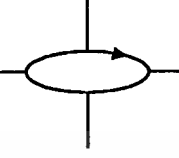
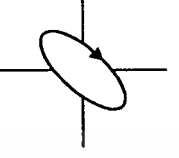
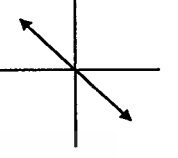
$$E_{0x} = A \cos \alpha \quad \text{และ} \quad E_{0y} = A \sin \alpha \quad (2.36)$$

ดังนั้นโจนส์เวกเตอร์สำหรับแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีสนามไฟฟ้าสั่นในแนวที่ทำมุม  $\alpha$  กับแนวราบคือ

$$\bar{E} = \begin{vmatrix} A \cos \alpha \\ A \sin \alpha \end{vmatrix} = A \begin{vmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{vmatrix} \quad (2.37)$$

สำหรับนอร์มัลไลซ์ของโจนส์เวกเตอร์ในกรณีนี้ค่า  $A = 1$

ในการพิจารณาการสั่นของสนามไฟฟ้าว่าประกอบด้วยการสั่นในแนวแกน  $x$  และ  $y$  ดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ซึ่งมีหลักการเดียวกับการหารูปลิสซาจูส์ (Lissajous Figures) นั่นเอง รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะของรูปลิสซาจูส์ สำหรับในกรณีที่  $E_{0x}$  กับ  $E_{0y}$  ซึ่งมีความต่างเฟส  $\Delta\phi = \phi_y - \phi_x$  ค่าต่าง ๆ กัน และ  $E_{0x}$  ไม่เท่ากับ  $E_{0y}$  ในบางกรณีการกวาดของสนามไฟฟ้าอาจมีลักษณะเหมือนกัน แต่ต่างกันที่ทิศทางการกวาด เช่นกรณีของ  $\Delta\phi$  เป็น  $\pi/2$  กับ  $3\pi/2$  เป็นต้น สำหรับกรณี  $\Delta\phi = \pi/2$  กับ  $3\pi/2$  นั้นถ้า  $E_{0x}$  เท่ากับ  $E_{0y}$  จะได้รูปวงกลมแทนการได้รูปวงรี

				
$\Delta\phi = 0^\circ$	$\Delta\phi = \pi/4$	$\Delta\phi = \pi/2$	$\Delta\phi = 3\pi/4$	$\Delta\phi = \pi$
				
$\Delta\phi = 2\pi$	$\Delta\phi = \begin{cases} -\pi/4 \\ 7\pi/4 \end{cases}$	$\Delta\phi = \begin{cases} -\pi/2 \\ 3\pi/2 \end{cases}$	$\Delta\phi = \begin{cases} -3\pi/4 \\ 5\pi/4 \end{cases}$	$\Delta\phi = \pm\pi$

รูปที่ 2.13 แสดงรูปลิตซาทูส์สำหรับการสั่นในแนวแกน x และ y ที่มีแอมพลิจูดไม่เท่ากันและมี ความต่างเฟส  $\Delta\phi = \phi_y - \phi_x$  ค่าต่าง ๆ

สำหรับการหา Jones vectors ที่แสดงสถานะทางโพลาไรซ์ชนิดวงกลมนั้น สามารถสรุปได้ ว่าในกรณีสนามไฟฟ้าในแนว x และ y มีการสั่นด้วยแอมพลิจูดเท่ากัน  $E_{0x} = E_{0y} = A$  และมีเฟสต่าง กัน  $\pi/2$  โดยสนามไฟฟ้าในแกน x นำสนามไฟฟ้าในแกน y เป็น  $\phi_y - \phi_x = \pi/2$  จะได้สนาม ไฟฟ้ารวมกวาดเป็นแนวของวงกลม การกวาดของสนามไฟฟ้าเช่นนี้จะได้แสงโพลาไรซ์วงกลม แบบตามขวา ซึ่งสามารถนำข้อมูลนี้ไปเขียน Jones vectors ได้เป็น

$$\vec{E} = \begin{bmatrix} E_{0x} e^{i\phi_x} \\ E_{0y} e^{i\phi_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ae^0 \\ Ae^{i\pi/2} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

เนื่องจาก  $1^2 + |i|^2 = 2$  ดังนั้นรูปแบบนอร์มัลไลซ์ของ Jones vectors สำหรับแสงโพลาไรซ์ชนิด วงกลมแบบตามขวา คือ

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

ในทำนองเดียวกันถ้า  $E_y$  นำ  $E_x$  อยู่  $\pi/2$  และ  $E_{0x} = E_{0y}$  เราจะได้สนามไฟฟ้ารวมเป็นวง กลมตามซ้าย และมี Jones vectors ที่หาได้จากสมการ (2.38) โดยแทน  $\pi/2$  ด้วย  $-\pi/2$  ซึ่งได้ผล เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

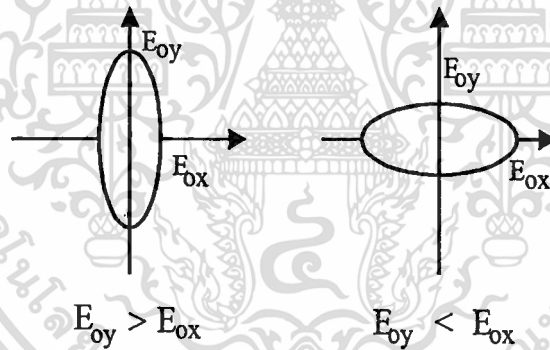
$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 \\ -i \end{vmatrix} \quad (2.40)$$

ถ้าพิจารณากรณีที่สนามไฟฟ้าในแนวแกน x และ y ยังคงมีเฟสต่างกัน  $\pi/2$  เช่นเดิมแต่แอมพลิจูดต่างกันเป็น  $E_{ox} = A$  และ  $E_{oy} = B$  เราจะได้จากสมการ (2.38) ว่า

$$\begin{vmatrix} A \\ +iB \end{vmatrix} \quad \text{แทนการกวาดในแบบตามขวา}$$

$$\begin{vmatrix} A \\ -iB \end{vmatrix} \quad \text{แทนการกวาดในแบบตามซ้าย}$$

การกวาดนี้จะให้ผลเป็นวงรีดังแสดงในรูปที่ 2.13 สำหรับกรณีที่  $\Delta\phi = \pi/2$  หรือ  $3\pi/2$  วงรีที่ได้จะมีแกนหลักอยู่ตามแกน x หรือ y จะขึ้นอยู่กับว่า  $E_{ox}$  มากกว่าหรือน้อยกว่า  $E_{oy}$  ดังรูปที่ 2.14 นอกจากนี้การกวาดจะเป็นแบบตามซ้ายหรือตามขวา ซึ่งจะขึ้นกับ  $E_x$  นำ  $E_y$  กล่าวคือ



รูปที่ 2.14 แสดงโพลาไรซ์ชนิดวงรีในกรณี  $\Delta\phi = \pi/2$

ถ้า  $E_x$  นำ  $E_y$  จะได้การกวาดเป็นแบบตามขวา และ  $E_y$  นำ  $E_x$  จะได้การกวาดเป็นแบบตามซ้าย จากการพิจารณานี้สามารถสรุปได้ว่า Jones vectors ที่มีองค์ประกอบทั้งสองไม่เท่ากัน โดยตัวหนึ่งเป็นเลขจินตภาพนั้นจะแทนแสงโพลาไรซ์ชนิดวงรีและมินอร์แมลไลซ์เป็น

$$\frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}} \begin{vmatrix} A \\ \pm iB \end{vmatrix} \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีแสงโพลาไรซ์ชนิดวงรีที่มีแกนหลักทำมุมกับแนวแกน x หรือ y นั้นจะเกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าในแนวแกน x และ y มีเฟสต่างกันเป็นค่าที่ไม่ใช่  $m\pi$  และ  $(m + 1/2)\pi$  โดยที่ m มีค่า 0, 1, 2,.....เมื่อพิจารณากรณีที่  $E_x$  นำ  $E_y$  ด้วยค่า  $\phi_y - \phi_x = \varepsilon$  โดยกำหนดให้  $\phi_x = 0$   $\phi_y = \varepsilon$  และ  $E_{0x} = A$   $E_{0y} = b$  จะได้ Jones vector เป็น

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_{0x} e^{i\phi_x} \\ E_{0y} e^{i\phi_y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \\ b e^{i\varepsilon} \end{pmatrix} \quad (2.42)$$

เมื่อใช้สูตรของออยเลอร์ (Euler's Formula) จะได้

$$b e^{i\varepsilon} = b(\cos\varepsilon + i\sin\varepsilon) = B + iC \quad (2.43)$$

ดังนั้น

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} A \\ B + iC \end{pmatrix} \quad (2.44)$$

และนอร์มัลไลซ์ของ  $\vec{E}$  จะมีค่าเป็น

$$\frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \begin{pmatrix} A \\ B + iC \end{pmatrix} \quad (2.45)$$

ซึ่งสมการ(2.45)จะใช้ได้กับทุกกรณีข้างต้นทั้งหมด

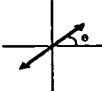
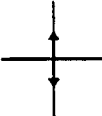





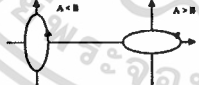
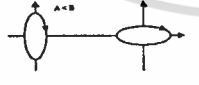
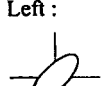
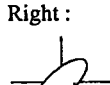
อย่างไรก็ตาม Jones vector จะใช้แทนเฉพาะแสงโพลาไรซ์เท่านั้นเราไม่มี Jones vector แทนแสงที่ไม่เป็นโพลาไรซ์ ประโยชน์ของ Jones vector หนึ่งที่เห็นได้ชัดก็คือใช้แสดงการรวมคลื่นแสงที่มีโพลาไรเซชันชนิดต่าง ๆ เช่น แสดงการรวมแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมแบบตามซ้ายและตามขวาที่มีแอมพลิจูดเท่ากันจะได้

$$\begin{pmatrix} 1 \\ +i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1+i \\ 1-i \end{pmatrix} = 2 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.46)$$

แสดงว่าผลลัพธ์จะเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีสนามไฟฟ้าในแนวราบและมีแอมพลิจูดเป็น 2

ในตารางที่ 2.1 เป็นการแสดง Jones vector ของแสงโพลาไรซ์ชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 2.1 แสดง โจนส์เวกเตอร์แบบต่าง ๆ

<p>Linear Polarization (<math>\Delta\phi = m\pi</math>)</p>	<p>General :</p>  <p>Vertical :</p>  <p>Horizontal :</p>  <p>+ <math>\pi/4</math> :</p>  <p>- <math>\pi/4</math> :</p> 	$\vec{E} = \begin{vmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{vmatrix}$ $\vec{E} = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix}$ $\vec{E} = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix}$ $\vec{E} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \end{vmatrix}$ $\vec{E} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 \\ -1 \end{vmatrix}$
<p>Circular Polarization (<math>\Delta\phi = \frac{\pi}{2}</math>)</p>	<p>Left :</p>  <p>Right :</p> 	$\vec{E} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 \\ -i \end{vmatrix}$ $\vec{E} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 \\ i \end{vmatrix}$
<p>Elliptical Polarization (<math>\Delta\phi = (m + \frac{1}{2})\pi</math>)</p> <p><math>\left( \Delta\phi \neq \begin{cases} m\pi \\ (m + \frac{1}{2})\pi \end{cases} \right)</math></p>	<p>Left :</p>  <p>Right :</p>  <p>Left :</p>  <p>Right :</p> 	$\vec{E} = \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}} \begin{vmatrix} A \\ -iB \end{vmatrix}$ $\vec{E} = \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}} \begin{vmatrix} A \\ iB \end{vmatrix}$ $\vec{E} = \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \begin{vmatrix} A \\ B - iC \end{vmatrix}$ $\vec{E} = \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \begin{vmatrix} A \\ B + iC \end{vmatrix}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 โจนส์เมตริกซ์

เป็นตัวแทนเชิงคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดโพลาไรเซชัน ซึ่งมีอุปกรณ์ทางแสงอยู่หลายชนิดที่ทำให้แสงผ่านไปและเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะทางโพลาไรเซชัน อุปกรณ์ดังกล่าวนี้ประกอบด้วยโพลาไรเซอร์เชิงเส้น และ ตัวหน่วงเฟส (Phase Retardation)

ในที่นี้สามารถแสดงได้ว่าเมตริกซ์ของโพลาไรเซอร์เชิงเส้นที่มีแกนส่งผ่านทำมุม  $\theta$  ใด ๆ กับแกนระนาบอ้างอิงมีค่าเป็น

$$M = \begin{vmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{vmatrix} \quad (2.47)$$

ในกรณีของตัวหน่วงเฟส นั้นต้องการหาเมตริกซ์ที่ทำให้มีการเปลี่ยนสนามไฟฟ้าเดิม  $E_{ox}e^{i\phi_x}$  ให้เป็น  $E_{ox}e^{i(\phi_x+\varepsilon_x)}$  และ  $E_{oy}e^{i\phi_y}$  ให้เป็น  $E_{oy}e^{i(\phi_y+\varepsilon_y)}$  ซึ่งเขียนเป็นเมตริกซ์ได้ว่า

$$\begin{vmatrix} E_0 e^{i(\phi_x+\varepsilon_x)} \\ E_0 e^{i(\phi_y+\varepsilon_y)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} e^{i\varepsilon_x} & 0 \\ 0 & e^{i\varepsilon_y} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} E_0 e^{i\phi_x} \\ E_0 e^{i\phi_y} \end{vmatrix} \quad (2.48)$$

ดังนั้นสามารถใช้เมตริกซ์แทนตัวหน่วงเฟสได้เป็น

$$M = \begin{vmatrix} e^{i\varepsilon_x} & 0 \\ 0 & e^{i\varepsilon_y} \end{vmatrix} \quad (2.49)$$

ในที่นี้  $\varepsilon_x$  และ  $\varepsilon_y$  หมายถึงเฟสของสนามไฟฟ้าในแนว  $x$  และ  $y$  ที่เพิ่มขึ้นเมื่อแสงผ่านตัวหน่วงเฟส  $\varepsilon_x$  และ  $\varepsilon_y$  อาจมีค่าเป็นลบก็ได้ สำหรับกรณีของผลึกหน่วงเฟสชนิดหนึ่งในสี่ช่วงคลื่น (Quarter-Wave Plate : QWP) จะมีการหน่วงเฟสเป็น

$$|\Delta\varepsilon| = |\varepsilon_x - \varepsilon_y| = \frac{\pi}{2} \quad (2.50)$$

ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

$$\varepsilon_y - \varepsilon_x = \frac{\pi}{2} \quad (\text{Fast Axis (FA) อยู่ในแนวตั้ง})$$

$$\text{และ} \quad \varepsilon_x - \varepsilon_y = \frac{\pi}{2} \quad (\text{Fast Axis (FA) อยู่ในแนวราบ})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในลักษณะแรกคือ FA อยู่ในแนวตั้ง ซึ่งอาจให้  $\epsilon_x = -\pi/4$  และ  $\epsilon_y = \pi/4$  หรือค่าอื่น ๆ ได้อีก ดังนั้น Jones เมทริกซ์ก็จะมีค่าไม่ตายตัว อาจมีได้มากมายขึ้นกับการกำหนดค่า  $\epsilon_x$  และ  $\epsilon_y$  อย่างไรก็ตามการกำหนดให้  $\epsilon_x = -\pi/4$  และ  $\epsilon_y = \pi/4$  ทำให้ได้ Jones เมทริกซ์สำหรับตัวหน่วงเฟสที่มีรูปแบบเหมาะสมกับการนำไปใช้งานต่าง ๆ คือ

$$M = \begin{vmatrix} e^{i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/4} \end{vmatrix} = e^{i\pi/4} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{vmatrix} \quad (2.51)$$

ในทำนองเดียวกัน QWP ที่มี  $\epsilon_x > \epsilon_y$  หรือ FA อยู่ในแนวราบ ถ้าให้  $\epsilon_x = \pi/4$  และ  $\epsilon_y = -\pi/4$  จะได้ Jones เมทริกซ์เป็น

$$M = e^{i\pi/4} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{vmatrix} \quad (2.52)$$

สำหรับผลึกหน่วงเฟสชนิดครึ่งคลื่น (Half-wave Plate : HWP) จะมี  $|\Delta\epsilon| = \pi$  จะได้ว่า

$$M = \begin{vmatrix} e^{-i\pi/2} & 0 \\ 0 & e^{i\pi/2} \end{vmatrix} = e^{-i\pi/2} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} \quad (2.53)$$

สำหรับ HWP ที่มี FA อยู่ในแนวตั้ง

$$M = \begin{vmatrix} e^{i\pi/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/2} \end{vmatrix} = e^{i\pi/2} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} \quad (2.54)$$

สำหรับ HWP ที่มี FA อยู่ในแนวราบ

สังเกตได้ว่าองค์ประกอบเมทริกซ์ของ HWP ทั้งสองเหมือนกัน จะต่างกันที่ตัวคูณข้างหน้าเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่  $E_x$  มีเฟสนำ  $E_y$  อยู่  $\pi$  จะเหมือนกับที่  $E_x$  มีเฟสตาม  $E_y$  อยู่  $\pi$  นั่นเอง ดังนั้นตัวคูณข้างหน้าจะบอกให้ทราบถึงผลการเปลี่ยนเฟสทุกองค์ประกอบอย่างเท่า ๆ กัน

Jones เมทริกซ์ที่กล่าวมานี้เป็นประโยชน์มากในการพิจารณาผลของโพลาไรเซอร์ต่อแสง ตลอดจนสามารถใช้ศึกษาการทำให้เกิดแสงโพลาไรซ์ชนิดต่าง ๆ ด้วยอุปกรณ์เหล่านี้ให้ง่ายขึ้น

## ตารางที่ 2.2 สรุปลอนส์เมตริกซ์สำหรับโพลาไรเซอร์ชนิดต่าง ๆ

1.Linear Polarizers	
TA Horizontal	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$
TA Vertical	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
TA at 45° to Horizontal	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$
2. Phase Retarders	
General	$\begin{bmatrix} e^{i\epsilon_x} & 0 \\ 0 & e^{i\epsilon_y} \end{bmatrix}$
QWP : FA Vertical	$e^{-i\pi/4} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}$
QWP : FA Horizontal	$e^{i\pi/4} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}$
HWP : FA Vertical	$e^{-i\pi/2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$
HWP : FA Horizontal	$e^{i\pi/2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$

### 2.5 สต็อกส์เวกเตอร์

จะมีความคล้ายคลึงกับโจนส์เวกเตอร์ในการแทนสถานะโพลาไรซ์และอุปกรณ์ทางแสงด้วยเมตริกซ์ แต่ความแตกต่างระหว่างเวกเตอร์ทั้งสองเห็นได้ชัดเจนจากขนาดของเมตริกซ์ที่ใช้ ในขณะที่โจนส์เวกเตอร์แทนสถานะโพลาไรซ์ของแสงด้วยเมตริกซ์ขนาด 2x1 โดยสมาชิกแต่ละตัวอยู่ในรูปของสนามไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยแอมพลิจูดและเฟสของโจนส์เวกเตอร์โดยในแต่ละแนวแกนหลัก สต็อกส์เวกเตอร์แทนสถานะโพลาไรซ์ของแสงด้วยเมตริกซ์ขนาด 4x1 ซึ่งสมาชิกทั้งสี่ตัวสามารถแทนได้ด้วยสัญลักษณ์  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  และ  $S_3$  โดยอยู่ในรูปของความเข้มแสงทั้งสิ้น เมื่อ  $S_0$  เป็นความเข้มของแสงทั้งหมด (Total Intensity) ในขณะที่  $S_1$ ,  $S_2$  และ  $S_3$  เป็นความเข้มของแสงที่เกี่ยวข้องกับสถานะโพลาไรซ์ของแสงที่กำลังทำการวิเคราะห์ ดังนั้นจะเห็นว่าสต็อกส์พารามิเตอร์นั้นเหมาะสมและสะดวกรวดเร็วในกรณีที่ต้องการทราบลักษณะเอาต์พุตที่ได้จากระบบการมอดูเลตที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังศึกษา เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่นำมาใช้แสดงสถานะโพลาริซของแสง สามารถวัดได้โดยตรง ซึ่งในส่วนของผลการทดลองได้มีการนำมาใช้เสนอผลการศึกษาลักษณะเอตต์พูด โดยใช้สโตกส์พารามิเตอร์ด้วย

โดยทั่วไปสโตกส์พารามิเตอร์สามารถเขียนอยู่ในรูปของเมตริกซ์ในแนวตั้ง [12] ได้ดังนี้

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

โดยที่แต่ละพารามิเตอร์มีนิยามดังนี้

$$S_0 \text{ คือ } I_0 + I_{90}$$

พารามิเตอร์นี้หมายถึงความเข้มรวมของแสงโพลาริซ ที่ทำการวิเคราะห์

$$S_1 \text{ คือ } I_0 - I_{90}$$

พารามิเตอร์นี้บอกถึงผลต่างระหว่างความเข้มของแสงโพลาริซที่ทำการวิเคราะห์เมื่อทำการวัดที่มุม 0 และ 90 องศาเทียบกับแกนอ้างอิง ในกรณีที่ผลต่างมีค่ามากกว่าศูนย์แสดงว่าแสงโพลาริซดังกล่าวมีแนวโน้มเป็นแสงโพลาริซเชิงเส้นที่มีแกนหลักขนานกับแกนอ้างอิง กรณีที่ผลต่างมีค่าน้อยกว่าศูนย์ก็แสดงว่าแสงโพลาริซมีแนวโน้มที่จะเป็นแสงโพลาริซที่มีแกนหลักตั้งฉากกับแกนอ้างอิง

$$S_2 \text{ คือ } I_{45} - I_{-45}$$

พารามิเตอร์นี้บอกถึงผลต่างระหว่างความเข้มของแสงโพลาริซที่ทำการวิเคราะห์เมื่อทำการวัดที่มุม 45 และ -45 องศาเทียบกับแกนอ้างอิง ซึ่งในกรณีที่ผลต่างมีค่ามากกว่าศูนย์แสดงว่าแสงโพลาริซดังกล่าวมีแนวโน้มเป็นแสงโพลาริซเชิงเส้นที่มีแกนหลักทำมุม 45 องศากับแกนอ้างอิง กรณีที่ผลต่างมีค่าน้อยกว่าศูนย์ก็แสดงว่าแสงโพลาริซมีแนวโน้มที่จะเป็นแสงโพลาริซที่มีแกนหลักทำมุม -45 องศากับแกนอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_3 \text{ คือ } I_{RCP} - I_{LCP}$$

พารามิเตอร์นี้บอกถึงผลต่างระหว่างความเข้มของแสงโพลาไรซ์ที่ทำการวิเคราะห์ เมื่อทำการวัดความเข้มของแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามขวา ( $I_{RCP}$ ) และตามซ้าย ( $I_{LCP}$ ) ซึ่งในกรณีที่ผลต่างมีค่ามากกว่าศูนย์แสดงว่าแสงโพลาไรซ์ดังกล่าวมีแนวโน้มเป็นแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามขวา กรณีที่ผลต่างมีค่าน้อยกว่าศูนย์ก็แสดงว่าแสงโพลาไรซ์มีแนวโน้มที่จะเป็นแสงโพลาไรซ์วงกลมตามซ้าย

สโตกส์เวกเตอร์นี้สามารถแทนได้ทั้งแสงที่เป็นแสงโพลาไรซ์และแสงที่ไม่เป็นแสงโพลาไรซ์ หรือโพลาไรซ์บางส่วน เพราะว่าแสงที่ไม่เป็นโพลาไรซ์สามารถแสดงเป็นเวกเตอร์สนามไฟฟ้าได้ตลอดเวลาใด ๆ ดังนั้นคาบเวลาของโพลาไรเซชันทั้งหมดสามารถแสดงเป็นค่าเฉลี่ยออกมาเหมือนกับแสงที่ไม่เป็นแสงโพลาไรซ์ ซึ่งค่าสโตกส์เวกเตอร์จะแสดงเป็นค่าเฉลี่ยของส่วนประกอบในรูปของเวกเตอร์ดังนี้

$$\begin{aligned} S_0 &= \langle I \rangle = \langle E_{ox}^2 + E_{oy}^2 \rangle \\ S_1 &= \langle I_0 - I_{90} \rangle = \langle E_{ox}^2 - E_{oy}^2 \rangle \\ S_2 &= \langle I_{45} - I_{-45} \rangle = \langle 2E_{ox} E_{oy} \cos \Delta \rangle \\ S_3 &= \langle I_{rcp} - I_{lcp} \rangle = \langle 2E_{ox} E_{oy} \sin \Delta \rangle \end{aligned} \quad (2.56)$$

จากในเครื่องหมาย  $\langle \rangle$  จะแสดงเป็นค่าเฉลี่ยในคาบเวลา ของขนาดความเข้มแสงทั้งหมด เมื่อแสงไม่เป็นแสงโพลาไรซ์ในรูปของนอร์มัลไลซ์ เทอมของ  $S_1$ ,  $S_2$  และ  $S_3$  จะหายไปหรือมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อแสงเป็นโพลาไรซ์บางส่วนจะได้  $0 < S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 < 1$  ถ้าเป็นแสงโพลาไรซ์สมบูรณ์นั้นเทอมของ  $S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 = 1$

ในกรณีที่ทำให้สโตกส์เวกเตอร์เป็นนอร์มัลไลซ์นั้นจะหาได้จากการทำให้ความเข้มของแสงรวมทั้งหมดเป็นหนึ่ง ( $S_0 = 1$ ) ซึ่งทำได้โดยการนำความเข้มของแสงรวมทั้งหมดไปหารค่าความเข้มแสงที่  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  และ  $S_3$  ค่าที่ได้ออกมานี้จะเป็นนอร์มัลไลซ์ที่แสดงสถานะของแสงโพลาไรซ์ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ข้อดีของสโตกส์เวกเตอร์คือ สามารถวัดได้ง่ายเนื่องจากใช้ความเข้มของแสง ซึ่งต่างจาก Jones เวกเตอร์ซึ่งแสดงเป็นสนามไฟฟ้าซึ่งยากในการวัดค่า และในงานวิจัยนี้ยังได้ใช้สโตกส์เวกเตอร์มาทำการตรวจสอบและวัดค่าความเป็นโพลาไรซ์ของแสงด้วยดังจะกล่าวถึงต่อไป

ตารางที่ 2.1 แสดงนอร์แมลไลซ์พารามิเตอร์สำหรับแสงโพลาไรซ์หลาย ๆ สถานะ

สถานะของแสงโพลาไรซ์	Normalized Stokes Parameter
Horizontally Linear Polarization	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
Vertically Linear Polarization	$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
45° Linear Polarization	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
135° Linear Polarization	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$
Right Circular Polarization	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
Left Circular Polarization	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$

นอกจากการนำสโตกส์พารามิเตอร์มาเขียนให้อยู่ในลักษณะของเมตริกซ์แนวตั้ง เพื่อที่จะใช้เปรียบเทียบกับนอร์แมลไลซ์ของสโตกส์พารามิเตอร์มาตรฐานและตัดสินใจว่าแสงที่กำลังตรวจสอบเป็นแสงโพลาไรซ์หรือไม่และมีสถานะเป็นเช่นไร ผู้ทำการทดสอบยังสามารถนำสโตกส์พารามิเตอร์ไปคำนวณหาปริมาณที่สามารถใช้บ่งชี้ถึงคุณภาพ และลักษณะของแสงโพลาไรซ์ที่กำลังถูกตรวจสอบโดยปริมาณทั้งสอง [19] (เขียนในเทอมของสโตกส์พารามิเตอร์) ประกอบด้วย

- 1) ค่าความเป็นโพลาไรซ์ของแสง (Degree of Polarization : DOP)

$$DOP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \times 100\% \quad (2.57)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปริมาณนี้จะบอกถึงความเป็นโพลาไรซ์ของแสงกล่าวคือ ในการคำนวณได้ว่า DOP ของแสงที่กำลังตรวจสอบมีค่า 100% แสดงว่าแสงดังกล่าวเป็นแสงโพลาไรซ์อย่างสมบูรณ์ และยังถ้าจำนวนเปอร์เซ็นต์น้อยลงเท่าไรนั้นความเป็นโพลาไรซ์ของแสงก็จะน้อยลงเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ การสร้างแสงโพลาไรซ์ที่มี DOP เท่ากับ 100% เป็นไปได้ยากมาก ทั้งนี้เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของอุปกรณ์ทางแสงที่เกี่ยวข้อง เช่นอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับมุมอุปกรณ์ทางแสงไม่ละเอียดพอเนื่องจากปรับค่าได้เป็นมิลลิเมตรเท่านั้น ดังนั้นค่า DOP ที่คาดหวังจึงเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับ 100% มากที่สุด

2) ค่าเอลลิปติกซิตี (Ellipticity : e)

$$e = \tan \left( \frac{1}{2} \left[ \sin^{-1} \left[ \frac{S_3}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}} \right] \right] \right) \quad (2.58)$$

โดยทั่วไปเอลลิปติกซิตี (e) คือ อัตราส่วนระหว่างผลต่างของแกนสั้น (Minor Axis) แกนยาว (Major Axis) ของรูปวงรี ซึ่งในที่นี้สามารถนำมาใช้เป็นอีกปริมาณหนึ่งเพื่อบ่งบอกลักษณะความเป็นโพลาไรซ์ของแสงให้ชัดเจนยิ่งขึ้น กล่าวคือ โดยทั่วไปสถานะโพลาไรซ์ของแสงสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้น โพลาไรซ์ชนิดวงกลม และโพลาไรซ์ชนิดวงรี ในกรณีที่แสงกำลังถูกตรวจวัดเป็นแสงโพลาไรซ์สถานะใดก็ตามดังที่กล่าวข้างต้น ค่า DOP ที่คำนวณได้ก็จะมีค่าใกล้ 100% ซึ่งสำหรับในงานวิจัยการวัดค่านี้เพียงค่าเดียวยังไม่เพียงพอที่จะตัดสินลักษณะของแสงโพลาไรซ์ทั้งสามชนิดต่างก็มีโอกาสให้ DOP เท่า ๆ กันออกมา ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้เห็นถึงความแตกต่างของสถานะโพลาไรซ์ของแสงที่ได้รับจึงจำเป็นต้องใช้ค่าเอลลิปติกซิตี เนื่องจากแสงโพลาไรซ์แต่ละแบบจะมีค่าเอลลิปติกซิตีที่แตกต่างกัน เช่น แสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นจะมีเอลลิปติกซิตีเป็นศูนย์ ในขณะที่แสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมจะมีเอลลิปติกซิตีเป็นหนึ่ง และแสงโพลาไรซ์ชนิดวงรีจะมีเอลลิปติกซิตีอยู่ระหว่างศูนย์กับหนึ่ง

## 2.6 สรุป

ในบทนี้ที่กล่าวมาจะเป็นเรื่องเกี่ยวกับพื้นฐานทางแสง และโพลาไรเซชันชนิดต่าง ๆ คือเชิงเส้น วงกลม และวงรี รวมถึงคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ โจนส์เวกเตอร์ ซึ่งใช้บรรยายชนิดของแสงโพลาไรซ์ต่าง ๆ และ โจนส์เมตริกซ์ซึ่งใช้เป็นตัวแทนเชิงคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ทางแสง ส่วน สโตกส์เวกเตอร์ใช้แทนสถานะโพลาไรซ์และอุปกรณ์ทางแสง โดยอยู่ในรูปของความเข้มเข้มแสงที่วัดได้โดยตรง ซึ่งสโตกส์เวกเตอร์สามารถใช้บ่งชี้ถึงคุณภาพและลักษณะของแสงโพลาไรซ์ที่กำลังถูกตรวจสอบโดยเขียนในเทอมของ DOP และเอลลิปติกซิตี (e) ส่วนในบทต่อไปจะกล่าวถึงเรื่องเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# อุปกรณ์การวิจัย

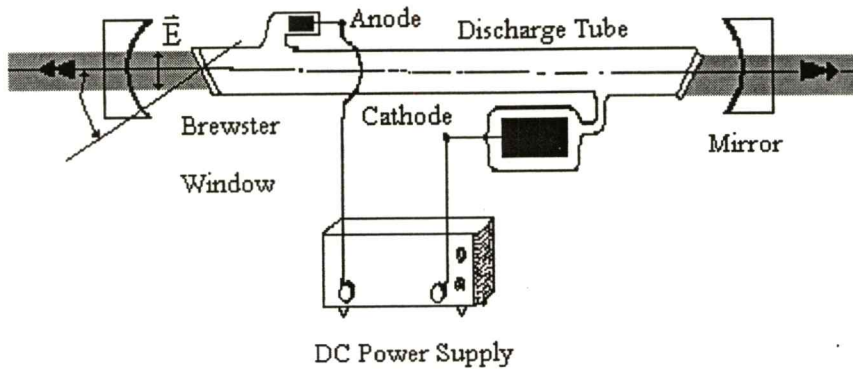
ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ซึ่งประกอบไปด้วย อุปกรณ์ทางแสง และ อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดของอุปกรณ์ตามลำดับดังนี้

### 3.1 อุปกรณ์ทางแสง

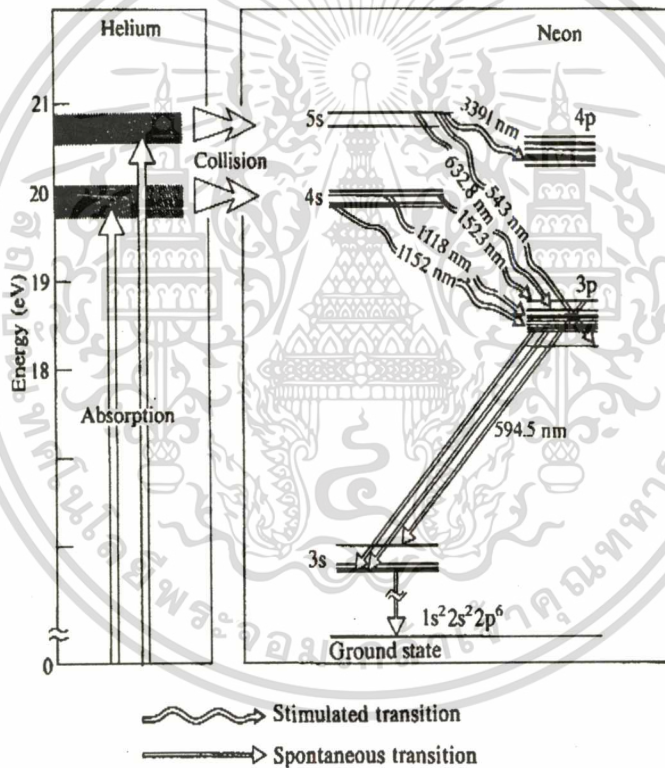
ในส่วนของอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ที่สำคัญได้แก่ เลเซอร์ฮีเลียมนีออน (HeNe Laser) โพลารไรเซอร์ (Polarizer) แผ่นผลึกหน่วงเฟสชนิดครึ่งคลื่น แผ่นผลึกหน่วงเฟสชนิดหนึ่งในสี่ช่วงคลื่น เส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะ โพลารไรเซอร์ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1.1 เลเซอร์ฮีเลียมนีออน

หลังจากที่ไมแมน (Maiman) ได้ประสบความสำเร็จในการสร้างแสงเลเซอร์โดยใช้ผลึกทับทิมในปี ค.ศ. 1960 ในปีต่อมาผู้ใช้หลอดแก้วบรรจุก๊าซผสมฮีเลียมและนีออนที่ให้แสงขนาดความยาวคลื่น 1152 อังสตรอม โดยการกระตุ้นเป็นผลสำเร็จ ซึ่งนับว่าเป็นเครื่องเลเซอร์เครื่องที่สองของโลก และเครื่องเลเซอร์ชนิดนี้ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางมาจนกระทั่งปัจจุบัน ซึ่งส่วนมากจะใช้แสงที่มีกำลังขนาดมิลลิวัตต์ในช่วงความยาวคลื่น 6328 อังสตรอม โดยเครื่องชนิดนี้มีราคาไม่แพงมากนักเพราะประกอบได้ง่าย ไม่ยุ่งยากกับการนำมาใช้ทั้งยังไม่ชำรุดเสียหายง่าย การใช้งานทำได้โดยการป้อนพลังงานจากภายนอกโดยใช้สนามไฟฟ้าแรงสูงผ่านอิเล็กโทรดทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและไอออนเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร่งชนกันไปมาเพิ่มขึ้นตลอดเวลา โดยอะตอมของฮีเลียมจะไม่อยู่ในสภาวะปกติเมื่อชนกับอะตอมของนีออน และจะทำให้อะตอมของนีออนอยู่ในสภาวะไม่ปกติด้วย ทั้งนี้เนื่องจากอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ด้วยความเร่งภายใต้แรงสนามไฟฟ้าจากภายนอกกระหว่างอิเล็กโทรดไปชนอะตอมของฮีเลียมทำให้ยกระดับสภาวะพลังงานของอะตอมให้สูงกว่าปกติ ซึ่งบางตัวอาจขึ้นไปอยู่ในสภาวะพลังงานระดับ  $2S_1$  ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งแสดงระดับพลังงานของฮีเลียมไว้เพียง 3 ระดับ คือ ระดับสภาวะพลังงานต่ำสุดปกติ ระดับกิ่งสมดุทธวาร  $2^1S$  และระดับกิ่งสมดุทธวาร  $2^3S$  ซึ่งถ้าอยู่ในระดับไม่ปกติเหล่านี้แล้วเมื่อกลับสู่สภาวะปกติต่ำสุดจะไม่คายพลังงานออกมาในรูปของแสงแต่จะเป็นพลังงานของการยืดหยุ่นในรูปของโฟนอน หรือมีฉะนั้นอาจชนกับอะตอมของนีออนที่อยู่ในสภาวะต่ำสุดปกติจะคายพลังงานเกือบหมด จึงทำให้อะตอมนีออนมีระดับพลังงานสูงขึ้นไปสู่ระดับ  $5S$  ส่วนนีออนกลับปรากฏว่าเมื่อกลับสู่สภาวะต่ำสุดปกติตามเดิมจะคายพลังงานออกมาในรูปของแสงได้หลายความยาวช่วงคลื่น แต่ที่สำคัญคือ 6328 อังสตรอม



รูปที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของเลเซอร์ชนิดฮีเลียมนีออน ที่ประกอบด้วยแผ่นสะท้อนแสงแบบโค้งทางด้านปลายทั้งสองข้าง (ความโค้งที่แสดงไว้ในรูปนี้วาดให้โค้งมากกว่าที่เป็นจริง)



รูปที่ 3.2 แสดงระดับพลังงานของสารตัวกลางภายในเครื่องฉายแสงเลเซอร์ชนิดฮีเลียมนีออน แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงระดับสถานะพลังงานต่าง ๆ

สำหรับการสร้างส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องให้ได้แสงเลเซอร์สีแดงนี้จะต้องกำหนดส่วนต่าง ๆ ให้สอดคล้องกัน [9] ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ก. อัตราส่วนผสมระหว่างอีเลียม-น็อน
- ข. เส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดแก้วที่บรรจุก๊าซผสมอีเลียม-น็อน
- ค. ศักดาไฟฟ้า
- ง. ระยะห่างระหว่างกระจกทางปลายทั้งสองข้างของเครื่องฉาย
- จ. กำลังของแสงเลเซอร์

โดยทั่วไปกระจกที่ใช้ในกรณีนี้จะเคลือบด้วยสารไดอิเล็กทริกบาง ๆ จำนวนหลายชั้นทำให้การสะท้อนมีค่าสูงกว่าร้อยละ 99 ของแสงที่ตกกระทบ และตรงปลายของหลอดแก้วจะตัดให้ทำมุมโพลาริซซ์ตามหลักของบรูว์สเตอร์ (Brewster) นั่นคือมุมตกกระทบ (i) เท่ากับมุมหักเห (r)

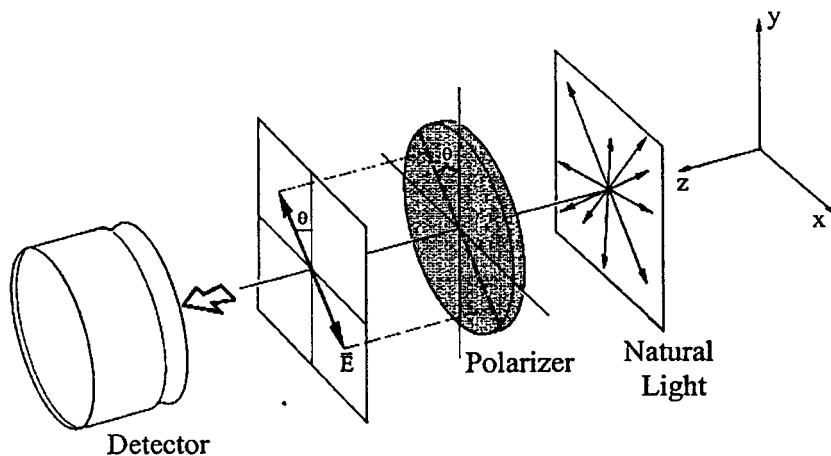
$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_{21} \quad \text{หรือจะได้ว่า} \quad \tan i = n_{21} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $n_{21}$  เป็นค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง และแสงสะท้อนตามหลักการข้างต้นนี้จะมีแนวการสั่นของสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับระนาบของคลื่นตกกระทบซึ่งประกอบด้วยลำแสงตกกระทบกับเส้นปกติ ซึ่งจะทำให้แสงที่ผ่านออกมาเป็นแสงโพลาริซซ์ชนิดเชิงเส้น และยังช่วยให้แสงผ่านออกมาได้เกือบทั้งหมดสำหรับแสงที่มีสนามไฟฟ้าขนานกับระนาบของแสงตกกระทบ โดยที่ถ้าหากตัดปลายของหลอดนั้นเป็นระนาบตั้งฉากกับแกนของหลอดจะทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ถึงร้อยละ 4 สำหรับการสะท้อนที่ผิวหน้าครั้งหนึ่ง ๆ ถ้าแสงเลเซอร์ที่ผ่านออกมาจากเลเซอร์อีเลียม-น็อนนี้จะเป็นแสงโพลาริซซ์ชนิดเชิงเส้นเป็นส่วนใหญ่

### 3.1.2 โพลาริเซอร์

เครื่องมือในทางทัศนศาสตร์ (Optic) ที่สามารถเปลี่ยนแสงธรรมชาติให้กลายเป็นแสงโพลาริซซ์เรียกว่า โพลาริเซอร์ ตัวอย่างเช่นเครื่องมือที่ใช้แยกแสงที่ไม่ใช่แสงโพลาริซซ์ซึ่งเกิดจากการรวมกันของคลื่น 2 ขบวน ที่อยู่ในทิศทางตั้งฉากกันและมีแอมพลิจูดเท่ากัน แต่ไม่มีความสัมพันธ์เชิงเฟสและความถี่ให้ขบวนใดขบวนหนึ่งของแสงนี้แยกออกไป และให้อีกขบวนหนึ่งผ่านไปเท่านั้นดังแสงไว้ในรูปที่ 3.3 เครื่องมือชนิดนี้มีชื่อเรียกเฉพาะว่า “โพลาริเซอร์ชนิดเชิงเส้น” ดังนั้นสำหรับเครื่องมือที่สามารถให้แสงโพลาริซซ์ชนิดวงกลมและวงรีออกมาเรียกว่าเป็นโพลาริเซอร์ชนิดวงกลมและวงรีตามลำดับ

โพลาริเซอร์ดังกล่าวข้างต้นนี้อาจสร้างขึ้นโดยหลักการต่าง ๆ กันแต่โดยทั่วไปจะต้องเป็นไปตามกลไกทางกายภาพเบื้องต้น 4 ประการ ได้แก่ ไดโครอิซึม (Dichroism) หรือการเลือกหักเหกันแสงเฉพาะส่วนใดส่วนหนึ่งแต่ให้อีกส่วนหนึ่งผ่านไป การสะท้อน การกระจัดกระจาย และไบร์ฟรินเจนซ์หรือการหักเหเป็นสองแนว



รูปที่ 3.3 แสดงโพลาไรเซอร์ชนิดเชิงเส้น

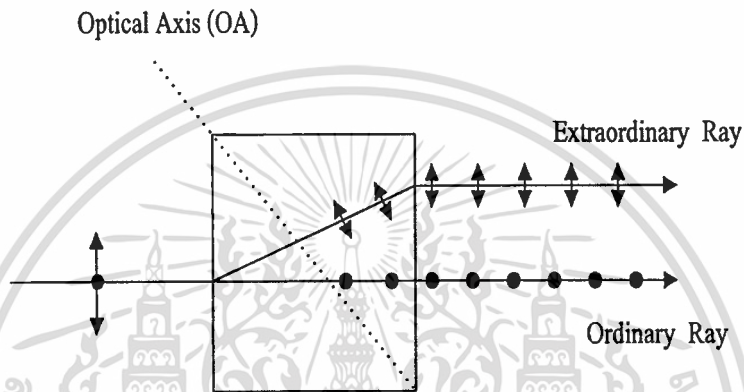
ในที่นี้จะกล่าวถึงกรณีโคโรอิซึมหรือการเลือกหักเห เมื่อแสงผ่านตัวกลางบางชนิดที่มีคุณสมบัติขึ้นอยู่กับทิศทาง จะทำให้แสงที่แตกออกเป็นสองส่วนตั้งฉากซึ่งกันและกันในลำแสงที่ตกกระทบผ่านตัวกลางนั้น ไปถูกหักเหเฉพาะส่วนใดส่วนหนึ่งแต่ให้อีกส่วนหนึ่งผ่านไปได้ ซึ่งเรียกคุณสมบัตินี้ของสารตัวกลางเหล่านี้ว่า “โคโรอิซึม” สำหรับตัวกลางที่มีคุณสมบัติเช่นนี้และเป็นที่ทราบกันดีก็คือแร่ธรรมชาติที่มีสีสรรต่าง ๆ สามารถนำมาทำเป็นเครื่องประดับพลอยที่มีสีสรรต่าง ๆ กันซึ่งมีอยู่หลายชนิดที่เป็นส่วนประกอบของ โบรอนซิลิเกตโดยผลึกเหล่านี้จะมีทิศทางภายในบางทิศเรียกชื่อโดยเฉพาะว่า แกนทัศนศาสตร์ (Optical Axis) ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของผลึก ในกรณีที่ส่วนหนึ่งส่วนใดของสนามไฟฟ้าที่แตกออกไปแล้วตั้งฉากกับแนวดังกล่าวของสารตัวกลางจะถูกหักเหหรือดุดกคืนอยู่ภายในผลึกนั้นทั้งหมด หากผลึกของสารนั้นหนามากเท่าใดก็สามารถที่จะได้ดุดกคืนได้ดียิ่งขึ้นเท่านั้น

ผลึกโคโรอิซึมเป็นผลึกที่มีคุณสมบัติในการดุดกคืนแสงที่มีเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าด้านหนึ่งมากกว่าอีกด้านหนึ่งซึ่งตั้งฉากกัน ผลึกโคโรอิซึมที่เป็นแร่ได้แก่ ทัวมาลีน แสงที่ผ่านแร่นี้จะทำให้มีเวกเตอร์อยู่ในแนวทวนเดียว หรือเป็นแสงโพลาไรซ์ เนื่องจากผลึกทัวมาลีนมีสีจึงไม่ค่อยนิยมนำมาใช้งาน จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1852 ได้มีผู้ค้นคว้าและประดิษฐ์ผลึกของสารประกอบอินทรีย์ไอโอโดซัลเฟต ซึ่งปัจจุบันเรียกว่าเฮอร์ราพาไรต์ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนทัวมาลีนทุกประการแต่ใสและมีขนาดเล็กกว่า แผ่นโพลาไรซ์ในปัจจุบันทำจากผลึกชนิดนี้ ในปี ค.ศ. 1932 ก็ได้มีการผลิตแผ่นโพลาไรซ์โดยการจัดให้ผลึกเฮอร์ราพาไรต์ หรือผลึกโคโรอิซึม เรียงกันอยู่ในแนวเดียวกัน และหล่อไว้ด้วยพลาสติกใสทำเป็นแผ่นเพื่อป้องกันการขีดข่วน จากวิธีการนี้ทำให้สามารถที่จะสร้างแผ่นโพลาไรซ์ที่มีขนาดใหญ่ได้ จึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

โพลาไรเซอร์จะใช้แตกต่างกันสองทางกล่าวคือ ถ้าใช้ในการทำแสงที่ไม่โพลาไรซ์ให้เป็นแสงโพลาไรซ์ จะเรียกว่า โพลาไรเซอร์ และถ้าใช้ในการกำหนดหรือตรวจสอบสถานะของแสงโพลาไรซ์ จะเรียกว่า แอแนไลเซอร์ (Analyzer)

### 3.1.3 แผ่นผลึกหน่วงเฟสชนิดครึ่งคลื่น

ก่อนที่จะกล่าวถึงแผ่นผลึกหน่วงเฟสชนิดครึ่งคลื่นนั้น จะขอกล่าวถึงการหักเหของแสงเมื่อแสงตกกระทบไปยังผลึกแล้วมีลำแสงหักเหเพิ่มขึ้นเป็นสองลำนอกเหนือไปจากการหักเหของแสงเพียงลำเดียวที่เกิดขึ้นกับตัวกลาง ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงการหักเหของแสงสองแนว

ซึ่งปรากฏว่ามุมหักเห  $r$  สำหรับมุมตกกระทบ  $i$  ตามกฎของสเนลล์

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_{12} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $n_{12}$  คือดัชนีหักเหของตัวกลางจะใช้ได้ถูกต้องกับลำแสงหักเหสองลำข้างต้นนั้นเพียงลำเดียว ส่วนอีกลำหนึ่งจะไม่เป็นไปตามกฎการหักเหของสเนลล์ ซึ่งเรียกลำแสงที่เป็นไปตามกฎว่าแสงปกติ (Ordinary หรือ o-ray) ซึ่งจะมีสนามไฟฟ้าในทิศตั้งฉากกับแกนทัศนศาสตร์ และเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v_{\perp}$  จึงทำให้มีค่าดัชนีหักเหเป็น  $n_o = c/v_{\perp}$  ส่วนอีกลำหนึ่งซึ่งไม่เป็นไปตามกฎเรียกว่าแสงพิเศษ (Extraordinary หรือ e-ray) จะมีสนามไฟฟ้าในทิศทางขนานกับแกนทัศนศาสตร์และเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v_{\parallel}$  และมีค่าดัชนีหักเหเป็น  $n_e = c/v_{\parallel}$

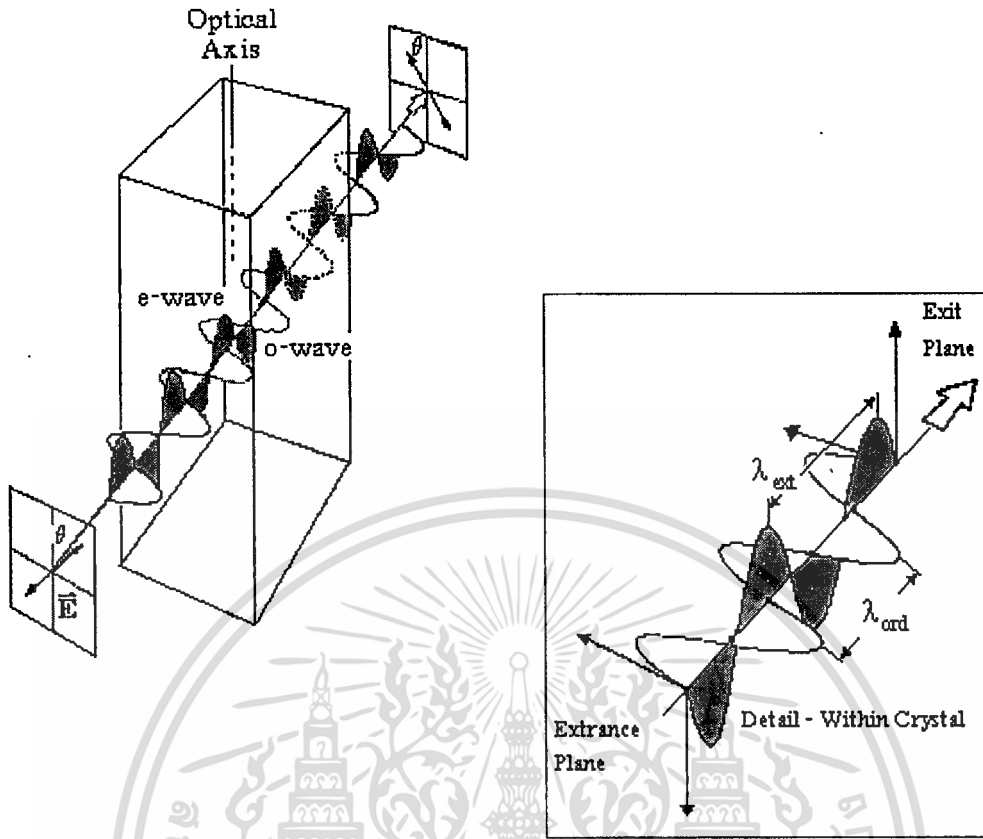
ผลึกใดที่มีค่า  $n_e$  มากกว่า  $n_o$  เรียกว่าผลึกบวก (Positive Crystal) ตัวอย่างเช่น ควอตซ์ ส่วนผลึกที่มีค่า  $n_e$  น้อยกว่า  $n_o$  เรียกว่าผลึกลบ (Negative Crystal) ตัวอย่างเช่น แคลไซต์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าดัชนีหักเหของผลึกที่มีแกนทัศนศาสตร์เพียงแกนเดียวต่าง ๆ ซึ่งวัดที่ความยาวคลื่น 589.3 นาโนเมตร

ชนิดของผลึก	$n_e$	$n_o$
<b>Positive</b>		
- Ice	1.3130	1.3090
- Quartz	1.5534	1.5443
- Zircon	1.9860	1.9230
- Rutite	2.9030	2.6160
<b>Negative</b>		
- Calcite	1.4864	1.6584
- Tourmaline	1.6380	1.6690
- Sodium Nitrite	1.3369	1.5854
- Beryl	1.5900	1.5980

สำหรับแผ่นที่ทำให้เฟสสัมพัทธ์ระหว่างแสงปกติและแสงพิเศษเปลี่ยนไป  $\pi$  หรือ 180 องศาเรียกว่าแผ่นครึ่งช่วงคลื่น เมื่ออยู่ในผลึกลบคลื่นพิเศษจะมีความเร็วสูงกว่าและมีความยาวช่วงคลื่นมากกว่าคลื่นปกติ ดังนั้น หลังจากผ่านแผ่นผลึกนี้ออกมาแล้วมีเฟสสัมพัทธ์เปลี่ยนไป  $\pi$  หรือเท่ากับครึ่งช่วงคลื่น จะทำให้การสั่นของสนาม  $E$  ซึ่งเดิมทำมุม  $\theta$  กับแกนอ้างอิงหมุนไป  $2\theta$  ดังแสดงในรูปที่ 3.5 นั่นคือ แผ่นครึ่งช่วงคลื่นสามารถเปลี่ยนแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมหรือวงรีตามขวาหรือซ้ายให้กลับเป็นซ้ายหรือขวาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงแผ่นผลึกหน่วงเฟสชนิดครึ่งคลื่น

### 3.1.4 แผ่นผลึกหน่วงเฟสชนิดหนึ่งในสี่ช่วงคลื่น

ส่วนแผ่นที่ทำให้เฟสสัมพัทธ์เปลี่ยนไปเท่ากับ  $\pi/2$  หรือ  $90$  องศาเขียนได้ว่า

$$|\Delta\phi| = \frac{\pi}{2}$$

นั่นคือ เมื่อ

$$|n_e - n_o|d = \frac{\lambda}{4} \quad (3.3)$$

จะได้ว่า แสงพิเศษเคลื่อนที่ช้าไปหรือเร็วไป  $1$  ใน  $4$  ของรอบเมื่อเทียบกับแสงปกติ ซึ่งจะช้าลงเมื่อ  $n_e > n_o$  ในกรณีที่แผ่นสารเป็นผลึกบวก เช่น ควอตซ์ ซึ่งมีแกนทัศนศาสตร์อยู่เพียงแกนเดียว ทิศทางของแสงโพลาไรซ์ที่ถูกหน่วงเรียกว่าแกนช้า (Slow Axis) และทิศทางที่ไปได้เร็วกว่าเรียกว่า (Fast Axis) ทั้งนี้ในผลึกบวกแกนช้าจะอยู่ในทิศทางเดียวกันกับแกนทัศนศาสตร์นั่นเอง และแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เร็วจะตั้งฉากกับแกนทัศนศาสตร์ แต่ในทางตรงกันข้ามกับในกรณีของผลึกเลน เช่น แคลไซต์ ซึ่งสนาม  $\vec{E}$  ในแนวขนานกับแกนทัศนศาสตร์จะมีความเร็วมากกว่าสนามในแนวตั้งฉาก จึงมีแกนเร็วอยู่ในแนวเดียวกันกับแกนทัศนศาสตร์ และแกนช้าจะตั้งฉากกับแกนทัศนศาสตร์

การที่เฟสเปลี่ยนไป  $\pi/2$  จะสามารถทำให้แสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นกลายเป็นแสงโพลาไรซ์ชนิดวงรีหรือในทางกลับกันได้ ดังนั้นเมื่อให้แสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นทำมุม 45 องศา กับแกนเร็วหรือแกนช้าก็ตามของแผ่นหนึ่งในสี่ช่วงคลื่นนี้ ปรากฏว่าทั้งคลื่นปกติและคลื่นพิเศษจะมีแอมพลิจูดเท่ากัน จึงทำให้แสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นกลายเป็นแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.6 และในทางกลับกัน ถ้าแสงเป็นชนิดวงกลมเมื่อผ่านแผ่นหนึ่งในสี่ช่วงคลื่นนี้ออกมาจะกลายเป็นแสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้น



รูปที่ 3.6 แสดงแสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นเมื่อตกกระทบผ่านแผ่นผลึกหน่วงเฟสชนิดหนึ่งในสี่ช่วงคลื่นโดยสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  ทำมุม 45 องศา กับแกนเร็วหรือแกนช้าก็ตาม จะกลายเป็นแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมได้

ในกรณีทั่ว ๆ ไป สนาม  $\vec{E}$  ทำมุมต่างไปจาก 45 องศา กับแกนเร็วหรือแกนช้า นั่นคือ ถ้ามุมของ  $\theta$  ไม่เท่ากับ 45 องศาจะได้ว่า

$$E_x = A \cos \theta \cos \omega t \quad (3.4)$$

และ

$$E_y = A \sin \theta \cos \omega t \quad (3.5)$$

ภายหลังที่แสงผ่านแผ่นหนึ่งในสี่ช่วงคลื่นไป นอกจากจะมีค่าเฟสสัมพัทธ์เปลี่ยนไป  $-\pi/2$  แล้วยังมีค่าของเฟสที่เปลี่ยนไปรวมกันอีก  $\phi$  ดังนั้น จะได้ว่า

$$E_x = A \cos \theta \cos(\omega t - \phi) \quad (3.6)$$

และ

$$E_y = A \sin \theta \cos(\omega t - \phi - \frac{\pi}{2}) = A \sin \theta \sin(\omega t - \phi) \quad (3.7)$$

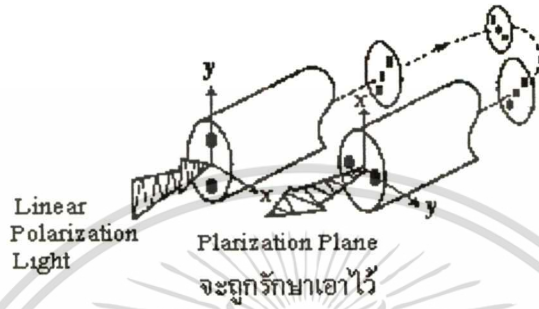
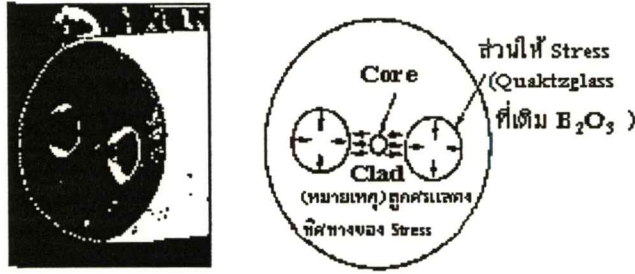
นั่นคือแสงที่ผ่านแผ่นนี้ออกมาจะกลายเป็นแสงโพลาไรซ์ชนิดวงรีตามซ้าย โดยที่แกนของวงทั้งสองแกนซ้อนทับกับแกน  $x$  และแกน  $y$  พอดี และมีอัตราส่วนระหว่างขนาดของทั้งสองแกนเท่ากับ  $\tan \theta$

ในทางตรงกันข้าม แสงโพลาไรซ์ชนิดวงรีอาจเปลี่ยนให้เป็นชนิดระนาบได้โดยให้ผ่านแผ่นข้างต้นนี้ไป และถ้าให้แกนของแผ่นกับแกนของวงรีซ้อนกันพอดีจะได้ว่าสมการของแสงตกกระทบกับสมการของแสงหักเหข้างต้นนี้ก็กลับกัน

### 3.1.5 เส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาไรเซชัน

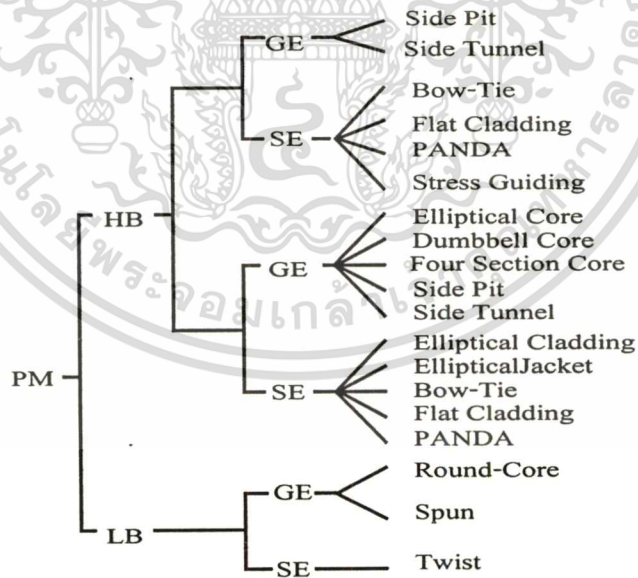
การรักษาสถานะของโพลาไรเซชัน โดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดี่ยว (Single Mode) ไม่สามารถทำได้ เนื่องจากมีการรบกวนจากภายนอก เช่น การงอโค้งของเส้นใยแก้วนำแสง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ การสั่นสะเทือนและอื่น ๆ มีผลต่อสถานะโพลาไรซ์ของแสงภายในเส้นใยแก้วนำแสง ดังนั้นในงานที่ต้องอาศัยแสงโพลาไรซ์ที่ระยะทางไกล จึงจำเป็นต้องใช้เส้นใยแก้วนำแสงที่จัดเตรียมเป็นพิเศษให้สามารถรักษาสถานะโพลาไรเซชันของแสงที่ป้อนเข้าไปได้ เส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้เรียกว่า เส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาไรเซชัน วิธีการทำให้ได้เส้นใยแก้วนำแสงที่รักษาสถานะของโพลาไรเซชันได้คือ การทำให้เส้นใยแก้วนำแสงมีแรงเค้น (Stress) ภายในมากกว่าแรงภายนอกที่เกิดจากการรบกวนกล่าวคือ ทำให้คอร์ (Core) ของเส้นใยแก้วนำแสงเป็นรูปวงรี หรือทำให้มีโครงสร้างที่เกิดแรงเค้นแก่คอร์ขึ้น ในรูปที่ 3.7 เป็นรูปหน้าตัดของเส้นใยแก้วนำแสงที่สามารถรักษาสถานะของโพลาไรเซชันได้ ซึ่งมีโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยแก้วที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่แตกต่างจากแคลดดิ้ง (Cladding) เมื่อได้รับความร้อน อยู่ที่ด้านทั้งสองของคอร์

นอกเหนือจากการใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้ในงานทางการสื่อสารแล้ว เส้นใยแก้วนำแสงที่สามารถรักษาสถานะโพลาไรเซชัน ยังสามารถนำไปใช้งานทางการตรวจวัด เช่น การตรวจหาเสียง แม่เหล็ก การหมุน และแรงดัน เป็นต้น



รูปที่ 3.7 แสดงเส้นใยแก้วนำแสงที่สามารถรักษาสถานะโพลาไรเซชันได้ (แบบให้แรงเค้น)

### 3.1.5.1 ชนิดของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาไรซ์



รูปที่ 3.8 แสดงชนิดของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาไรเซชันจากการรักษาสถานะโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น โดยที่ PM: Polarization Maintaining, HB: High-Birefringent, LB: Low- Birefringent, SP: Single-Polarization, TP: Two-Polarization Modes, GE: Geometrical Effect, SE: Stress Effect.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 3.8 แสดงชนิดของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาไรซ์ โดยจำแนกจากรูปแบบของการทำให้ได้เส้นใยแก้วนำแสงและแนวคิดของการรักษาสถานะโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น โดยค่าต่าง ๆ ของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด PM ดังแสดงในตารางที่ 3.2 [17] สำหรับตัวแปรต่าง ๆ ที่สำคัญของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาไรซ์ประกอบด้วย 1) ไบรฟ์รินเจนซ์ B หรือความยาวบิต (Beat Length :  $L_p$ ) 2) พารามิเตอร์ของการเชื่อมต่อ (Coupling Parameter : h) หรือสัญญาณไขว้แทรก (Crosstalk : CT) และ 3) การสูญเสียจากการส่งผ่าน (Transmission Loss)

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าต่าง ๆ ของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาไรซ์

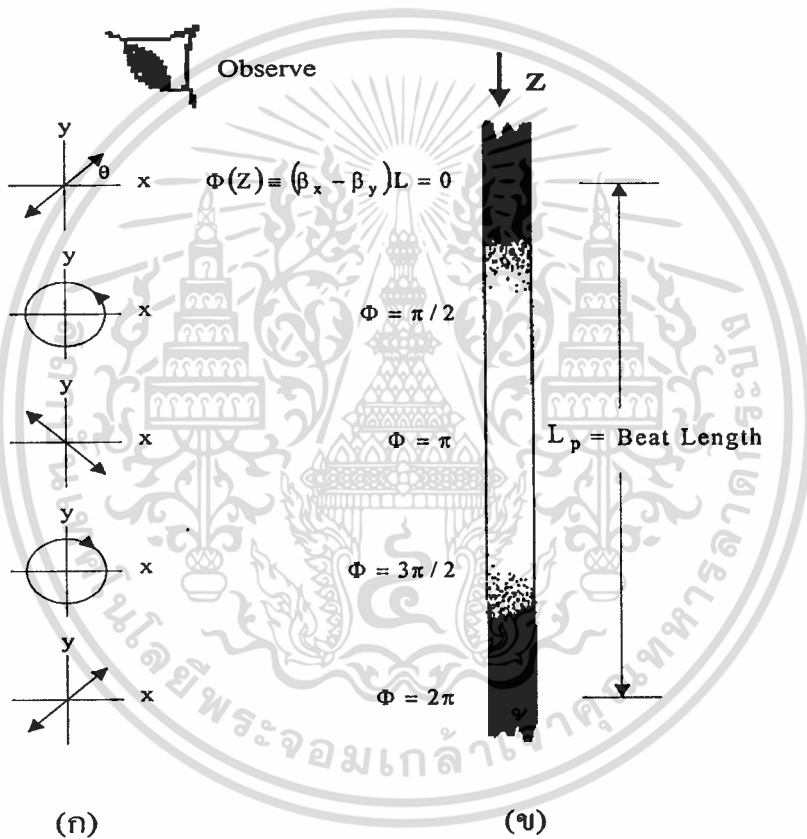
Types	Name of PM Fiber	B $\times 10^{-4}$	H $\times 10^{-6}$ /m	Loss (dB/km)	Wavelength ( $\mu$ m)	Fabrication Method
HB-Fibers With GE	E.Core	4.2	30	85	0.85	MCVD
	Side Pit	0.5	1	5	1.15	MVCD
	Side Tunnel	0.7			1.06	Holed Preform
HB-Fibers With SE	E.Cladding	7.2	1.2	5	0.63	MVCD
	E.Jacket	3.0	1	0.8	1.55	MVCD
	PANDA	3.0	0.5	0.25	1.55	Holed Preform
	“ (SP)	5.9	(44dB)	0.3	1.3	Holed Preform
	Bow-Tie	4.8		3.6	0.85	Gas Etching
	“ (SP)	6.7	(42dB)	1	0.82	Gas Etching
	Flat-Cladd	2.5	5.9	2.6	0.85	Pressed Preform
“ (SP)	4.7	(34dB)	1	0.63	Pressed Preform	
LB-Fibers With GE	Round Core	$4.5 \times 10^{-9}$			0.63	MVCD
	Spun	$4.3 \times 10^{-9}$			1.3	Spin-Drawing
LB-Fiber With SE	Twist	$1.2 \times 10^{-7}$			1.15	Fiber-Twisting

1) ไบรฟ์รินเจนซ์ B ตัวแปรนี้จะเป็ผลต่างของค่าดรรชนีหักเหระหว่างโพลาไรซ์เชิงเส้นที่ต้งมากที่สุดซึ่งเกี่ยวข้องกับความยาวบิต ( $L_p$ ) ตามสมการ

$$L_p = \lambda / B = 2\pi / \Delta\beta \quad (3.8)$$

เมื่อ  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่น และ  $\Delta\beta$  เป็นผลต่างของสัมประสิทธิ์ในการเคลื่อนที่ในแกนโพลาริซ ทั้งสองที่ต่างกัน ซึ่งรูปแบบของไบร์ฟรินเจนซ์นี้จะเหมาะสำหรับการเปรียบเทียบของเส้นใย แก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาริซ

ความยาวบิต ( $L_p$ ) เป็นระยะทางที่แสงเคลื่อนที่ในเส้นใยแก้วนำแสงแล้วทำให้เกิดความต่าง เฟสครบหนึ่งรอบหรือ  $2\pi$  ซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร ซึ่งสามารถกำหนดได้โดยการวัดระยะระหว่าง แถบมืด (Dark) กับแถบสว่าง (Bright) ดังที่แสดงในรูป 3.12 [10] ในกรณีที่ค่าความยาวบิตสั้นจะทำให้มีการรักษาสถานะโพลาริซได้ดี



รูปที่ 3.9 แสดงความยาวบิตในเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว (ก) สถานะของโพลาริเซชัน เทียบกับ  $\Phi(Z)$  (ข) แสดงความเข้มของแสงที่ปรากฏภายในเส้นใยแก้วนำแสง โดยความ เข้มนี้มีการเปลี่ยนแปลงครบรอบในหนึ่งความยาวบิต

2) พารามิเตอร์ของการเชื่อมต่อ (h) จะแสดงลักษณะความสามารถในการรักษาสถานะโพลาริเซชันของเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งเป็นประโยชน์ในการเปรียบเทียบเส้นใยแก้วนำแสงชนิด PM เมื่อมีความยาวที่แตกต่างกัน ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับสัญญาณไขว้แทรก (CT) ซึ่งเป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนทั้งหมดที่เอาต์พุตของเส้นใยแก้วนำแสงระหว่างโหมดที่ไม่ต้องการ (Unwanted Mode) และ โหมดที่ใช้ส่งแสง (Launch Mode) ซึ่งเขียนสมการของ CT ได้คือ

$$CT = 10 \log \frac{P_y}{P_x} = 10 \log \{ \tanh(hL) \} \quad (3.9)$$

เมื่อ  $P_x$  และ  $P_y$  เป็นกำลังของแสงในรูปโหมดที่ถูกกระตุ้น (Excited Mode) และโหมดเชื่อมต่อกัน (Coupled Mode) โดยที่  $L$  เป็นความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง

3) การสูญเสียจากการส่งผ่าน ตัวแปรนี้จะมีความหมายน้อยถ้าเส้นใยแก้วนำแสงที่นำมาใช้เป็นเพียงระยะสั้น ๆ สิ่งที่เป็นอันหนึ่งคือในการกำหนดความยาวคลื่นคัทออฟหรือ การวัดค่าการสูญเสียทางแสง ที่ความยาวคลื่นสูงกว่าความยาวคลื่นคัทออฟ เพราะว่า การสูญเสียจากการส่งผ่านของโหมด  $HE^x$  และ  $HE^y$  ในเส้นใยแก้วนำแสงชนิดไฮไบร์ฟรินเจนซ์ (High-Birefringent) จะแสดงผลต่างโดยขึ้นกับความยาวคลื่น ซึ่งถ้าค่าของการสูญเสียจากการส่งผ่านน้อยการส่งผ่านของแสงจะได้ระยะทางมากขึ้นด้วย

การแบ่งแยกประเภทของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดไฮไบร์ฟรินเจนซ์ (HB) และ โลไบร์ฟรินเจนซ์ (Low-Birefringent:LB) ในทั่วไปจะพิจารณาในรูปแบบของค่าไบร์ฟรินเจนซ์ จากตารางที่ 3.2 เส้นใยแก้วนำแสงชนิด HB จะมีค่า  $B \approx 10^{-4}$  และ LB จะมีค่า  $B \approx 10^{-9}$  ในกรณีที่ค่า  $B$  มีค่ามากจะทำให้มีการรักษาสถานะ โพลาริซั้ได้มากกว่าจึงเรียกว่าไฮไบร์ฟรินเจนซ์ ส่วนในกรณีของค่า  $B$  มีค่าน้อยจะทำให้มีการรักษาสถานะ โพลาริซั้ได้น้อยกว่าจึงเรียกว่าโลไบร์ฟรินเจนซ์

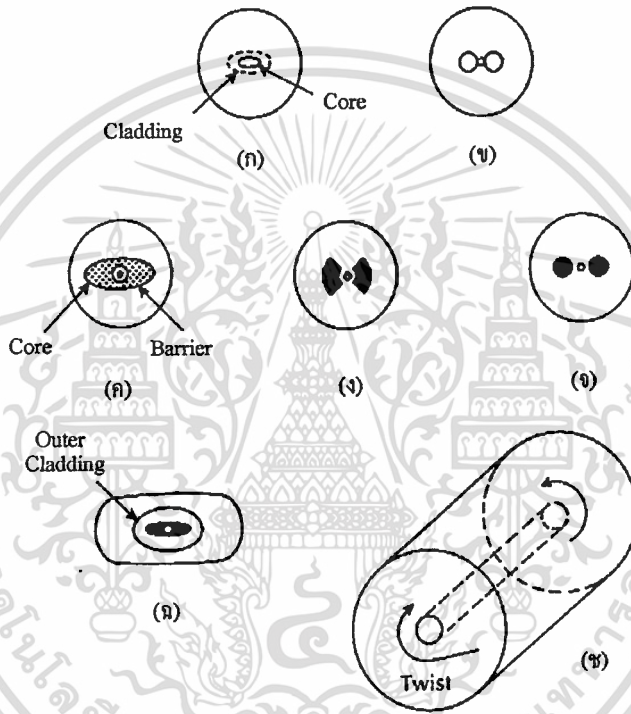
### 3.1.6.2 การผลิตเส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาริซั้

ในการผลิตเส้นใยแก้วนำแสงเพื่อให้มีการรักษาสถานะโพลาริซั้ได้นั้น จะมีการวิธีในการทำ 3 วิธีคือ

- 1) ทำให้รูปทรงของเส้นใยแก้วนำแสงเปลี่ยนไป ( Geometrical Effect) เช่นทำให้แกนคอร์เป็นวงรี (Elliptical Core) และเป็นหลุมด้านข้างแกนคอร์ (Side-Pit) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ซึ่งจะเป็นการทำในชนิดของ HB
- 2) ทำให้เกิดความเค้น ( Stress Effect) ขึ้นรอบๆ แกนคอร์ ซึ่งทำได้ 2 แบบคือ การทำให้คอร์ที่มีลักษณะไม่สมมาตร เช่น การทำให้เป็นวงรี ดังแสดงในรูปที่ 3.10(ค) และการทำให้เกิดมีแรงเค้นด้านข้าง (Stress applying regions) ของแกนคอร์ขึ้นเช่นที่พบในแบบโบว์-ไท (Bow-Tie) แบบแพนด้า (Panda) และแบบให้เส้นใยแก้วนำแสงแบน (Flat Fiber) ดังแสดงในรูปที่ 3.10(ง) , (จ) และ (ฉ) ตามลำดับ ซึ่งจะเป็นการทำในชนิดของ HB

- 3) ทำโดยการบิด (Twist) เส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งให้อัตราการบิดประมาณ 5 รอบต่อเมตร เป็นการลดสัญญาณไขว้แทรกกระหว่างโพลาริเซชันทั้งสองที่ตั้งฉากกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.10(ข) ซึ่งจะพบการทำในชนิดของ LB

ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำเอาเส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาริเซชันมาใช้ซึ่งเป็นชนิด HB แบบโบว์-ไท (Bow-Tie) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้คือ มีค่า  $B \approx 4.8 \times 10^{-4}$  ความยาวคลื่นประมาณ 850 นาโนเมตร มีค่าความยาวบิด 1 มิลลิเมตร [17]



รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะโครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาริเซชันแบบต่าง ๆ (ก) Elliptical Core (ข) Side-Pit Fiber (ค) Elliptical Stress-Cladding (ง) Bow-Tie Stress Regions (จ) Circular Stress Regions (PANDA) Fiber (ฉ) Flat Fiber (ช) Twisted Fiber

### 3.2 อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์

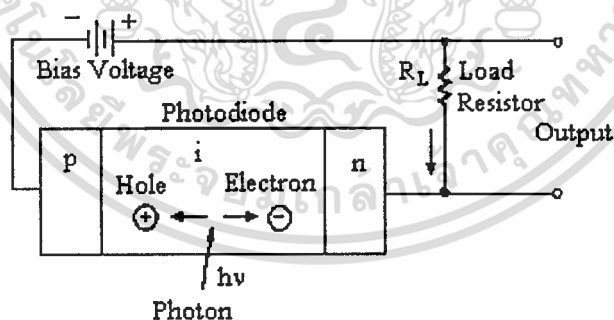
ในส่วนของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงพินไฟโต้ไดโอดและตัวมอดูเลเตอร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 3.2.1 พินโฟโต้ไดโอด

รูปแบบโครงสร้างของพินโฟโต้ไดโอด (PIN-Photodiode) แสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่เป็น P และ N ของสารกึ่งตัวนำ นอกจากนี้ยังมีบริเวณที่เป็นอินทรินซิก (Intrinsic) คั่นอยู่ระหว่างสาร P และ N โดยจะมีการเจือสาร N เข้าไปในเนื้อแท้ของสารนี้ด้วย [20] ในการทำงานปกติจะต้องไบแอสกลับให้กลับพินโฟโต้ไดโอด เมื่อมีโฟตอนมาตกกระทบโดยมีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าพลังงานของช่องว่าง (Band Gap) ของสารกึ่งตัวนำ โฟตอนจะปลดปล่อยพลังงานทำให้อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานต่ำเคลื่อนที่ไปสู่ระดับพลังงานสูง การทำงานของโฟตอนที่ประจุให้กับตัวกลางแสดงในรูปที่ 3.12 อุปกรณ์ตรวจรับแสงปกติจะออกแบบให้ตัวกลางการทำงานหลักอยู่ที่บริเวณรอยต่อ (บริเวณรอยต่อคือบริเวณอินทรินซิก) ซึ่งเป็นบริเวณที่แสงตกกระทบและใช้ในการดูดกลืนพลังงานของโฟตอน เมื่อป้อนกระแสให้กับโฟโต้ไดโอดแล้วอิเล็กตรอนจะไหลทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง เมื่ออิเล็กตรอนและโฮลมีการเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางซึ่งมีระยะทางเป็น  $L_n$  หรือ  $L_p$  ของอิเล็กตรอนและโฮล โดยมีเวลาที่อิเล็กตรอนหรือโฮลกลับมารวมกันใหม่นี้เรียกว่า ช่วงชีวิตของพาหะ (Carrier Lifetime) แสดงโดย  $\tau_p$  และ  $\tau_n$  ความสัมพันธ์ของความยาวในการแพร่คือ

$$L_n = (D_n \tau_n)^{1/2} \text{ และ } L_p = (D_p \tau_p)^{1/2} \quad (3.10)$$

ซึ่ง  $D_n$  และ  $D_p$  เป็นสัมประสิทธิ์ของการแพร่อิเล็กตรอนและโฮล



รูปที่ 3.11 แสดงรูปแบบโครงสร้างของพินโฟโต้ไดโอดและการไบแอสให้พินโฟโต้ไดโอด

แสงที่ถูกดูดกลืนในสารกึ่งตัวนำนี้จะมีค่าเป็น

$$P(x) = P_0(1 - e^{-\alpha(\lambda)x}) \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\alpha_s(\lambda)$  เป็นสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนของแสงที่ความยาวคลื่น  $\lambda$  และ  $P_0$  คือกำลังของแสงที่ตกกระทบ และ  $P(x)$  เป็นกำลังของแสงที่ถูกดูดกลืนในระทาง  $x$

สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นแสงของสารที่ใช้ทำโฟโวลต์ไดโอด จะเป็นตัวกำหนดสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ โดยความยาวคลื่นคัทออฟ ( $\lambda_c$ ) จะถูกกำหนดโดยพลังงานช่องว่าง ( $E_g$ ) ของวัตถุนั้น ถ้า  $E_g$  มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ดังนั้น  $\lambda_c$  จะมีหน่วยเป็นไมโครเมตรโดย

$$\lambda_c(\mu\text{m}) = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g(\text{eV})} \quad (3.12)$$

ความยาวคลื่นคัทออฟจะมีค่าเท่ากับ 1.06 ไมโครเมตร สำหรับซิลิคอน (Si) และ 1.6 ไมโครเมตร สำหรับเจอร์มาเนียม (Ge)

ถ้าที่บริเวณแพร่ของอิลีกตรอนมีความกว้าง  $W$  ดังนั้นจากสมการผลรวมที่กำหนดในการดูดกลืนแสงที่มีความกว้าง  $W$  เป็น

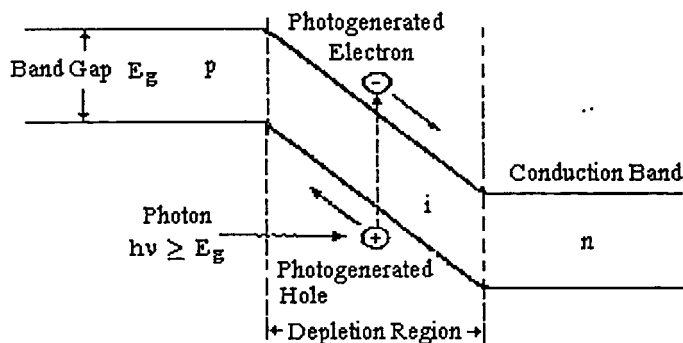
$$P(W) = P_0(1 - e^{-\alpha_s W}) \quad (3.13)$$

ถ้าให้การสะท้อน  $R_r$  ที่ตกบนผิวหน้าของผิวหน้าของโฟโวลต์ไดโอด มีกระแส  $I_p$  จากสมการกำลังของการดูดกลืนกำหนดโดย

$$I_p = \frac{q}{hv} P_0(1 - e^{-\alpha_s W})(1 - R_r) \quad (3.14)$$

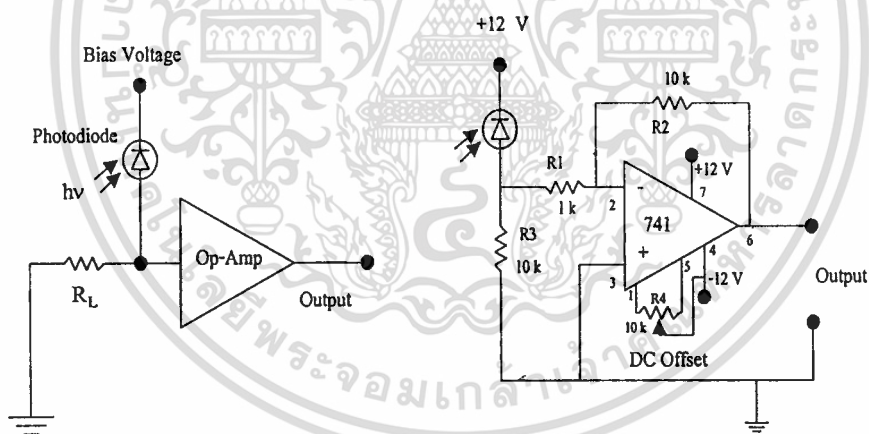
ซึ่ง  $P_0$  เป็นกำลังของที่ตกกระทบบนโฟโวลต์ไดโอด  $q$  คือประจุอิเล็กตรอน และ  $hv$  เป็นพลังงานโฟตอน และสัมประสิทธิ์ในการทำงานของ โฟโวลต์ไดโอด จะแสดงในรูปของการตอบสนองต่อแสง  $\mathcal{R}$  ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์คว้นตัม ( $\eta$ ) โดย

$$\mathcal{R} = \frac{I_p}{I_0} = \frac{\eta q}{hv} \quad (3.15)$$



รูปที่ 3.12 แสดงการไหลของอิเล็กตรอนในรอยต่อของพินโฟโต้ไดโอด

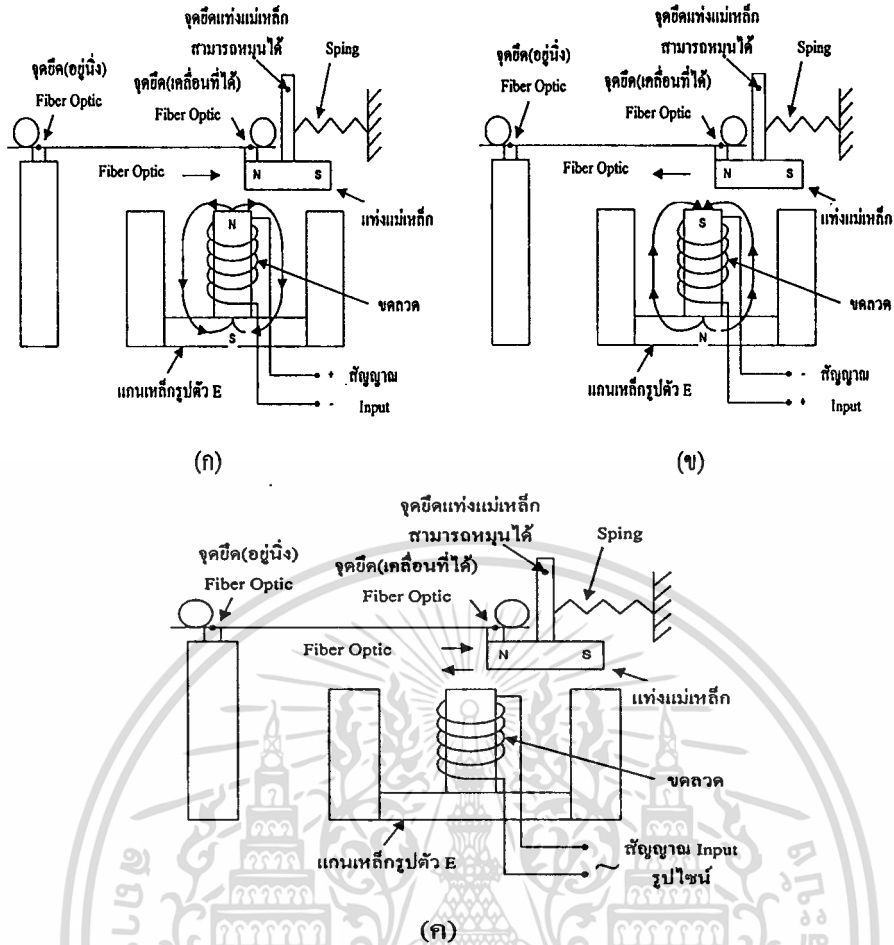
รูปแบบในการใช้งานพินโฟโต้ไดโอดและองค์ประกอบภายในโฟโต้ไดโอดดังแสดงในรูปที่ 3.13 ภายในตัวพินโฟโต้ไดโอดจะมีค่าความต้านทาน  $R_s$  ต่ออนุกรมอยู่ นอกจากนี้ยังมีตัวเก็บประจุ  $C_s$  ซึ่งเกิดขึ้นจากรอยต่อของสาร และความต้านทานของไบอัส  $R_L$  นอกจากนี้การขยายสัญญาณตามโฟโต้ไดโอด จะมีตัวเก็บประจุอินพุต  $C_i$  และค่าความต้านทาน  $R_i$  โดย  $R_i$  จะต้องต่ำกว่าค่าความต้านทานโหลด  $R_L$  มาก ๆ ดังนั้นจึงสามารถละทิ้งได้



รูปที่ 3.13 แสดงรูปแบบการใช้งานของพินโฟโต้ไดโอด

### 3.2.2 ตัวมอดูเลเตอร์

ตัวมอดูเลเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้หลักการของสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็กที่ขั้วติดกับเส้นใยแก้วนำแสง ให้เคลื่อนที่ไปมา ตามสัญญาณรูปไซน์ที่ใช้ขับตัวมอดูเลเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงรูปแบบของตัวมอดูเลเตอร์ ซึ่งใช้หลักการของสนามแม่เหล็กผลัดแท่งแม่เหล็กที่ยึดกับเส้นใยแก้วนำแสงให้เคลื่อนที่ตามแนวยาวตามจังหวะของสัญญาณที่ใช้ขับ

จากรูปที่ 3.14 กล่าวคือเมื่อให้สัญญาณรูปไซน์ที่เป็น AC เข้าไปในขดลวดที่พันรอบ แกนเหล็กนั้นจะทำให้แกนเหล็กเกิดสนามแม่เหล็กขึ้น โดยสนามแม่เหล็กจะมีทิศทางเคลื่อนที่จากขั้ว N ไป S ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้จะไปผลัดหรือดึงดูดแท่งแม่เหล็กที่ยึดกับเส้นใยแก้วนำแสงอยู่ให้เกิดการเคลื่อนที่ไปมาตามจังหวะความถี่ของสัญญาณที่ใช้ขับตัวมอดูเลเตอร์นี้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้สัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์) ที่เป็นสัญญาณรูปไซน์ ด้วยความถี่ประมาณ 20 เฮิร์ตซ์

### 3.3 สรุป

ในบทนี้ที่กล่าวมาจะเป็นเรื่องที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งจะกล่าวถึงเรื่องที่เป็นพื้นฐานของอุปกรณ์ และลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้รวมถึงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ด้วย ส่วนในบทต่อไปนั้นจะกล่าวถึงการควบคุมทิศทางของโพลาริเซชันด้วยวิธีการมอดูเลตเฟสของแสง โดยใช้เส้นใยแก้วนำแสง

## บทที่ 4

# การควบคุมทิศทางของโพลาริเซชันด้วยวิธีการมอดูเลตเฟส ของแสงโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสง

เนื้อหาภายในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงรายละเอียดของการควบคุมทิศทางของการโพลาริเซชันด้วยวิธีการมอดูเลตเฟสของแสงโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสง โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดในส่วนที่เป็นทฤษฎี การทดลอง รายละเอียดของผลการทดลอง รวมถึงผลของการบิดเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งจะกล่าวเป็นลำดับดังนี้

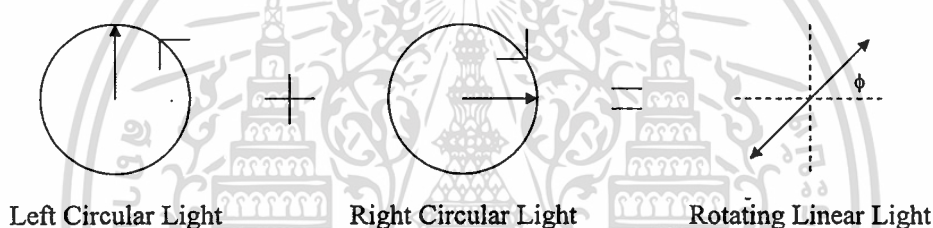
### 4.1 ทฤษฎี

การสร้างและการควบคุมทิศทางของลำแสงโพลาริเซชันสถานะเชิงเส้น โดยวิธีการมอดูเลตเฟสของแสงเป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญในงานด้านการวัดทางแสง การมอดูเลตเฟสของแสงนี้ จะทำให้การวิเคราะห์สัญญาณแสงเป็นไปอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว ในปัจจุบันได้มีการนำวิธีการมอดูเลตดังกล่าวไปใช้กับเทคนิคการวัดทางแสงหลายเทคนิค เช่น เอลลิปโซเมตรี (Ellipsometry) และโพลาริเมตรี (Polarimetry) ซึ่งในการวัดทั้งสองแบบอาศัยการวิเคราะห์สถานะของโพลาริเซชัน ที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการหักเห การทะลุผ่าน และการกระเจิง เนื่องมาจากตัวกลางของแสงเป็นสิ่งสำคัญ โดยการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแสงนี้จะเปลี่ยนแปลงตามค่าคงที่ทางแสง เช่น ค่าดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption Coefficient) ของตัวกลางที่กำลังตรวจสอบ

สำหรับงานวิจัยนี้การสร้างและการควบคุมทิศทางของแสงโพลาริเซชันเส้นใยแก้วนำแสงเป็นหลัก ซึ่งในทางทฤษฎีเส้นใยแก้วนำแสงมีลักษณะเป็นทรงกระบอก โดยมีความสมมาตรรอบแกนของเส้นใยแก้วนำแสง ดังนั้นในทางอุดมคติถ้าทำการฉายแสงที่มีสถานะทางโพลาริเซชันเป็นอะไรก็ตาม (เส้นตรง วงกลม หรือวงรี) เข้าไปที่ปลายด้านหนึ่งของเส้นใยแก้วนำแสง สถานะของแสงที่ได้จากปลายอีกข้างหนึ่งของเส้นใยแก้วนำแสงยังคงเป็นเช่นเดิม แต่ในทางปฏิบัติไม่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ต่าง ๆ ของเส้นใยแก้วนำแสง เช่น ความไม่สม่ำเสมอของแรงที่กระทำรอบแกนของเส้นใยแก้วนำแสง และความไม่สมมาตรรอบแกนของเส้นใยแก้วนำแสงทำให้สถานะโพลาริเซชันของแสงที่ปลายด้านนอกเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสาเหตุก็เนื่องมาจากความแตกต่างระหว่างส่วนประกอบย่อยของแสงเคลื่อนที่ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงในแนวแกนหลัก (Eigenaxes) มีความเร็วในการเคลื่อนที่ต่างกันเพราะค่าดัชนีหักเหต่างกัน เรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่าไบร์พรีนเจนซ์

แต่อย่างไรก็ตาม ความไม่สมบูรณ์ของเส้นใยแก้วนำแสงดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการรักษาสถานะโพลาไรซ์ของแสงได้กล่าวคือ ในเส้นใยแก้วนำแสงชนิดพิเศษ ซึ่งมีโครงสร้างที่ถูกออกแบบมาให้เกิดแรงที่แตกต่างกันสองแรงกระทำรอบแกนเส้นใยแก้วนำแสง แล้วเกิดเป็นแนวแกนหลักสองแกน ซึ่งมีผลทำให้แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่เคลื่อนที่ผ่านในแนวแกนหลักดังกล่าวมีสถานะคงเดิม สำหรับในงานวิจัยนี้ การควบคุมทิศทางของโพลาไรเซชันอาศัยเส้นใยแก้วนำแสงชนิดพิเศษดังกล่าว ร่วมกับเทคนิคการยืด (Stretching) เส้นใยแก้วนำแสง เพื่อให้แสงที่ส่องผ่านเส้นใยแก้วนำแสงเปลี่ยนแปลงเฟสและทำให้มีสถานะโพลาไรซ์ตามต้องการ

สำหรับการศึกษาศัพท์หลักการรวมกันของแสงโพลาไรซ์สถานะวงกลม ซึ่งมีปลายเวกเตอร์ลัพธ์ของสนามไฟฟ้ากวาดไปในทิศทางตรงกันข้าม (ตามซ้ายและตามขวา) ซึ่งทำให้ได้ผลเป็นแสงโพลาไรซ์สถานะเชิงเส้น โดยมีมุมอิมพิวท์ (Azimuth) ขึ้นกับความต่างเฟสระหว่างสถานะวงกลมทั้งสอง ดังรูปที่ 4.1

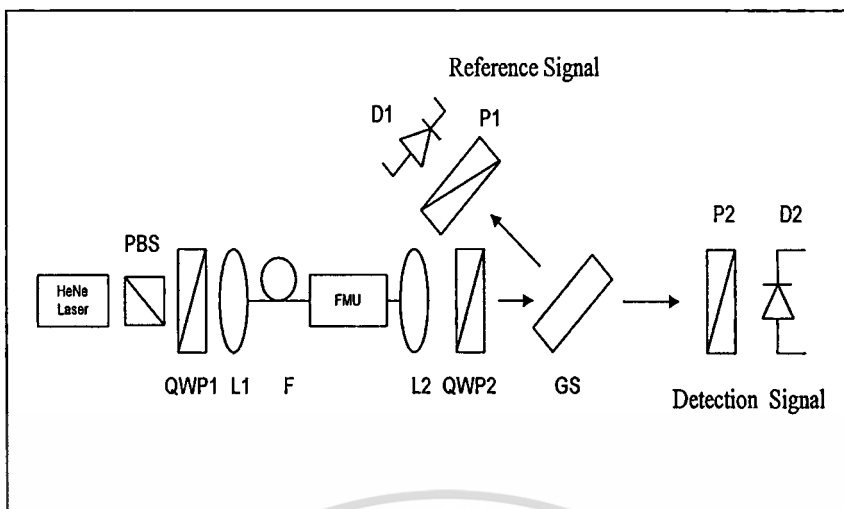


รูปที่ 4.1 แสดงการรวมกันของแสงโพลาไรซ์วงกลมโดยให้ผลออกมาเป็นแสงโพลาไรซ์สถานะเชิงเส้นซึ่งมีมุมอิมพิวท์เป็น  $\phi$

การมอดูเลตโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาไรซ์เป็นตัวกลางของแสง (แสดงได้ดังรูปที่ 4.2) ทำให้เกิดความต่างเฟสระหว่างแสงโพลาไรซ์สถานะวงกลมทั้งสองซึ่งมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของมุมอิมพิวท์ของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่เอาต์พุต ซึ่งสามารถควบคุมได้ การมอดูเลตดังกล่าวกระทำได้โดยการทำให้เส้นใยแก้วนำแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงตามแนวแกนของเส้นใยแก้วนำแสง ตามจังหวะของสัญญาณขับที่ป้อนให้กับตัวมอดูเลเตอร์ (ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2.2) สัญญาณที่ใช้ขับตัวมอดูเลเตอร์นี้เป็นสัญญาณรูปไซน์ ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ (ตัวมอดูเลเตอร์นี้ใช้หลักการของสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีหลักการทำงานโดยผลึกให้แกนเหล็กที่ยึดกับเส้นใยแก้วนำแสงเคลื่อนที่ตามแนวยาวของเส้นใยแก้วนำแสงตามจังหวะการมอดูเลตที่เป็นสัญญาณรูปไซน์) ซึ่งเรียกชุดมอดูเลตนี้ว่า ชุดมอดูเลตเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Modulation Unit: FMU)

รูปแบบของการจัดชุดทดลองการควบคุมทิศทางของโพลาไรเซชันด้วยวิธีการมอดูเลตเฟสของแสงโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางทางแสง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงการจัดชุดการทดลองการควบคุมทิศทางของโพลาไรเซชันด้วยวิธีการมอดูเลตเฟสของแสงโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางทางแสง P1,2 : Polarizers ; L1,2 : Lenses; QWP1,2 : Quarter-Wave Plates; Gs : Glass Slide ; D1,2 : Detectors ; FMU : Fiber Modulation Unit ; F : HiBi Fiber ; PBS : Polarizing Beamsplitter

จากรูปที่ 4.2 ทางด้านอินพุตแสงโพลาไรซ์วงกลมถูกส่งผ่านเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งได้รับการมอดูเลตทำให้ความต่างเฟสของแสงซึ่งเคลื่อนที่ไปตามแนวแกนหลัก ทั้งสองเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยที่เอาต์พุตแสงทั้งสองถูกเปลี่ยนให้มีสถานะโพลาไรซ์วงกลมตามซ้ายและตามขวา (ได้จากการปรับ QWP2) ซึ่งเมื่อแสงโพลาไรซ์วงกลมทั้งคู่รวมกันจะให้เป็นแสงโพลาไรซ์สถานะเชิงเส้น (รูปที่ 4.1) โดยการเปลี่ยนแปลงความต่างเฟสระหว่างลำแสงทั้งสองเนื่องจากด้วย FMU ทำให้สามารถควบคุมมุมอิมิตของแสงเอาต์พุตได้

โดยอาศัยคณิตศาสตร์ซึ่งเสนอโดยโจนส์ สัญญาณเอาต์พุต ( $\vec{E}_{\text{Output}}$ ) เขียนได้ดังนี้

$$\vec{E}_{\text{Output}} = Q_{\theta} M \vec{E}_{\text{Input}} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $\vec{E}_{\text{Input}}$  แสดงเวกเตอร์สนามไฟฟ้าของลำแสงอินพุต  $M$  แสดงมอดูเลเตอร์เมตริกซ์ (Modulator Matrix) แทนเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งถูกมอดูเลตและ  $Q_{\theta}$  เป็นโจนส์เมตริกซ์สำหรับ QWP ซึ่งทำมุม  $\theta$  กับแกนของเส้นใยแก้วนำแสง

กำหนดให้แสงจากเลเซอร์อีเลียมเนียนเขียนแทนได้ด้วยโจนส์เวกเตอร์ดังนี้

$$\vec{E}_{\text{Input}} = \frac{E_0}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} e^{i\omega_0 t} \quad (4.2)$$

โดยที่

$E_0$  คือ แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า

$\omega_0$  คือ ความถี่เชิงมุม

$t$  คือ เวลา

โดยลำแสงเคลื่อนที่ผ่านส่วนประกอบต่าง ๆ ตามลำดับ (รูปที่ 4.2) โดยในที่นี้ QWP2 ทำมุม 45 องศา กับแกนของเส้นใยแก้วนำแสง และจากสมการที่ (4.1) แสงเอาต์พุตสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} \vec{E}_{\text{Output}} &= Q_{+45^\circ} (M) (\vec{E}_{\text{Input}}) \\ &= \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\Delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \frac{E_0}{2} e^{i\omega_0 t} \end{aligned} \quad (4.3)$$

เมื่อ

$$\begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \text{ คือ โจนส์เมทริกซ์สำหรับ QWP ซึ่งมีแกนเร็ว ทำมุม 45 องศา กับแกนของเส้นใยแก้วนำแสง}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\Delta} \end{bmatrix} \text{ คือ โจนส์เมทริกซ์ (Tatam et al. [5]) สำหรับเส้นใยแก้วนำแสง ชนิดรักษาสถานะโพลาไรซ์ ซึ่งถูกมอดูเลตทำให้เฟสของแสง ในแนวแกนที่ตั้งฉากกันมีความแตกต่างเท่ากับ } \Delta \text{ โดยที่ค่าของ แอมพลิจูดของแสงไม่เปลี่ยน}$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่เอาต์พุตเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \vec{E}_{\text{Output}} &= \begin{bmatrix} 1 + ie^{i\Delta} \\ i + e^{i\Delta} \end{bmatrix} \frac{E_0}{2} e^{i\omega_0 t} \\ &= \begin{bmatrix} ie^{i\Delta} + 1 \\ e^{i\Delta} - 1 \\ i \end{bmatrix} \frac{E_0}{2} e^{i\omega_0 t} \\ &= \begin{bmatrix} e^{i(\Delta + \frac{\pi}{2})} + 1 \\ e^{i(\Delta + \frac{\pi}{2})} - 1 \\ i \end{bmatrix} \frac{E_0}{2} e^{i\omega_0 t} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \begin{bmatrix} \frac{e^{i\frac{1}{2}(\Delta+\frac{\pi}{2})} + e^{-i\frac{1}{2}(\Delta+\frac{\pi}{2})}}{2} \\ \frac{e^{i\frac{1}{2}(\Delta+\frac{\pi}{2})} - e^{-i\frac{1}{2}(\Delta+\frac{\pi}{2})}}{2i} \end{bmatrix} E_0 e^{i(\omega_0 t + \gamma)} ; \gamma = +\frac{1}{2}(\Delta + \frac{\pi}{2}) \quad (4.4)$$

เนื่องจาก

$$\cos \Omega = \frac{e^{i\Omega} + e^{-i\Omega}}{2} \quad (4.5-a)$$

$$\sin \Omega = \frac{e^{i\Omega} - e^{-i\Omega}}{2i} \quad (4.5-b)$$

ทำให้สนามไฟฟ้าเอาต์พุตเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\vec{E}_{\text{Output}} = \begin{bmatrix} \cos \frac{1}{2}(\Delta + \frac{\pi}{2}) \\ \sin \frac{1}{2}(\Delta + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} E_0 e^{i(\omega_0 t + \gamma)} \quad (4.6)$$

ซึ่งเป็นแสงโพลาไรซ์สถานะเชิงเส้น ที่สามารถควบคุมมุมอิมิตผ่าน  $\Delta$  ที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการมอดูเลต

เอาต์พุตของแสงที่ออกมาจะถูกวัดออกมาในรูปของความเข้มแสงโดยใช้อุปกรณ์รับแสง ความเข้มของเอาต์พุตหาได้จาก

$$\begin{aligned} I_{\text{Output}} &= (\vec{E}_{\text{Output}}) \cdot (\vec{E}_{\text{Output}})^* \\ &= I_0 \end{aligned} \quad (4.7)$$

เมื่อ  $I_0 = E_0^2$  เท่ากับค่าคงที่ และ  $(\vec{E}_{\text{Output}})^*$  คือคอนจูเกต (Conjugate) ของ  $(\vec{E}_{\text{Output}})$

ดังนั้นการวัดสัญญาณเอาต์พุตหลังจาก QWP จะได้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ถ้า นำโพลาไรเซอร์ (P2) เข้ามากันก่อนอุปกรณ์รับสัญญาณ (Photodetector) การส่งผ่านสนามไฟฟ้าจะ กลายเป็น

$$\vec{E}_{\text{Analyzer}} = A_\theta \vec{E}_{\text{Output}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \begin{bmatrix} \cos^2 \theta \cos \frac{1}{2} \left( \Delta + \frac{\pi}{2} \right) + \cos \theta \sin \theta \sin \frac{1}{2} \left( \Delta + \frac{\pi}{2} \right) \\ \cos \theta \sin \theta \cos \frac{1}{2} \left( \Delta + \frac{\pi}{2} \right) + \sin^2 \theta \sin \frac{1}{2} \left( \Delta + \frac{\pi}{2} \right) \end{bmatrix} E_0 e^{i(\omega_0 t + \gamma)} \quad (4.8)$$

เมื่อ  $A_\theta$  คือ โจนส์เมตริกซ์สำหรับแอนะไลเซอร์ที่ทำมุม  $\theta$  ใด ๆ กับแกนอ้างอิง

$$A_\theta = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix}$$

ดังนั้น ความเข้มแสงหลังจากผ่านแอนะไลเซอร์เขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} I_{\text{Analyzer}} &= (\vec{E}_{\text{Analyzer}}) \cdot (\vec{E}_{\text{Analyzer}})^* \\ &= \frac{I_0}{2} [1 + \cos \{2\theta - (\Delta + \frac{\pi}{2})\}] \end{aligned} \quad (4.9)$$

สัญญาณเอาต์พุตที่แสดงนี้เป็นฟังก์ชันของมุมที่ทำกับแอนะไลเซอร์  $\theta$  เทียบกับแนวแกนอ้างอิงและเฟสออกดูเลชัน  $\Delta$  จากสมการ (4.9) สังเกตได้ว่าแอมพลิจูดของสัญญาณคงที่ในขณะที่เฟสของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไป และผลที่ได้ตามมาก็คือความสามารถในการควบคุมทิศทาง (Orientation) ของแสงโพลาไรซ์สถานะเชิงเส้นตามต้องการ

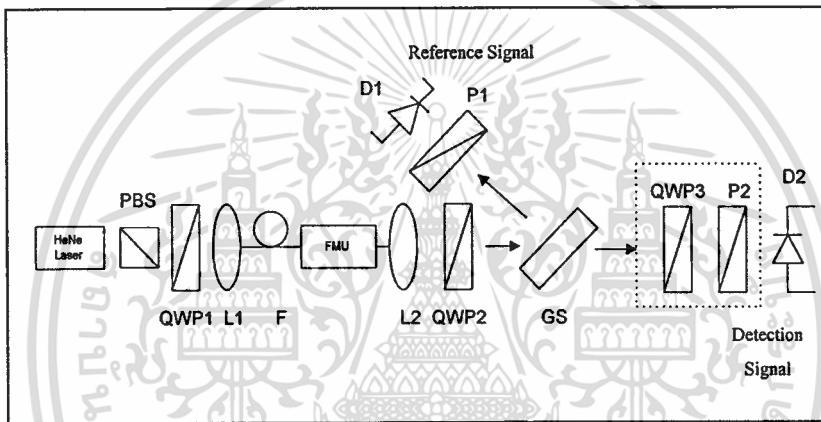
ในการวิเคราะห์ระบบจะใช้โจนส์แคลคูลัสวิเคราะห์ระบบการมอดูเลตเฟสของแสงข้างต้น ทำให้สามารถคาดได้ว่าลักษณะของเอาต์พุตที่ถูกต้องตรงตามทฤษฎีควรเป็นเช่นไร โดยแสดงออกมาในรูปของโจนส์เวกเตอร์ แต่เนื่องจากรูปแบบดังกล่าวเขียนอยู่ในรูปสนามไฟฟ้าซึ่งไม่ใช่ค่าที่วัดได้โดยตรง ในการวิเคราะห์ผลสุดท้ายทุกครั้งจึงต้องทำการแปลงรูปแบบดังกล่าวให้อยู่ในรูปความเข้มของแสงเพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบผลระหว่างทฤษฎีและผลที่ได้จากการทดลองจริง

จากข้อค้อยดังกล่าวข้างต้น ในงานวิจัยนี้ จึงได้มีการนำคณิตศาสตร์อีกรูปแบบหนึ่งที่สามารถใช้แทนสถานะโพลาไรซ์ของแสงได้เช่นเดียวกันเพื่อมาวิเคราะห์ผลการศึกษา รูปแบบของคณิตศาสตร์ดังกล่าวรู้จักกันในนามของมุลเลอร์แคลคูลัส โดยอาศัยสโตกส์พารามิเตอร์ ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2

ซึ่งโดยทั่วไปสโตกส์พารามิเตอร์สามารถเขียนอยู่ในรูปของเมตริกซ์แนวตั้งได้ดังนี้

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

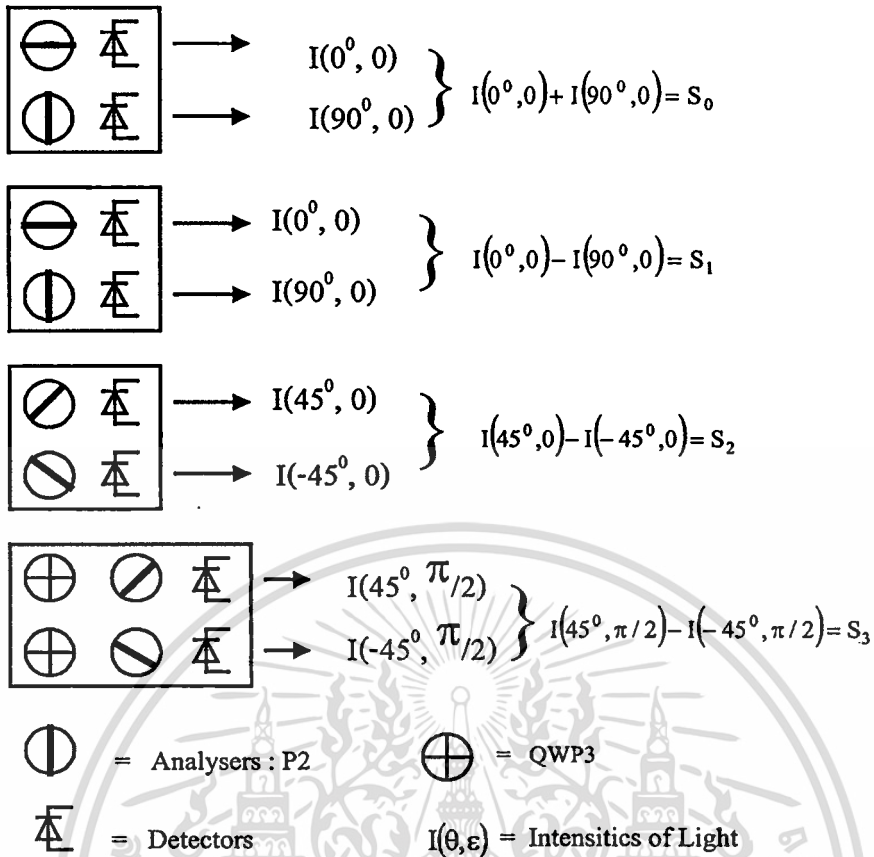
ดังนั้นในการวิเคราะห์สถานะของเอาต์พุตที่ได้จากชุดมอดูเลตเฟสของแสงโดยมีเส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางสามารถทำได้โดยการวัดความเข้มแสงต่าง ๆ ตามที่ปรากฏในสมการ (4.10) ซึ่งวิธีการในทางปฏิบัติที่นิยมใช้ในการวัดค่าความเข้มแสงที่ต้องการเหล่านี้ก็คือการใช้อุปกรณ์ทางแสงสองชนิดประกอบด้วย แผ่นโพลาไรเซอร์ และผลึกหน่วงเฟส QWP มาจัดเรียงในตำแหน่งที่เหมาะสม ณ บริเวณเอาต์พุตของชุดทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงการจัดชุดอุปกรณ์ทางแสงเพื่อทำการวัดค่าสโตกส์พารามิเตอร์ P1,2 : Polarizers ; L1,2 : Lenses ; QWP1,2,3 : Quarter-Wave Plates ; Gs : Glass Slide ; D1,2 : Detectors ; FMU : Fiber Modulation Unit ; F : HiBi Fiber ; PBS : Polarizing Beamsplitter

ในการจัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์ดังที่แสดงในรูป 4.3 นั้นมุมที่จัดวางของ P2 และ QWP3 จะมีการจัดวางตำแหน่งและมุมของอุปกรณ์ดังกล่าวในรูปที่ 4.4

จากรูปที่ 4.4 สามารถหาค่าของสโตกส์พารามิเตอร์แต่ละตัวได้ดังนี้  $S_0$  จะเป็นผลรวมของความเข้มแสงซึ่งจัดให้มุมของ P2 ขนานและตั้งฉากกับ P1 (ซึ่งกำหนดตำแหน่งอ้างอิง) ตามลำดับ  $S_1$  จะเป็นค่าของผลต่างของความเข้มแสงซึ่งจัดให้มุมของ P2 ขนาน และตั้งฉากกับ P1 ตามลำดับ  $S_2$  เป็นผลต่างของความเข้มแสงโดยจัดให้มุมของ P2 ทำมุม 45 และ -45 องศาตามลำดับ ส่วน  $S_3$  จะเป็นค่าผลต่างของความเข้มแสงที่เป็นวงกลมหมุนซ้ายและขวาซึ่งทำได้โดยการจัดให้ QWP3 ทำมุม ขนานกับ P1 ส่วน P2 จัดให้ทำมุม 45 และ -45 องศาตามลำดับ



รูปที่ 4.4 แสดงการจัดอุปกรณ์ทางแสงเพื่อทำการวัดความเข้มแสงที่มุมต่างๆ สำหรับสโตกส์พารามิเตอร์แต่ละตัว

จากค่าสโตกส์พารามิเตอร์นี้ สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณที่สำคัญสองปริมาณที่สามารถบ่งชี้ถึงคุณภาพของแสงโพลาไรซ์ที่กำลังถูกตรวจสอบ โดยปริมาณทั้งสองประกอบด้วยค่า DOP และ  $\epsilon$  ดังที่แสดงในสมการที่ (2.57) และ (2.58) ที่ผ่านมามาตามลำดับ

## 4.2 การทดลอง

จัดอุปกรณ์ทดลองการควบคุมทิศทางของโพลาไรเซชันด้วยวิธีการมอดูเลตเฟสของแสง โดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงดังรูปที่ 4.2 ในชุดทดลองจะประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนซึ่งให้แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ออกมา ส่องผ่านฟลิกแยก/รวมลำแสงชนิดโพลาไรซ์ (Polarizing Beamsplitter: PBS) ซึ่งทำมาจากแก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate) และมีค่าอัตราการดูดกลืนทางแสง (Extinction Ratio) ประมาณ  $10^2$  เพื่อให้คุณภาพโพลาไรซ์ของแสงดีขึ้น แผ่นฟลิกหน่วงเฟส QWP1 (ทำมาจากฟลิกควอตซ์และมี Retardation Tolerance เท่ากับ  $\lambda/500$ ) ถูกจัดให้แกนของฟลิกอยู่ในทิศทางที่เหมาะสมเพื่อทำให้ลำแสงก่อนที่จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านเข้าสู่เส้นใยแก้วนำแสงมีสถานะของแสงเป็น โพลาริซวงกลมโดยสถานะนี้จะทำให้ปริมาณของแสงที่ผ่านเข้าไปในแกนของเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าเท่ากัน เส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในงานนี้เป็นชนิดที่สามารถรักษาสถานะโพลาริซของแสงได้ กล่าวคือค่าไบร์พรีนเจนซ์ของเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าประมาณ  $10^{-4}$  และมีความยาวประมาณ 50 เซนติเมตร การมอดูเลตกระทำได้โดยการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงตามแนวแกนของเส้นใยแก้วนำแสงตามจังหวะของสัญญาณขับที่ป้อนให้กับตัวมอดูเลเตอร์ สัญญาณที่ใช้ขับตัวมอดูเลเตอร์นี้เป็นสัญญาณรูปไซน์ ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์

ทางด้านเอาต์พุต แสงที่อยู่แนวแกนของเส้นใยแก้วนำแสงที่ตั้งฉากกันจะเคลื่อนที่ผ่านแผ่นผลึกหน่วงเฟสแผ่นที่สอง (QWP2) ซึ่งถูกจัดให้แกนของแผ่นผลึกทำมุม 45 องศากับแกนของเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งมีผลทำให้แสงที่อยู่ในแต่ละแนวแกนของเส้นใยแก้วนำแสงถูกเปลี่ยนเป็นแสงโพลาริซสถานะวงกลมที่มีทิศทางการกวาดของเวกเตอร์สวนทางกันดังรูปที่ 4.1 ณ ตรงจุดนี้แสงโพลาริซสถานะวงกลมดังกล่าวก็จะรวมกันทำให้เกิดเป็นแสงโพลาริซสถานะเชิงเส้นซึ่งมีแนวแกนของแสงทำมุมอซิมูทค่าหนึ่งกับแกนของเส้นใยแก้วนำแสง และโดยการมอดูเลตเส้นใยแก้วนำแสงดังกล่าว ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าไบร์พรีนเจนซ์ และความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงเทียบกับเวลา (ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อ 4.3) ส่งผลให้เกิดความต่างเฟสระหว่างแสงโพลาริซวงกลมทั้งสองและทำให้แสงโพลาริซเชิงเส้นที่ได้มีทิศทางเปลี่ยนแปลงไปตามจังหวะการมอดูเลตแล้วเกิดเป็นแสงโพลาริซเชิงเส้นซึ่งสามารถควบคุมทิศทางได้ จากนั้นลำแสงที่ผ่านแผ่นผลึกหน่วงเฟสอันที่ 2 (QWP2) ออกมา จะถูกนำไปแยกลำแสงโพลาริซเชิงเส้นส่วนหนึ่งออกจากลำแสงหลัก เพื่อใช้เป็นสัญญาณทางแสงสำหรับอ้างอิง (Reference Signal) ส่วนลำแสงหลักจะนำไปใช้ในการวัดค่าโดยกำหนดให้เป็นสัญญาณตรวจสอบ (Detection Signal) ในการแยกลำแสงนี้จะใช้แผ่นแก้วสไลด์บาง (GS) เป็นตัวแยก โดยจัดให้แผ่นแก้วสไลด์ทำมุมตกกระทบประมาณ 3 องศากับแนวทางเดิน โดยแสงที่สะท้อนจากแผ่นแก้วสไลด์ผ่านโพลาริเซอร์ตัวที่ 1 (P1) และตกลงบนหัววัดแสงตัวที่ 1 (D1) ซึ่งสัญญาณที่ได้จากจุดนี้จะกำหนดให้เป็นสัญญาณอ้างอิง ส่วนลำแสงที่ทะลุผ่านแผ่นแก้วสไลด์ไปผ่านโพลาริเซอร์ตัวที่ 2 (P2) และตกลงบนหัววัดตัวที่ 2 (D2) กำหนดให้เป็นสัญญาณตรวจสอบ

หลังจากได้สัญญาณตรวจสอบเรียบร้อยแล้ว จะทำการวิเคราะห์สัญญาณโดยอาศัยสโตกส์พารามิเตอร์ สามารถกระทำได้โดยการเพิ่มเติมอุปกรณ์ทางแสงซึ่งประกอบด้วยแผ่นโพลาริเซอร์ (P2) และผลึกหน่วงเฟสชนิดหนึ่งในสี่ช่วงคลื่น (QWP3) ลงไปด้านที่กำหนดให้เป็นสัญญาณตรวจสอบดังรูปที่ 4.3 ซึ่งการจัดวางมีวิธีการตามที่บรรยายไว้ในส่วนของทฤษฎี

เนื่องจากในการวัดความเข้มแสงเพื่อนำมาเขียนเป็นพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสโตกส์จำเป็นต้องวัดเทียบกับแกนอ้างอิงเสมอ ซึ่งในการจัดชุดทดลองตามรูปที่ 4.3 การอ้างอิงสามารถกระทำได้

โดยผ่านสัญญาณอ้างอิงที่ได้มาจาก D1 ซึ่งกำหนดให้เป็นสัญญาณอ้างอิง ซึ่งทำให้การวัดผลเป็นไปอย่างสะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น

### 4.3 การยืดเส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาไรซ์

เมื่อเส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาไรซ์ชันถูกยืดออกหรือถูกรบกวน ค่าเฟสของแสงจะเปลี่ยนไปดังแสดงในสมการที่ 4.11 ดังนี้

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} LB \quad (4.11)$$

เมื่อ  $\phi$  เป็นเฟสของแสง  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่นแสง  $L$  เป็นความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง  $B$  เป็นค่าไบร์ฟรินเจนซ์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความยาวบิดดิ่งนี้  $1_p = \lambda/B$  เมื่อมีความเครียด (Strain) มากระทำกับเส้นใยแก้วนำแสง ค่าไบร์ฟรินเจนซ์จะเขียนได้เป็น

$$B_{st} = -\frac{(v_2 - v_1)}{(\alpha_2 - \alpha_1)T} \varepsilon_z BL \quad (4.12)$$

เมื่อ  $\varepsilon_z = \Delta L/L$  โดยที่  $B_{st}$  เป็นค่าไบร์ฟรินเจนซ์ที่เพิ่มขึ้น โดยความเครียด  $T$  เป็นอุณหภูมิโดยรอบ  $\alpha$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเส้นใยแก้วนำแสง และ  $v$  เป็นอัตราส่วนระหว่างความเครียดทางข้างกับความเครียดทางยาว (Poisson's Ratios) ของเส้นใยแก้วนำแสงที่ถูกดึง [15] ดังนั้นเฟสของแสงเนื่องจากความเครียดจะเขียนได้เป็น

$$\phi_{st} = \frac{2\pi}{\lambda} LB_{st} \quad (4.13)$$

เมื่อกำหนดให้เฟสของแสงมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็น  $2\pi$  จะเขียนสมการใหม่ได้ว่า

$$2\pi = \phi_{st} = \frac{2\pi}{\lambda} LB_{st} \quad (4.14)$$

จะได้

$$B_{st} L = \lambda \quad (4.15)$$

จากสมการที่ (4.12) แทนค่าต่าง ๆ จะได้สมการใหม่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda = -\frac{(v_2 - v_1)}{(\alpha_2 - \alpha_1)\Gamma} \text{BL} \left( \frac{\Delta L_{2\pi}}{L} \right) \quad (4.16)$$

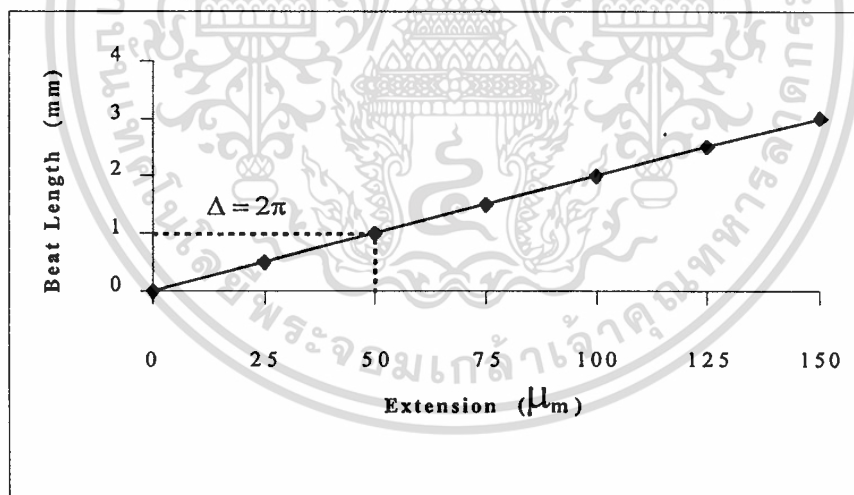
จากสมการที่ (4.16) จัดรูปใหม่จะได้

$$\frac{\lambda}{B} = I_p = -\frac{(v_2 - v_1)}{(\alpha_2 - \alpha_1)\Gamma} \Delta L_{2\pi} \quad (4.17)$$

จะได้ว่าเมื่อเฟสของแสงเปลี่ยนแปลงไป  $2\pi$  จะทำให้เส้นใยแก้วนำแสงยืดออกไป [16] ดังสมการที่ (4.18)

$$\Delta L_{2\pi} = -\frac{(\alpha_2 - \alpha_1)\Gamma}{(v_2 - v_1)} I_p \quad (4.18)$$

จากรูปที่ 4.5 แสดงการคำนวณหาค่าการยืดของเส้นใยแก้วนำแสงที่ทำให้เฟสของแสงเปลี่ยนไปเป็น  $2\pi$  โดยอาศัยสมการ (4.18) ทำให้สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวบิดกับค่าการยืดไปของเส้นใยแก้วนำแสงได้ดังนี้

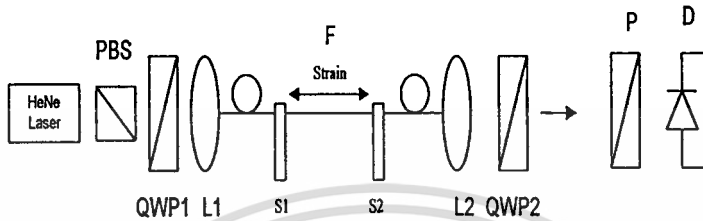


รูปที่ 4.5 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวบิดกับค่าการยืดของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด โบว์-ไท ที่ทำให้เฟสของแสงเปลี่ยนแปลงไปเป็น  $2\pi$  เมื่อความยาวบิดเป็นค่าต่าง ๆ

จากเส้นใยแก้วนำแสงชนิด โบว์-ไท ซึ่งทำมาจากซิลิกา/โบโรซิลิเกตมีค่า  $v_2 - v_1 = 0.02$  ซึ่งเป็นการประมาณ โดยความแตกต่างของอัตราส่วนระหว่างความเร็วคทางข้างกับความเร็วยาวของ แก้วโบโรซิลิเกตและซิลิกาในเส้นใยแก้วนำแสงที่ถูกดึง และค่าผลต่างสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเอกซานนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นของเส้นใยแก้วนำแสง  $(\alpha_2 - \alpha_1)T = -10^{-3}$  และมีค่าของความยาวบิด  $L_p = 1$  มิลลิเมตร [15] จากรูปที่ 4.5 เส้นใยปลาทูจะแสดงตำแหน่งที่ความยาวบิดมีค่าเป็น 1 มิลลิเมตร จะได้ค่าการบิดของเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งทำให้เฟสของแสงเปลี่ยนไปเป็น  $2\pi$  คือ 50 ไมโครเมตร

ในการงานวิจัยนี้ได้มีการทดลองวัดค่าการบิดของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโบว์-ไท ที่ทำให้เฟสของแสงไปเป็น  $2\pi$  จะการจัดรูปแบบการทดลองแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 รูปแสดงชุดทดลองการวัดค่าการบิดของเส้นใยแก้วนำแสงที่ทำให้เฟสของแสงเปลี่ยนแปลงไปเป็น  $2\pi$ ; โดยที่ P : Polarizer; L1,2 : Lenses; QWP1,2 : Quarter-Wave Plates; D : Detector; F : HiBi Fiber (Bow-tie); PBS : Polarizing Beamsplitter; S1,2 : เป็นตัวยึดเส้นใยแก้วนำแสงสำหรับการทดลองการบิดของเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งสามารถปรับการบิดได้เป็นไมโครเมตร (ในการทดลองนี้ S1 ยึดกับที่แต่ S2 สามารถปรับได้โดยอาศัยไมโครมิเตอร์)

ซึ่งวิธีการทดลองนี้จะใช้ตัวยึดเส้นใยแก้วนำแสง S1 และ S2 เป็นตัวยึดเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งมีตัวปรับค่าซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้เป็นไมโครเมตรโดยอาศัยไมโครมิเตอร์ ทำการยึดเส้นใยแก้วนำแสงทีละน้อย ๆ โดยสังเกตสัญญาณจากอุปกรณ์รับแสง โดยเริ่มแรกนั้นจัดเตรียมตำแหน่งในการยึดเส้นใยแก้วนำแสงให้เหมาะสมก่อน โดยให้ความเข้มแสงที่อุปกรณ์รับแสงมีค่ามากที่สุดก่อน จากนั้นทำการยึดเส้นใยแก้วนำแสงไปเรื่อยจนค่าความเข้มของแสงกับมามีค่ามากที่สุดอีกครั้ง (จะสังเกตได้ว่าความเข้มของแสงจะลดลงจนถึงจุดต่ำสุดและจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่ามากที่สุดเดิม) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงเฟสของแสงไปเป็น  $2\pi$  ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากสมการที่ (4.9) โดยการแทนค่าของ  $\theta$  ด้วยมุม 45 องศาและแทนค่า  $\Delta$  เป็น  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi$  ซึ่งค่าความเข้มของแสงที่ได้เป็น  $I_0, I_0/2, 0, I_0/2, I_0$  จะสังเกตได้ว่าเมื่อเฟสของแสงเปลี่ยนแปลงไปจาก  $0 - 2\pi$  จะได้ความเข้มของแสงเปลี่ยนแปลงไปครบ 1 รอบพอดี

#### 4.4 สรุป

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงวิธีการควบคุมทิศทางของแสงโพลารไรซ์ด้วยวิธีการมอดูเลตเฟสของแสงโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลาง ซึ่งในการทดลองนี้ทำการมอดูเลตโดยการยัดเส้นใยแก้วนำแสงตามยาวด้วยตัวมอดูเลเตอร์ด้วยความถี่ที่คงที่ ประมาณ 20 เฮิร์ตซ์ ซึ่งสามารถควบคุมทิศทางของโพลารไรเซชันได้ตามต้องการและเป็นไปตามในส่วนของทฤษฎี และยังได้กล่าวถึงการวิเคราะห์สถานะของแสงเอาต์พุตที่ได้โดยใช้สโตกส์พารามิเตอร์มาวัดค่าอีกด้วย รวมถึงในส่วนท้ายของบทได้กล่าวถึงการยัดเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งเป็นผลให้เฟสของแสงเปลี่ยนแปลงไป ส่วนในบทต่อไปจะกล่าวถึงในส่วนของการปรับปรุงและการประยุกต์ใช้ชุดมอดูเลตเฟสของแสงในการวัดค่าพื้นผิวของตัวอย่างที่มีลักษณะต่างกัน และวัดค่าการเลื่อนเฟสของผลึกหน่วงเฟสรวมถึงการหาแกนเร็วและแกนช้าของผลึกหน่วงเฟส



## บทที่ 5

# การปรับปรุงและประยุกต์ใช้งานชุดมอดูเลตเฟสของแสง โดยใช้เส้นใยแก้วนำแสง

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการปรับปรุงคุณภาพของแสงที่ได้จากชุดทดลองที่ใช้ซึ่งเมื่อทำการปรับปรุงแล้วจะทำให้คุณภาพของแสงดีขึ้น รวมถึงการประยุกต์ใช้งานทางด้านการวัดคุณสมบัติทางพื้นผิวของตัวอย่างที่ต่างชนิดกัน เช่น แผ่นแก้ว BK7 แผ่นแกเลียมอาเซไนด์ และแผ่นทอง ซึ่งผลที่ได้จะใกล้เคียงกับในส่วนของทฤษฎี ตลอดจนถึงการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้จากการทดลอง ซึ่งจะได้กล่าวถึงเป็นหัวข้อและดับดังต่อไปนี้

### 5.1 การปรับปรุงคุณภาพของแสงที่ได้จากการมอดูเลต

ปัญหาของสัญญาณแสงที่ได้อันหนึ่งก็คือสัญญาณรบกวนความถี่สูงเนื่องจากสัญญาณคลื่นไฟฟ้าที่เกิดจากอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ที่เป็นตัวรับสัญญาณแสงที่ได้ โดยอาจทำให้ผลในการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้เมื่อทำการตรวจวัดหรือตรวจสอบไม่ถูกต้อง เพราะฉะนั้นจึงได้มีการปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณแสงที่ได้ โดยผลที่ได้เมื่อทำการปรับปรุงแล้วทำให้คุณภาพของแสงดีขึ้นดังในผลการทดลองซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 6 ซึ่งเปรียบเทียบกับกรณีไม่ได้ทำการปรับปรุง

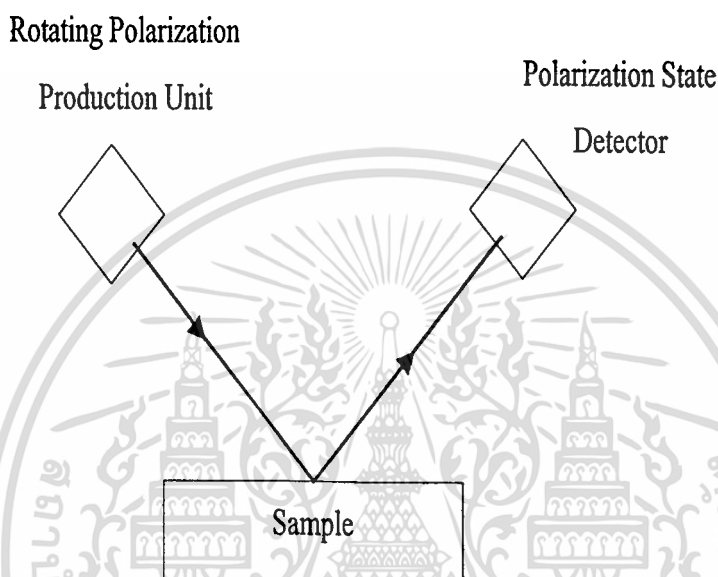
ในส่วนของปรับปรุงคุณภาพของแสง โพลารไรซ์เชิงเส้นที่ได้นั้น สามารถที่จะทำการปรับปรุงได้โดยการกำจัดสัญญาณรบกวนความถี่สูงอันเนื่องมาจากตัวรับสัญญาณแสงที่สัญญาณเอาต์พุต โดยการใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถลดสัญญาณรบกวนความถี่สูง หรือที่เรียกว่าวงจรรองความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) ซึ่งรายละเอียดของวงจรจะกล่าวถึงในส่วนของภาคผนวก ข. โดยวงจรดังกล่าวมีความถี่คutoff ประมาณ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ รับสัญญาณจาก D1 และ D2 จากรูปที่ 4.2 ที่ผ่านมาซึ่งสัญญาณตรงนี้จะมีความถี่ประมาณ 600 เฮิร์ตซ์ หลังจากผ่านวงจรอิเล็กทรอนิกส์นี้แล้วสัญญาณที่ได้ดังจะมีลักษณะดีขึ้นดังที่แสดงในผลการทดลองบทที่ 6 ซึ่งเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้ก่อนการใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์

ในการปรับปรุงในส่วนของเส้นใยแก้วนำแสงได้ทำการปรับปรุงโดยขจัดปลายของเส้นใยแก้วนำแสงให้มีมุมเอียงประมาณ 4 องศาเพื่อลดการสะท้อนเนื่องจากหน้าตัดส่วนปลายของเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนี้ไม่แตกต่างกับเมื่อยังไม่ได้ทำการขจัดปลายของเส้นใยแก้วนำแสง

## 5.2 การประยุกต์ใช้งานทางด้านการวัดค่าคุณสมบัติทางแสงของพื้นผิวตัวอย่าง

### 5.2.1 ทฤษฎีในการวัดค่า

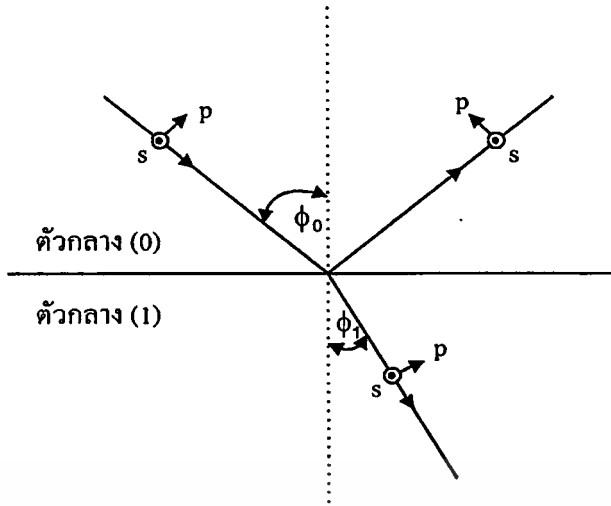
สำหรับการประยุกต์ใช้เบื้องต้น สามารถนำสัญญาณทางแสงที่ได้จากการมอดูเลตเฟสของแสงไปวัดค่าทางแสงของพื้นผิวตัวอย่าง โดยใช้เทคนิคของเอลลิปโซเมตรีแบบอาศัยการสะท้อน (Reflection Ellipsometry) ได้



รูปที่ 5.1 แสดงรูปแบบการวัดค่าทางแสงของพื้นผิวโดยใช้เทคนิคของเอลลิปโซเมตรีแบบอาศัยการสะท้อน เมื่อ Rotating Polarization Production Unit เป็นแสงที่ได้จากชุดทดลอง; Polarization State Detector เป็นตัวรับสัญญาณแสงที่ได้; Sample เป็นตัวอย่าง

ในรูปแบบการวัดนี้สามารถที่จะแสดงค่าคุณสมบัติทางพื้นผิวของตัวอย่างได้ เช่นค่าของดรรชนีหักเห สัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสง และค่าความหนาของตัวกลางทางแสงได้ ซึ่งจะใช้หลักการสะท้อนแสงจากพื้นผิวของตัวอย่างดังที่แสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป

ในรูปที่ 5.2 การสะท้อนของคลื่นแสงที่พื้นผิวระหว่างตัวกลางที่ 0 และ 1 ซึ่งมีส่วนประกอบเชิงซ้อนของค่าดรรชนีหักเหเป็น  $N_0$  และ  $N_1$  ตามลำดับ พิจารณาคลื่นที่ตกกระทบตัวกลาง 0 และสะท้อนในตัวกลางนี้ และคลื่นที่ส่งผ่านไปในตัวกลาง 1 ซึ่งมีมุมของการตกกระทบ  $\phi_0$  และมุมของการส่งผ่านเป็น  $\phi_1$  มุมทั้งสองที่ได้นี้เป็นการวัดจากแนวแกนปกติ



รูปที่ 5.2 แสดงการสะท้อนและการส่งผ่านของระนาบคลื่นแสงที่พื้นผิวระหว่างตัวกลาง (0) และตัวกลาง (1) เมื่อ  $\phi_0$  และ  $\phi_1$  เป็นมุมของการตกกระทบและหักเหตามลำดับ p และ s เป็นแสงโพลาไรซ์ในแนวขนานและตั้งฉากกับระนาบของการตกกระทบ

จากกฎของสเนลล์ นั้นจะได้ว่า มุมของการตกกระทบจะเท่ากับมุมของการสะท้อน และมุมของการตกกระทบ  $\phi_0$  และมุมของการหักเห  $\phi_1$  จะมีความสัมพันธ์โดย  $N_0 \sin \phi_0 = N_1 \sin \phi_1$  โดยทั่ว ๆ ไปถ้าลำแสงโพลาไรซ์ซึ่งสะท้อนโดยตัวกลางทางแสง แอมพลิจูดและเฟสของแสงในแนว p และ s ที่เป็นส่วนประกอบจะเปลี่ยนไป ดังนั้นถ้ากำหนดให้  $(\bar{E}_{ip}, \bar{E}_{is})$  และ  $(\bar{E}_{rp}, \bar{E}_{rs})$  แสดงส่วนประกอบของแอมพลิจูดเชิงซ้อนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าของการตกกระทบและสะท้อนของคลื่นตามลำดับ ดังนั้นสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนแสงแบบเฟรสเนล สำหรับส่วนประกอบในแนว p และ s สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\bar{E}_{rp}}{\bar{E}_{ip}} = r_p = \frac{N_1 \cos \phi_0 - N_0 \cos \phi_1}{N_1 \cos \phi_0 + N_0 \cos \phi_1} \quad (5.1)$$

และ

$$\frac{\bar{E}_{rs}}{\bar{E}_{is}} = r_s = \frac{N_1 \cos \phi_0 - N_0 \cos \phi_1}{N_1 \cos \phi_0 + N_0 \cos \phi_1} \quad (5.2)$$

เนื่องจากสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงทั้งแอมพลิจูดและเฟสสามารถเขียนได้ในรูปของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลได้ดังนี้

$$r_p = |r_p| e^{i\delta_p} \quad (5.3)$$

และ

$$r_s = |r_s| e^{i\delta_s} \quad (5.4)$$

โดยที่  $|r_p|$  และ  $|r_s|$  ให้เป็นอัตราส่วนของแอมพลิจูดของการสะท้อนของแสงที่กระทบของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าเมื่อลำแสงเป็นโพลาไรซ์ขนาน (p) และตั้งฉาก (s) กับระนาบของการตกกระทบตามลำดับ และ  $\delta_p$ ,  $\delta_s$  แสดงเฟสที่ต่างไป สำหรับสนามไฟฟ้าที่ขนานและตั้งฉากกับระนาบของการตกกระทบตามลำดับ

ความสัมพันธ์ของ  $r_p$  และ  $r_s$  สามารถเขียนได้ในเทอมของ  $\rho$  และเอลลิปโซเมตริกพารามิเตอร์  $\Psi$  และ  $\Delta$  ได้โดย

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} \equiv \tan \psi \cdot e^{i\Delta} \quad (5.5)$$

จากสมการ (5.3) และ (5.4) นั้นจะได้

$$\tan \psi = \frac{|r_p|}{|r_s|} \quad (5.6)$$

$$\Delta = \delta_p - \delta_s \quad (5.7)$$

แทนค่า  $r_p$  และ  $r_s$  ในสมการ (5.5) โดยใช้ค่าจากสมการ (5.3) และ (5.4) และใช้กฎของสเนลล์ จะได้สมการแสดงอัตราส่วนของค่าครรชนหักเหของตัวกลางที่ 1 ( $N_1$ ) ตัวกลางที่ 0 ( $N_0$ ) ในเทอมของ  $\rho$  และ  $\phi_0$  ได้เป็น

$$\frac{N_1}{N_0} = \sin \phi_0 \left[ 1 + \left( \frac{1-\rho}{1+\rho} \right)^2 \tan^2 \phi_0 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (5.10) แสดงให้เห็นว่าค่าครรชนีหักเหเชิงซ้อนของตัวกลาง 1 สามารถหาได้ ถ้ารู้ค่าครรชนีหักเหของตัวกลาง 0 (ตัวกลางที่แสงตกกระทบ) และอัตราส่วนเอลิปโซเมติก  $\rho$  ณ มุมตกกระทบ  $\phi_0$

เนื่องจากค่าครรชนีหักเหของตัวกลางที่ 1 เป็นจำนวนเชิงซ้อนจึงสามารถเขียนได้เป็น  $N_1 = n_1 - ik_1$  โดยที่  $n_1$  คือ ค่าครรชนีหักเหในตัวกลางที่ 1 และ  $k_1$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนทางแสงของตัวกลางที่ 1 ซึ่งหาได้จาก

$$n_1 = N_0 \sin \phi_0 (a^2 + b^2)^{\frac{1}{4}} \cos \kappa \quad (5.11)$$

และส่วนจินตภาพสามารถหาได้จาก

$$k_1 = N_0 \sin \phi_0 (a^2 + b^2)^{\frac{1}{4}} \sin \kappa \quad (5.12)$$

เมื่อ

$$a = 1 + \tan^2 \phi_0 \left\{ \frac{(1 - \tan^2 \psi)^2 - 4 \tan^2 \psi \sin^2 \Delta}{(1 + \tan^2 \psi + 2 \cos \Delta \tan \psi)^2} \right\} \quad (5.13)$$

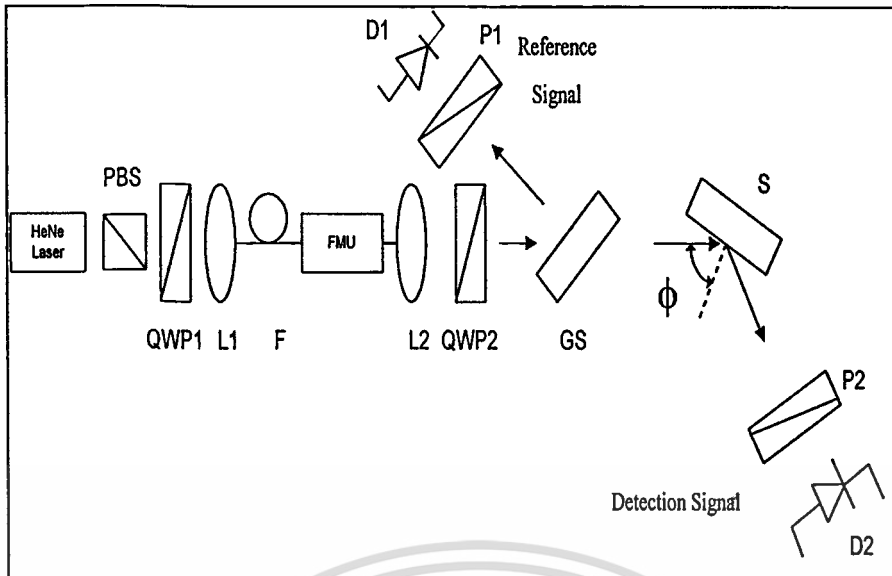
$$b = 1 + \tan^2 \phi_0 \left\{ \frac{4(1 - \tan^2 \psi)(\tan \psi \sin \Delta)}{(1 + \tan^2 \psi + 2 \cos \Delta \tan \psi)^2} \right\} \quad (5.14)$$

และ

$$\kappa = \frac{1}{2} \left\{ \tan^{-1} \left( -\frac{b}{a} \right) \right\} \quad (5.15)$$

ดังนั้นในการทดลองนี้จึงดำเนินการวัดสัญญาณที่สะท้อนจากพื้นผิวตัวอย่างแล้วทำการเก็บค่า  $\Psi$  และ  $\Delta$  ที่มุมตกกระทบหนึ่ง เพื่อนำไปคำนวณหาค่า  $N_1$  ต่อไป

ในการนำชุดทดลองไปวัดค่าคุณสมบัติทางแสงของพื้นผิวตัวอย่างจะเริ่มจากการจัดอุปกรณ์ในการมอดูเลตเฟสของแสงตามรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงการจัดชุดการทดลองการมอดูเลตเฟสของแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางทางแสงสำหรับการวัดทางแสง P1,2 : Polarizers ; L1,2 : Lenses ; QWP1,2 : Quarter-Wave Plates; Gs : Glass Slide ; D1,2 : Detectors ; FMU : Fiber Modulation Unit ; F : HiBi Fiber ; S : Sample ; PBS : Polarizing Beamsplitter

จากรูปที่ 5.3 ส่วนที่เพิ่มเติมสำหรับการนำสัญญาณเอาต์พุตจากชุดทดลองการมอดูเลตเฟสของแสงโดยมีเส้นใยแก้วนำแสงไปประยุกต์ใช้ก็คือ การใช้แผ่นแก้วสไลด์บาง (GS) แยกลำแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นส่วนหนึ่งออกจากลำแสงหลักเพื่อนำไปใช้เป็นลำแสงสำหรับอ้างอิง โดยจัดให้แผ่นแก้วสไลด์ทำมุมประมาณ 3 องศากับลำแสงที่ตกกระทบ โดยแสงที่สะท้อนจากแผ่นแก้วสไลด์จัดให้ผ่านโพลาไรซ์เซอร์ (P1) ไปยังอุปกรณ์รับแสงตัวที่ 1 (D1) โดยสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์รับแสงตัวที่ 1 กำหนดให้เป็นสัญญาณที่ใช้อ้างอิง ส่วนลำแสงหลักที่ทะลุผ่านแผ่นแก้วสไลด์บางไปยังพื้นผิวของตัวอย่าง (Sample) ซึ่งจัดให้มีมุมตกกระทบกับพื้นผิว ( $\phi$ ) ที่เปลี่ยนแปลงไปจาก 0-90 องศา โดยแสงที่สะท้อนจากพื้นผิวของตัวอย่างผ่านไปยังโพลาไรซ์เซอร์ตัวที่ 2 (P2) ซึ่งจัดให้ P2 ทำมุม 45 องศา กับระนาบของการตกกระทบไปยังอุปกรณ์รับแสงตัวที่ 2 (D2) โดยสัญญาณที่ได้จาก D2 นี้กำหนดให้เป็นสัญญาณตรวจสอบ การวิเคราะห์สามารถดำเนินการได้ดังนี้ จากสมการที่ (4.6) สัญญาณเอาต์พุต  $\vec{E}_1$  เขียนได้เป็น

$$\vec{E}_1 = \begin{bmatrix} \cos \phi' \\ \sin \phi' \end{bmatrix} E_0 e^{i\epsilon} \quad (5.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\phi' = \frac{1}{2}\left(\Delta + \frac{\pi}{2}\right)$  และ  $\varepsilon = \omega_0 t + \gamma$  รูปแบบโจนส์เมตริกซ์ของตัวอย่างเขียนได้โดย

$$\begin{aligned}\bar{E}_2 &= S\bar{E}_1 \\ &= \begin{bmatrix} r_p \cos \phi' \\ r_s \sin \phi' \end{bmatrix} E_0 e^{i\varepsilon}\end{aligned}\quad (5.17)$$

เมื่อโจนส์เมตริกซ์ของตัวอย่าง (S) เขียนได้โดยซิงเกอร์ (Singher) [13]

$$S = \begin{bmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix}\quad (5.18)$$

ดังนั้นเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างไปยังโพลาไรซ์เซอร์ที่ทำมุม  $\theta$  สัมพันธ์กับระนาบของการตกกระทบสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\bar{E}_{3,\theta} &= P_\theta \bar{E}_2 \\ &= \begin{bmatrix} r_p \cos \phi' \cos^2 \theta - r_s \sin \phi' \cos \theta \sin \theta \\ r_p \cos \phi' \cos \theta \sin \theta - r_s \sin \phi' \sin^2 \theta \end{bmatrix} E_0 e^{i\varepsilon}\end{aligned}\quad (5.19)$$

เมื่อโพลาไรซ์เซอร์ทำมุม 45 องศากับระนาบของการตกกระทบจะเขียนได้เป็น

$$\bar{E}_{3,45^\circ} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} (r_p \cos \phi' - r_s \sin \phi') \frac{E_0}{2} e^{i\varepsilon}\quad (5.20)$$

ดังนั้นความเข้มของแสงที่ได้จากอุปกรณ์รับแสง (D2) คือ

$$\begin{aligned}I_{45} &= (\bar{E}_{3,45^\circ})(\bar{E}_{3,45^\circ})^* \\ I_{45} &= \frac{I_0}{2} \left[ R_p \cos^2 \phi' + R_s \sin^2 \phi' - \sqrt{R_p R_s} \sin 2\phi' \cos \Delta \right]\end{aligned}\quad (5.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเกตว่าเมื่อแสงที่ได้จากการมอดูเลตขนานกับระนาบของการตกกระทบความเข้มของแสงที่อุปกรณ์รับแสงจะได้เป็น

$$I_{\text{Parallel}} = (\vec{E}_{3,45,\phi'=0})(\vec{E}_{3,45,\phi'=0})^* = \frac{I_0 R_p}{2} \quad (5.22)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อแสงตั้งฉากกับระนาบของการตกกระทบ ความเข้มของแสงจะได้เป็น

$$I_{\text{Perpendicular}} = \left( \vec{E}_{3,45,\phi'=\frac{\pi}{2}} \right) \left( \vec{E}_{3,45,\phi'=\frac{\pi}{2}} \right)^* = \frac{I_0 R_s}{2} \quad (5.23)$$

แสงที่ได้เมื่อทำมุมกับระนาบของการตกกระทบเป็นมุม 45 องศาเราสามารถกำหนดได้โดย

$$I_{45^\circ} = \left( \vec{E}_{3,45,\phi'=\frac{\pi}{4}} \right) \left( \vec{E}_{3,45,\phi'=\frac{\pi}{4}} \right)^* \\ = \frac{I_0}{2} \left( \frac{R_p}{2} + \frac{R_s}{2} - \sqrt{R_p R_s} \cos \Delta \right) \quad (5.24)$$

เมื่อ  $I_0$  เป็นค่าคงที่  $R_p$  และ  $R_s$  เป็นความเข้มของแสงสะท้อนแบบเฟรสเนลโดยที่

$$R_p = |r_p|^2 \quad (5.25)$$

และ

$$R_s = |r_s|^2 \quad (5.26)$$

และ  $\phi'$  เป็นมุมอซิมุทของแสงโพลาไรซ์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของแสงที่ตกกระทบโดยอาศัยสัญญาณอ้างอิง ซึ่งทำให้สามารถหาค่า  $R_p$ ,  $R_s$  เพื่อนำไปคำนวณค่า  $\psi$  และค่า  $\Delta$  สำหรับพื้นผิวตัวอย่างแต่ละชนิดได้

### 5.2.2 การทดลองในการวัดค่าพื้นผิวของตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ได้นำชุดมอดูเลตเฟสของแสงมาทำการวัดค่าพื้นผิวของตัวอย่างซึ่งมีการจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งจัดให้มีการวัดค่า  $\Psi$  และ  $\Delta$  ของพื้นผิวตัวอย่างที่มีมุมตกกระทบค่าต่าง ๆ โดยเริ่มจากมุม 15 องศาจนถึงมุมที่ 85 องศาโดยเพิ่มขึ้นทีละ 5 องศาโดยตัวอย่างที่นำมาใช้แต่ละตัว

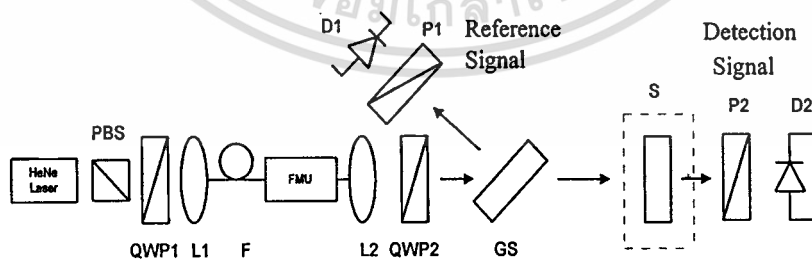
จะมีคุณสมบัติทางพื้นผิวที่แตกต่างกันในการดูดกลืนแสงที่  $\lambda$  เท่ากับ 632.8 นาโนเมตร ตัวอย่างแรกคือ BK7 ซึ่งเป็นแก้วที่มีคุณสมบัติไม่ดูดกลืนแสง และมีค่าดัชนีหักเหเป็น  $1.51 - i0.00$  [11] (คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของตัวอย่างจะแสดงได้ด้วยค่าในส่วนของจำนวนจินตภาพ ส่วนค่าดัชนีหักเหจะแสดงในส่วนที่เป็นจำนวนจริง) เนื่องจาก BK7 เป็นแก้วที่ทราบค่าดัชนีหักเหและได้ถูกออกแบบมาให้ผิวด้านหนึ่งเอียง เพื่อลดการสะท้อนกลับของแสงจากพื้นผิวด้านล่างอันอาจจะถูกกลับมาแนวเดียวกับผิวด้านบนได้จึงเหมาะที่จะนำมาเป็นตัวอย่างสำหรับการตรวจสอบค่า ส่วนแผ่นแกเลียมอาเซไนด์ (GaAs) นั้นเป็นสารกึ่งตัวนำมีค่าการดูดกลืนทางแสงต่ำ ซึ่งค่าดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงคือ  $3.86 - i0.20$  [11] จึงมีประโยชน์ในการทำอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเช่น ชิฟเฟเซอร์ และทอง (Au) ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงสูงซึ่งมีค่าดัชนีหักเหคือ  $0.18 - i3.10$  [11]

ในการคำนวณหาค่า  $R_p$  และ  $R_s$  จากผลการทดลองที่ได้สามารถกระทำได้จากการนำสัญญาณตรวจสอบและสัญญาณอ้างอิง ที่ได้มาหาค่าการเปลี่ยนแปลงของ  $I_p$  และ  $I_s$  โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยหลักการวิเคราะห์สัญญาณและสัญญาณที่ได้รับจากการมอดูเลตดังแสดงในหัวข้อต่อไป

### 5.3 การประยุกต์ใช้ในการวัดค่าการเลี้ยวเบนเฟสและการหาแกนของผลึกหน่วงเฟส

#### 5.3.1 ทฤษฎีในการวัดค่า

ในหัวข้อที่แล้วเป็นการกล่าวถึงการวัดค่าของตัวอย่างโดยใช้เทคนิคของเอลลิปโซเมตรีโดยการสะท้อนในการวัดค่า แต่ในบทนี้จะใช้เทคนิคของเอลลิปโซเมตรีในแบบของการส่งผ่านทางแสง (Transmission Ellipsometry) ในการวัดค่าการเลี้ยวเบนเฟสของตัวอย่างมีรูปแบบของการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แสดงชุดทดลองการวัดค่าการเลี้ยวเบนเฟสของตัวอย่างโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านทางแสง

โดยที่ P1,2 : Polarizers ; L1,2 : Lenses ; QWP1,2 : Quarter-Wave Plates ; Gs : Glass

Slide ; D1,2 : Detectors ; FMU : Fiber Modulation Unit ; F : HiBi Fiber ; S : Sample ;

PBS : Polarizing Beamsplitter .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูปที่ 5.4 ผลึกหน่วงเฟสตัวอย่าง S ที่ต้องการตรวจวัดจะถูกจัดวางอยู่ระหว่างแผ่น แก้วสไลด์บาง GS และ โพลาริเซอร์ P2 โดย P2 ถูกจัดให้ทำมุม 45 องศากับระนาบของการส่งผ่าน โดยที่ระนาบของการส่งผ่านถูกกำหนดโดยสัญญาณอ้างอิง จากสมการที่ (4.6) สัญญาณเอาต์พุต  $\vec{E}_1$  เขียนได้เป็น

$$\vec{E}_1 = \begin{bmatrix} \cos \phi' \\ \sin \phi' \end{bmatrix} E_0 e^{i\epsilon} \quad (5.27)$$

เมื่อ  $\phi' = \frac{1}{2} \left( \Delta + \frac{\pi}{2} \right)$  และ  $\epsilon = \omega_0 t + \gamma$  โดยที่ โจนส์เวกเตอร์ของลำแสงซึ่งผ่านตัวอย่าง (S) ออกมาเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} \vec{E}_2 &= S \vec{E}_1 \\ &= \begin{bmatrix} t_p \cos \phi' \\ t_s \sin \phi' \end{bmatrix} E_0 e^{i\epsilon} \end{aligned} \quad (5.28)$$

เมื่อ โจนส์เมตริกซ์ของ S เขียนได้โดยซิงเกอร์ (Singher) [13]

$$S = \begin{bmatrix} t_p & 0 \\ 0 & t_s \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

เมื่อ  $t_p$  และ  $t_s$  คือสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงแบบเฟรสเนลในแนวขนานและตั้งฉากกับระนาบของการส่งผ่าน ดังนั้นเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างไปยัง โพลาริเซอร์ที่ทำมุม  $\theta$  สัมพันธ์กับระนาบของการส่งผ่านสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \vec{E}_{3,\theta} &= P_\theta \vec{E}_2 \\ &= \begin{bmatrix} t_p \cos \phi' \cos^2 \theta - t_s \sin \phi' \cos \theta \sin \theta \\ t_p \cos \phi' \cos \theta \sin \theta - t_s \sin \phi' \sin^2 \theta \end{bmatrix} E_0 e^{i\epsilon} \end{aligned} \quad (5.30)$$

เมื่อ โพลาริเซอร์ทำมุม 45 องศากับระนาบของการส่งผ่านจะเขียนได้เป็น

$$\vec{E}_{3,45^\circ} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} (t_p \cos \phi' - t_s \sin \phi') \frac{E_0}{2} e^{i\epsilon} \quad (5.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นความเข้มของแสงที่ได้จากอุปกรณ์รับแสง (D2) คือ

$$I_{45} = (\vec{E}_{3,45^\circ})(\vec{E}_{3,45^\circ})^* \\ I_{45} = \frac{I_0}{2} [T_p \cos^2 \phi' + T_s \sin^2 \phi' - \sqrt{T_p T_s} \sin 2\phi' \cos \Delta] \quad (5.32)$$

สังเกตว่าเมื่อแสงที่ได้จากการมอดูเลตขนานกับระนาบของการส่งผ่านความเข้มของแสงที่อุปกรณ์รับแสงจะได้เป็น

$$I_{\text{Parallel}} = (\vec{E}_{3,45,\phi'=0})(\vec{E}_{3,45,\phi'=0})^* = \frac{I_0 T_p}{2} \quad (5.33)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อแสงตั้งฉากกับระนาบของการส่งผ่านความเข้มของแสงจะได้เป็น

$$I_{\text{Perpendicular}} = \left( \vec{E}_{3,45,\phi'=\frac{\pi}{2}} \right) \left( \vec{E}_{3,45,\phi'=\frac{\pi}{2}} \right)^* = \frac{I_0 T_s}{2} \quad (5.34)$$

แสงที่ได้เมื่อทำมุมกับระนาบของการส่งผ่านเป็นมุม 45 องศาเราสามารถกำหนดได้โดย

$$I_{45^\circ} = \left( \vec{E}_{3,45,\phi'=\frac{\pi}{4}} \right) \left( \vec{E}_{3,45,\phi'=\frac{\pi}{4}} \right)^* \\ = \frac{I_0}{2} \left( \frac{T_p}{2} + \frac{T_s}{2} - \sqrt{T_p T_s} \cos \Delta \right) \quad (5.35)$$

เมื่อ  $I_0$  เป็นค่าคงที่  $T_p$  และ  $T_s$  เป็นความเข้มของแสงในการส่งผ่านแบบเฟรสเนล โดยที่

$$T_p = |t_p|^2 \quad (5.36)$$

และ

$$T_s = |t_s|^2 \quad (5.37)$$

และ  $\phi'$  เป็นมุมอิมิตของแสงโพลาไรซ์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของแสงที่ตกกระทบ โดยอาศัยสัญลักษณ์อ้างอิง ทำให้สามารถหาค่า  $T_p$ ,  $T_s$  ซึ่งนำไปคำนวณค่า  $\Delta$  สำหรับตัวอย่างแต่ละชนิดได้

### 5.3.2 การทดลองหาค่าการเลื่อนเฟสของผลึกหน่วงเฟส

จัดชุดการทดลองวัดค่าการเลื่อนเฟสของผลึกหน่วงเฟสชนิดหนึ่งในช่วงคลื่นดังรูปที่ 5.4 โดยในส่วนของตัวอย่าง (S) นั้นใส่ QWP ซึ่งเป็นผลึกหน่วงเฟสที่ต้องการทดสอบลงไปและจัดให้แนวแกนของ QWP ทำมุมขนานกับระนาบของการส่งผ่าน จากนั้นทำการปรับมุมของ P2 ไปเป็นมุม 45 องศาที่ระนาบของการส่งผ่าน

ในส่วนต่อมาจะเป็นการทดลองวัดค่าผลึกหน่วงเฟสชนิดครึ่งคลื่น HWP สามารถจัดชุดทดลองได้ดังรูปที่ 5.4 โดยในส่วนของตัวอย่าง (S) นั้นนำเอาผลึกหน่วงเฟส QWP สองอันมาจัดวางโดยให้แกนเร็วของ QWP อันที่ 1 และอันที่ 2 ขนานกัน และจัดให้แนวแกนของ QWP ทั้งสองขนานกับระนาบของการส่งผ่าน จากนั้นทำการจัดให้ P2 ทำมุม 45 องศาที่ระนาบของการส่งผ่านจากการนำ QWP สองอันมาจัดวางให้มีแนวเร็วขนานกันนั้นจะทำให้ได้เป็นผลึกหน่วงเฟสชนิดครึ่งคลื่น สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$e^{i\frac{\pi}{2}} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} = e^{i\frac{\pi}{4}} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{vmatrix} \cdot e^{i\frac{\pi}{4}} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{vmatrix} \quad (5.38)$$

โดยที่โจนส์เมตริกซ์ทางด้านซ้ายมือของสมการคือเมตริกซ์ที่ใช้แทน HWP

ในส่วนต่อมาจะเป็นการทดลองวัดค่าผลึกหน่วงเฟสชนิดเต็มคลื่น FWP สามารถจัดชุดทดลองได้เหมือนกับการทดลองวัดค่า HWP แต่ต่างกันที่แกนเร็วของ QWP ทั้งสองนั้นตั้งฉากกันจากการนำ QWP สองอันมาจัดวางให้มีแนวเร็วตั้งฉากกันนั้นจะทำให้ได้เป็นผลึกหน่วงเฟสชนิดเต็มคลื่น สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

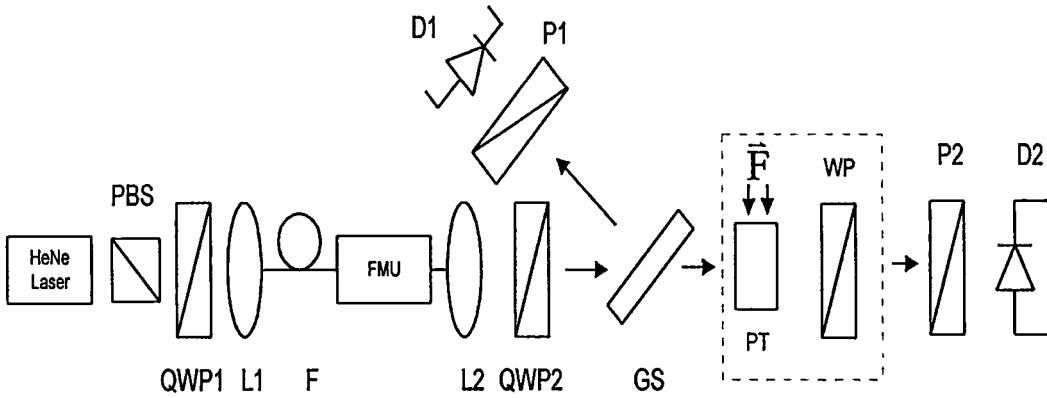
$$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = e^{i\frac{\pi}{4}} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{vmatrix} \cdot e^{-i\frac{\pi}{4}} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{vmatrix} \quad (5.39)$$

โดยที่โจนส์เมตริกซ์ทางด้านซ้ายมือของสมการคือเมตริกซ์ที่ใช้แทน FWP

### 5.3.3 การทดลองหาแกนเร็วและแกนช้าของผลึกหน่วงเฟส

ในการทดลองหาแกนเร็วและแกนช้าของผลึกหน่วงเฟสสามารถจัดรูปแบบของการทดลองได้ดังรูปที่ 5.5 ซึ่งมีการจัดให้แกนใดแกนหนึ่งของผลึกหน่วงเฟสขนานกับแนวแรงที่กดลงบนวัสดุโฟโตอีลาสติก ( Photoelastic Material : PT) และจัดให้ P2 ทำมุม 45 องศาที่ระนาบของการส่งผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 แสดงการจัดชุดทดลองในการวัดหาแกนเร็วและแกนช้าของผลึกหน่วงเฟส โดยที่ P1,2 :

Polarizers ; L1,2 : Lenses ; QWP1,2 : Quarter-Wave Plates; Gs : Glass Slide ; D1,2 :

Detectors ; FMU : Fiber Modulation Unit ; F : HiBi Fiber ; PBS : Polarizing

Beamsplitter ; PT : Photoelastic Material ;  $\vec{F}$  : Force ; WP : Wave Plate.

จากรูปที่ 5.5 มีการใช้ตัวโฟโต้เอลาสติกเป็นตัวช่วยในการตรวจสอบ ซึ่งหลักการของตัวโฟโต้เอลาสติกคือเมื่อให้แรง  $\vec{F}$  ไปกระทำลงบนตัวของวัสดุจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ไบร์ฟรินเจนซ์ขึ้นในเนื้อของวัสดุโดยแกนเร็วที่เกิดในวัสดุมีทิศทางกับแนวแกนของแรง ความสัมพันธ์ของค่าความหน่วงสมบูรณ์ (Absolute Retardation) ของแสงในแกนที่ขนานกับแนวแรงที่ใช้กดและแกนที่ตั้งฉากกับแนวแรงที่ใช้กดวัสดุซึ่งกำหนดให้เป็นแกน  $x$  และ  $y$  ตามลำดับในเทอมของแรงเค้นแสดงได้ดังนี้

$$R_x = (C_1\sigma_x + C_2\sigma_y)d \quad (5.40)$$

และ

$$R_y = (C_2\sigma_x + C_1\sigma_y)d \quad (5.41)$$

และค่าความหน่วงสัมพันธ์ (Relative Retardation) เขียนได้คือ

$$R = R_x - R_y = (C_1 - C_2)(\sigma_x - \sigma_y)d \quad (5.42)$$

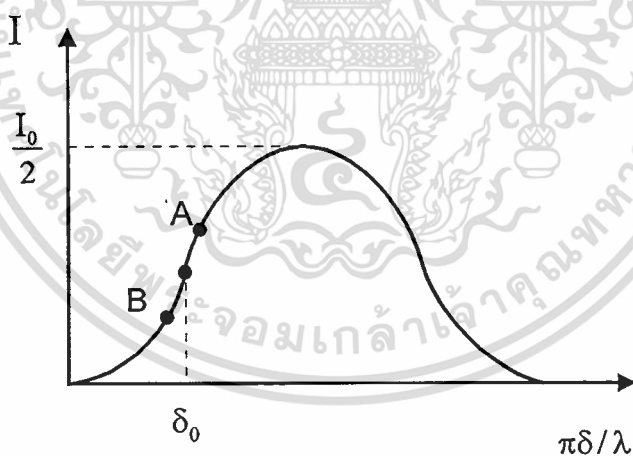
เมื่อกำหนดให้  $C_\sigma = C_1 - C_2$  ดังนั้น

$$R = C_{\sigma}(\sigma_x - \sigma_y)d \quad (5.43)$$

เมื่อ  $C_{\sigma}$  คือสัมประสิทธิ์ของแสงเมื่อได้รับแรงเค้น (Stress Optic Coefficient)  $C_1$  และ  $C_2$  คือสัมประสิทธิ์ของโฟโตรีลาสติก (Photoelastic Coefficient) และ  $d$  เป็นความหนาของวัสดุ ความสัมพันธ์ของค่าความหน่วงทางแสงโดยองค์ประกอบทั้งสอง (แนวแกน  $x$  และ  $y$ ) ที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ไบร์ฟรินเจนซ์จะเป็นค่าความแตกต่างทางเดินของแสง (Optical Path Difference) หรือเปลี่ยนแปลงเฟสของแสง เมื่อแสงทั้งสององค์ประกอบแทรกสอดกันดังนั้นจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงกับเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากแรงเค้นที่กระทำซึ่งเขียนได้ดังนี้ (รายละเอียดจะกล่าวถึงในภาคผนวก ก.)

$$I = \frac{I_0}{2} \sin^2\left(\frac{\pi\delta}{\lambda}\right) \quad (5.44)$$

เมื่อ  $\delta$  เป็นเฟสของแสงที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับแรงกระทำ  $I$  คือความเข้มของแสง  $I_0$  เป็นค่าคงที่ สมการที่ (5.44) สามารถนำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงกับเฟสที่เปลี่ยนได้ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 รูปแสดงความเข้มของแสงเทียบกับเฟสของแสงที่เปลี่ยนไปเมื่อมีแรงกระทำกับโฟโตรีลาสติก

จากรูปที่ 5.6 เมื่อกำหนดให้  $\delta_0$  เป็นตำแหน่งเฟสของแสงเนื่องจากแรงเค้นเริ่มต้นเพื่อนำมาเป็นตำแหน่งอ้างอิงที่ใช้ในการพิจารณาความเข้มของแสง กล่าวคือถ้าพบว่าเฟสมีค่าเพิ่มขึ้นไปทางจุด A จะพบว่าความเข้มของแสงเปลี่ยนไปเป็นมากขึ้น และถ้าเฟสมีค่าลดลงไปทางจุด B จะพบว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มของแสงลดลง จากหลักการตรงนี้จะเห็นว่าถ้านำแกนเร็วของผลึกหน่วงเฟสมาวางขนานกับแนวแรงกดวัสดุโฟโต้อิลาสติก ซึ่งมีการจัดวางอุปกรณ์ดังรูปที่ 5.5 จะทำให้เฟสของแสงเปลี่ยนแปลงไปในทางที่มากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของเฟส ซึ่งจะสังเกตได้ว่าความเข้มของแสงมีค่ามากขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อนำผลึกหน่วงเฟสมาวางให้แกนเร็วตั้งฉากกับแกนเร็วของวัสดุโฟโต้อิลาสติกจะทำให้เฟสของแสงลดลงเนื่องจากการหักล้างกันของเฟส ซึ่งมีผลทำให้ความเข้มของแสงลดลง ดังในการทดลองทำให้สามารถที่จะบอกได้ว่าถ้าแสงมีความเข้มเพิ่มขึ้นแกนของผลึกหน่วงเฟสที่ขนานกับแนวแรงเป็นแกนเร็ว ในทำนองเดียวกันถ้าได้ความเข้มของแสงลดลงแกนของผลึกหน่วงเฟสที่ขนานกับแนวแรงจะเป็นแกนช้า

ในการทดลองซึ่งจัดชุดทดลองดังรูปที่ 5.5 โดยจัดให้จัดให้ P2 ทำมุม 45 องศาับระนาบของการส่งผ่าน จากนั้นทำการกดวัสดุโฟโต้อิลาสติกด้วยแรงเล็กน้อยสังเกตความเข้มแสงที่ได้จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสัญญาณอ้างอิง (ความเข้มของแสงในตำแหน่งที่มีการกดวัสดุโฟโต้อิลาสติกนี้จะใช้เป็นตัวเปรียบเทียบเมื่อนำผลึกหน่วงเฟสมาวัดค่า) จากนั้นนำผลึกหน่วงเฟสซึ่งใช้เป็นตัวช่วยในการหาแกนเร็วและแกนช้าซึ่งเป็นชนิดครึ่งคลื่นทำมาจากผลึกควออตซ์ช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งาน 632.8 นาโนเมตรมาวางระหว่างวัสดุโฟโต้อิลาสติกกับ P2 โดยจัดให้แนวแกนของผลึกหน่วงเฟสที่ขนานกับรอยบอกตำแหน่งแกนดังแสดงในรูปที่ 5.7 ให้วางขนานกับแนวแรงที่ใช้กดวัสดุโฟโต้อิลาสติกจากนั้นอ่านค่าความเข้มแสงที่ได้แล้วนำไปเปรียบเทียบกับคอนที่ยังไม่ใส่ผลึกหน่วงเฟสตัวอย่าง ในทำนองเดียวกันจัดให้แนวแกนของผลึกหน่วงเฟสซึ่งตั้งฉากกับรอยบอกตำแหน่งแกน ให้วางขนานกับแนวแรงที่ใช้กดวัสดุโฟโต้อิลาสติกจากนั้นนำค่าความเข้มของแสงที่ได้ไปเปรียบเทียบกับคอนที่ยังไม่ใส่ผลึกหน่วงเฟสตัวอย่าง ซึ่งผลจากการเปรียบเทียบถ้าแนวแกนใดของผลึกหน่วงเฟสตัวอย่างเมื่อวางขนานกับแนวแรงกดแล้วทำให้ความเข้มของแสงเพิ่มขึ้นจะทำให้บอกได้ว่าแกนนั้นเป็นแกนเร็วและถ้าความเข้มของแสงลดลงจะบอกได้ว่าเป็นแกนช้า



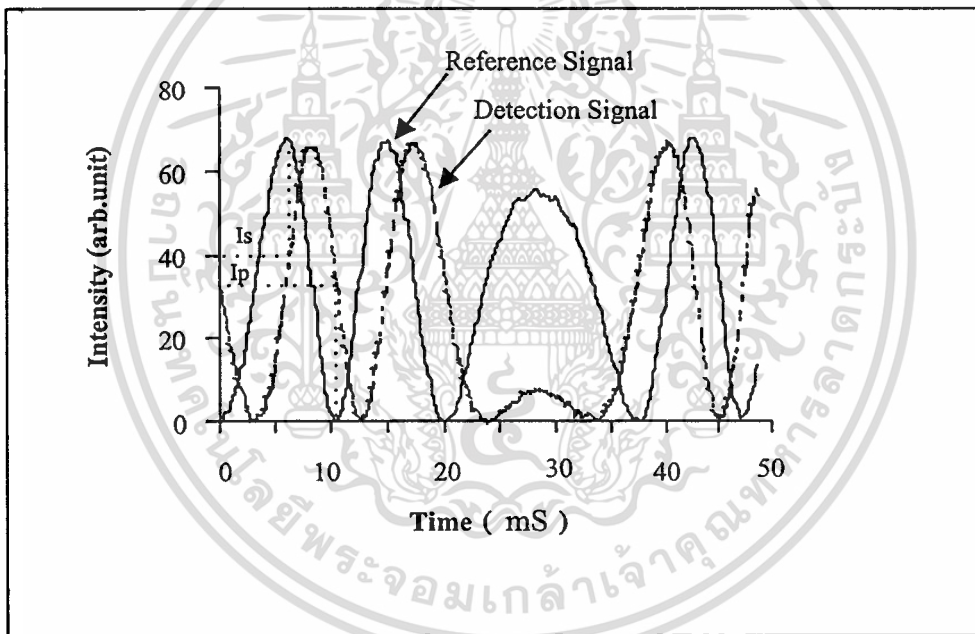
รูปที่ 5.7 แสดงรอยบอกตำแหน่งแกนของผลึกหน่วงเฟสที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 การวิเคราะห์สัญญาณที่ได้จากการทดลอง

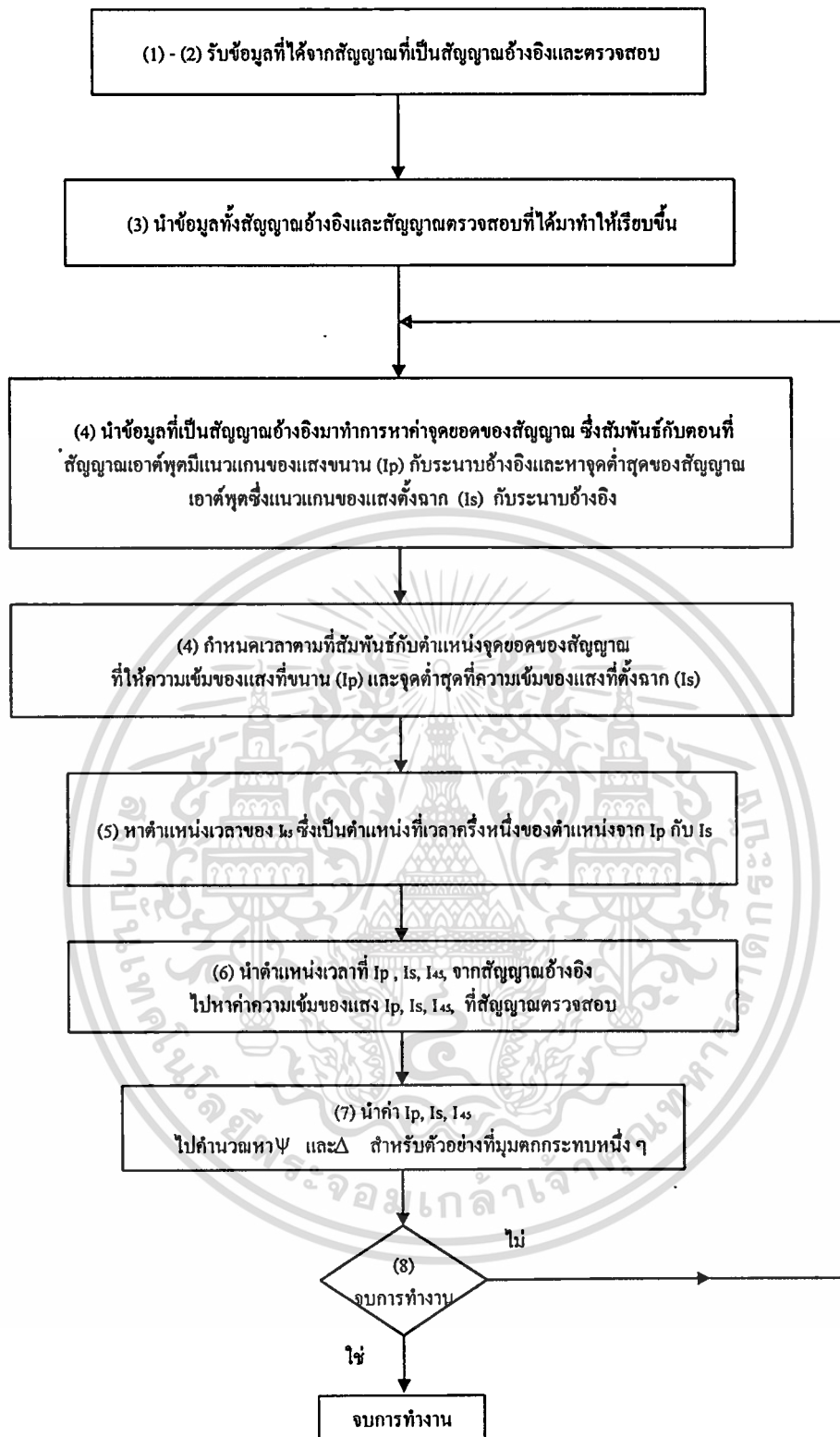
ในการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้นี้จะเป็นการวิเคราะห์จากความเข้มของแสงที่ได้ออกมาของชุดทดลอง ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์ที่ความเข้มของแสงในแนวนานกับแกนอ้างอิง  $I_p$  และความเข้มของแสงในแนวตั้งฉากกับแกนอ้างอิง  $I_s$  และความเข้มของแสงที่ทำมุม 45 องศา กับแนวแกนอ้างอิง  $I_{45}$  โดยการนำสัญญาณที่ได้จากโฟโตไดโอดทั้งสองที่เป็นสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณตรวจสอบ ซึ่งเป็นสัญญาณแอนะล็อกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยใช้การ์ดแปลงสัญญาณก่อน (A/D Card) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้อุปกรณ์สำเร็จต่อเข้าไปในตัวคอมพิวเตอร์ (ดูในภาคผนวก ข) มีความละเอียด 8 บิต เวลาในการแปลงสัญญาณ (Conversion Time) 100  $\mu$ s

ในการคำนวณหาค่า  $R_p$  และ  $R_s$  จากการทดลองที่ได้สามารถทำได้โดยการนำสัญญาณที่แปลงเป็นดิจิทัลแล้วของสัญญาณอ้างอิงมาทำการหาค่าเวลาที่สัมพันธ์กับ  $I_p$  และ  $I_s$  ในสัญญาณที่เป็นสัญญาณตรวจสอบ โดยการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้นี้แสดงในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 แสดงหลักการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้รับจากการทดลองที่เป็นสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณตรวจสอบ โดยใช้คอมพิวเตอร์ โดยที่ Reference Signal: สัญญาณอ้างอิง; Detection Signal: สัญญาณตรวจสอบ

ในการนำสัญญาณไปวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์นี้จะมีรูปแบบการโปรแกรมเป็นขั้นตอนต่าง ๆ โดยรายละเอียดของขั้นตอนต่าง ๆ จะแสดงได้ดังในรูปที่ 5.9 ดังนี้



รูปที่ 5.9 แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการหาค่าของ  $I_p$ ,  $I_s$ ,  $I_{4s}$

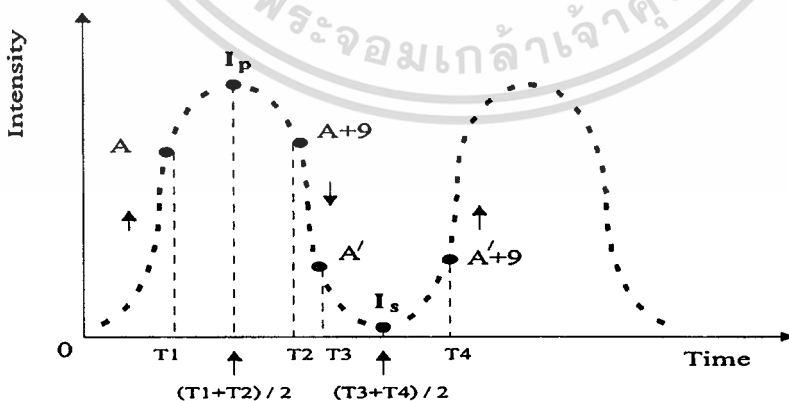
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งแต่ละขั้นตอนสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

1. เริ่มการทำงานของโปรแกรม
2. นำสัญญาณที่ได้จากสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณตรวจสอบเข้ามาเก็บในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์
3. นำข้อมูลทั้งสองมาทำให้เรียบขึ้น โดยนำข้อมูลมาทำการหาค่าเฉลี่ยของความเข้มแสง ถ้า  $I_r[i]$  กำหนดให้เป็นความเข้มของแสงที่มีครรชนิษฐ์  $i$  และความเข้มของแสงที่นำมาเฉลี่ย  $n$  จุด เขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้  $\frac{1}{n} \left[ \sum_{j=i}^{i+n} I_r[j] \right]$  ในโปรแกรมนี้อ้างอิง  $n$  เท่ากับ 3 และ  $j$  เป็นลำดับของจุดที่ทำการเฉลี่ย 1,2,3,.....
4. นำข้อมูลที่เป็นสัญญาณอ้างอิงที่ทำให้เรียบแล้วมาทำการหาค่าจุดยอดของสัญญาณ ซึ่งสัมพันธ์กับสัญญาณเอาต์พุตที่มีแนวแกนของแสงขนาน ( $I_p$ ) และหาจุดต่ำสุดของสัญญาณซึ่งสัมพันธ์กับสัญญาณเอาต์พุตที่มีแนวแกนของแสงตั้งฉาก ( $I_s$ )

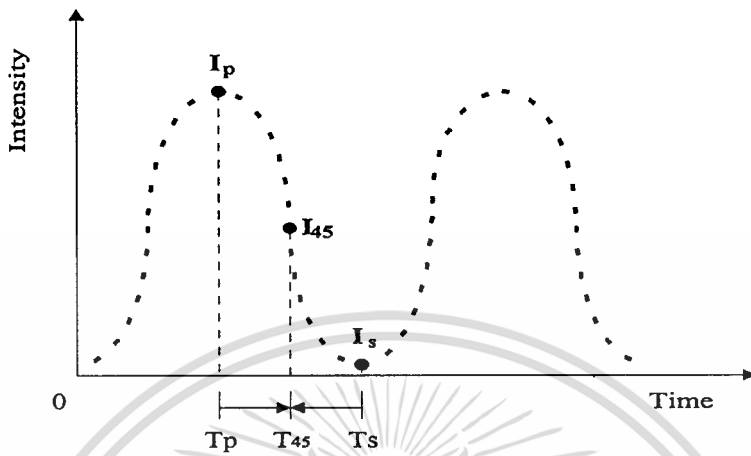
การหาจุดยอดของสัญญาณสามารถทำได้โดยเลือกจุดของสัญญาณที่ติดกันอยู่ 9 จุดพิจารณา รูปที่ 5.10 ถ้าให้  $A$  เป็นจุดเริ่มต้นจุดที่อยู่ต่างกัน 9 จุดคือ  $A+9$  จะเปรียบเทียบว่าถ้า  $A$  มากกว่า  $A+9$  แล้วให้หาค่าตรวจสอบแล้วทำการหาค่าเวลาที่จุด  $A$  กำหนดให้เป็น  $T_1$  ที่แสดงในรูปที่ 5.10 และค่าเวลาที่จุด  $A+9$  กำหนดให้เป็น  $T_2$  เมื่อนำ  $(T_1+T_2)/2$  จะได้ตำแหน่งของเวลาที่ความเข้มของแสงสูงสุดหรือ  $I_p$  นั่นเอง

ในการทำงานเดียวกันในกรณีจุดต่ำสุดของสัญญาณที่มีความเข้มของแสงต่ำสุด จะเปรียบเทียบว่าถ้าจุด  $A'$  น้อยกว่าจุด  $A'+9$  ให้หาค่าตรวจสอบแล้วทำการหาค่าเวลาที่จุด  $A'$  กำหนดให้เป็น  $T_3$  และค่าเวลาที่จุด  $A'+9$  กำหนดให้เป็น  $T_4$  เมื่อนำ  $(T_3+T_4)/2$  จะได้ตำแหน่งของเวลาที่ความเข้มของแสงมีค่าต่ำสุด หรือ  $I_s$  นั่นเอง



รูปที่ 5.10 แสดงการหาจุดยอดและจุดต่ำสุดของสัญญาณที่เป็นความเข้มแสงในแนวนอนและตั้งฉากกับระนาบอ้างอิงของสัญญาณอ้างอิง

5. หาค่าแห่งของเวลาที่แนวแกนของแสงเอาต์พุตทำมุม 45 องศากับระนาบอ้างอิง ซึ่งจะหาได้จากการนำเอาตำแหน่งของเวลาที่  $I_p$  และ  $I_s$  มาบวกกันแล้วหารด้วยสอง จะทำให้ได้ตำแหน่งของเวลาที่  $I_{45}$  ซึ่งเป็นเวลาครึ่งหนึ่งระหว่าง  $I_p$  และ  $I_s$  ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 แสดงตำแหน่งของความเข้มแสงที่มีมุม 45 องศากับแนวอ้างอิงของสัญญาณอ้างอิง ; โดยที่  $T_p$ ,  $T_s$  เป็นตำแหน่งเวลาที่แสงมีความเข้มสูงสุดและต่ำสุดและ  $T_{45}$  เป็นตำแหน่งของเวลาครึ่งหนึ่งระหว่าง  $T_p$  กับ  $T_s$

6. นำตำแหน่งเวลาที่ได้ของ  $I_p$ ,  $I_s$  และ  $I_{45}$  จากสัญญาณอ้างอิงไปหาค่าความเข้มของแสงที่เป็นค่า  $I_p$ ,  $I_s$  และ  $I_{45}$  ของสัญญาณที่เป็นสัญญาณตรวจสอบ

7. นำค่าของ  $I_p$ ,  $I_s$  และ  $I_{45}$  ที่ได้จากสัญญาณตรวจสอบไปคำนวณหาค่าต่าง ๆ เช่น ค่า  $\Psi$  และ  $\Delta$  สำหรับตัวอย่างที่มุมตกกระทบค่าหนึ่ง โดยที่  $\Psi$  จะหาได้จาก  $\psi = \tan^{-1}(R_p / R_s)^{1/2}$  และค่า  $\cos\Delta$  ได้จากการแทนค่าในสมการที่ (5.24)

8. เขียนเงื่อนไขในการทำงานว่าต้องการจบการทำงานหรือไม่ถ้าไม่ให้กลับไปปรับค่าใหม่ถ้าใช่ให้จบการทำงาน

## 5.5 สรุป

จากที่กล่าวมาในบทนี้ทำให้ทราบถึงวิธีการปรับปรุงคุณภาพของแสงที่ได้จากชุดทดลอง โดยการลดสัญญาณรบกวนความถี่สูงออกไปจากการใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ หลังจากการปรับปรุงแล้วทำให้คุณภาพของแสงที่ได้ดีขึ้น และในส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้สามารถนำไปใช้ในการวัดคุณสมบัติทางพื้นผิวของตัวอย่างที่เป็นแผ่นแก้ว BK7 แผ่นแคลเซียมฮาไลด์ และแผ่นทอง ทำให้สามารถบอกได้ว่าตัวอย่างมีสัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนแสงแตกต่างกัน มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยผลที่ได้จากการทดลองนี้จะใกล้เคียงค่าที่ได้จากแหล่งอ้างอิง รวมถึงในส่วนของการวิเคราะห์  
สัญญาณแสงได้โดยใช้โดยคอมพิวเตอร์ ส่วนในบทต่อไปจะเป็นการกล่าวถึงในการนำชุดทดลอง  
ไปประยุกต์ในการวัดค่าการเลื่อนเฟส และหาแกนเร็วและแกนช้าของแผ่นผลึกหน่วงเฟส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

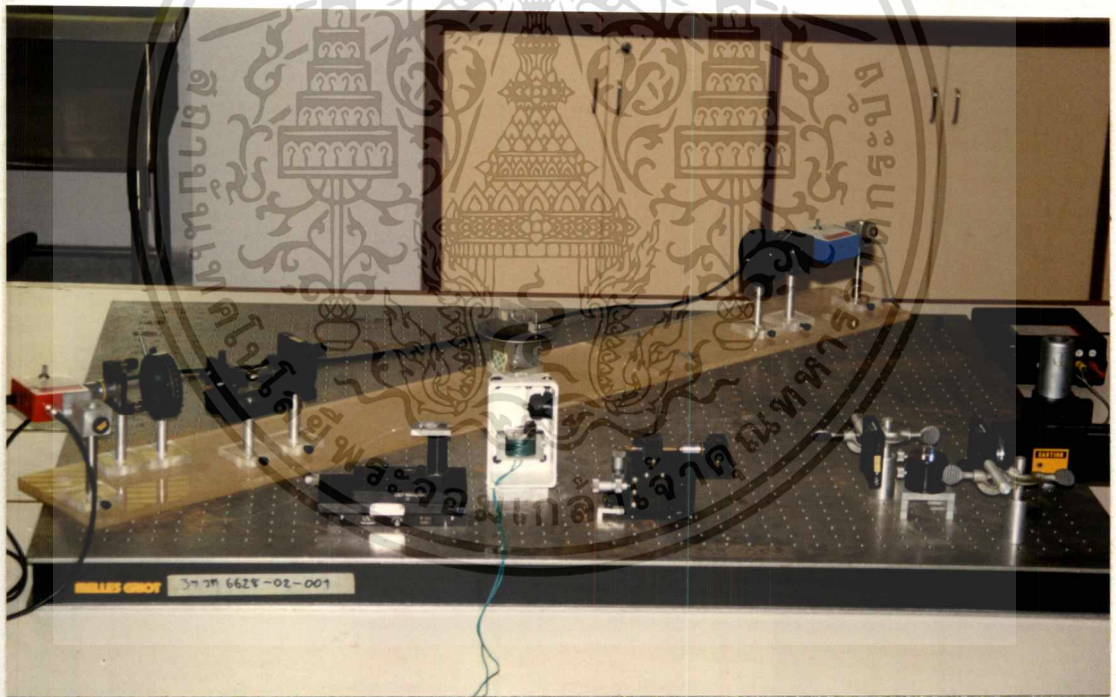
## บทที่ 6

### ผลของงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองของการควบคุมทิศทางของโพลาริเซชันด้วยวิธีการมอดูเลตเฟสของแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสง รวมถึงผลการทดลองที่ได้จากการนำชุดทดลองไปประยุกต์ใช้ในการวัดค่าคุณสมบัติทางแสงของพื้นผิวที่ต่างชนิดกัน การหาค่าการเลื่อนเฟสของผลึกหน่วงเฟส และการหาแกนเร็วและแกนช้าของผลึกหน่วงเฟส โดยจะกล่าวถึงตามลำดับดังนี้

#### 6.1 ผลการทดลองการควบคุมทิศทางของโพลาริเซชัน

จากรูปที่ 4.2 ผู้วิจัยสามารถวางอุปกรณ์จริงสำหรับการศึกษาการควบคุมทิศทางของโพลาริเซชันด้วยวิธีการมอดูเลตเฟสของแสง โดยมีเส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางได้ดังรูปที่ 6.1



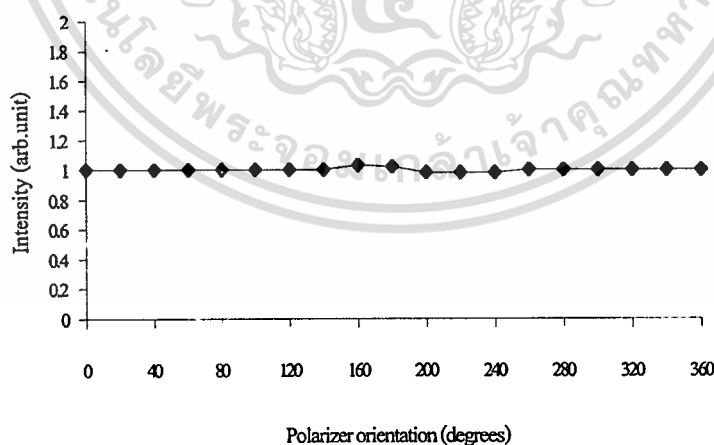
รูปที่ 6.1 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการทดลองในการควบคุมทิศทางของโพลาริเซชันด้วยวิธีการมอดูเลตเฟสของแสง โดยมีเส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลาง

จากรูปที่ 6.1 มีการจัดวางแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ทางด้านล่างขวามือของภาพ จากนั้นแสงเลเซอร์จะถูกปล่อยผ่านอุปกรณ์ทางแสง ผลึกแยก/รวมแสงชนิดโพลาริซ์ และแผ่นผลึกหน่วงเฟสชนิดหนึ่งในสี่ช่วงคลื่น ต่อมาแสงในส่วนนี้จะผ่านเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพเอกสาร์เป็นเอกลักษณ์ที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ เมื่อนำเอาตัวให้เข้าระบบขึ้นด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลาไรซ์ โดยที่ส่วนหนึ่งของเส้นใยแก้วนำแสงจะถูกยึดติดกับตัวมอดูเลเตอร์ (กล่องสีขาวซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป) และใกล้กับส่วนปลายเส้นใยแก้วนำแสงจะถูกตรึงไว้กับไมโครมิเตอร์เพื่อความสะดวกในการทดแรงดึง สำหรับแสงที่ได้จากเอาต์พุตของเส้นใยแก้วนำแสงจะถูกส่งผ่านชุดอุปกรณ์ทางแสง (ดังที่อธิบายมาแล้วในส่วนของ การทดลอง) โดยสัญญาณเอาต์พุตที่ได้นี้จะถูกแยกออกเป็น 2 ส่วน สัญญาณหลักจะถูกตรวจวัดโดยตัววัดแสงสีฟ้า สำหรับนำไปใช้งาน และสัญญาณย่อยถูกตรวจวัดโดยตัววัดแสงสีแดงสำหรับการอ้างอิงต่อไป

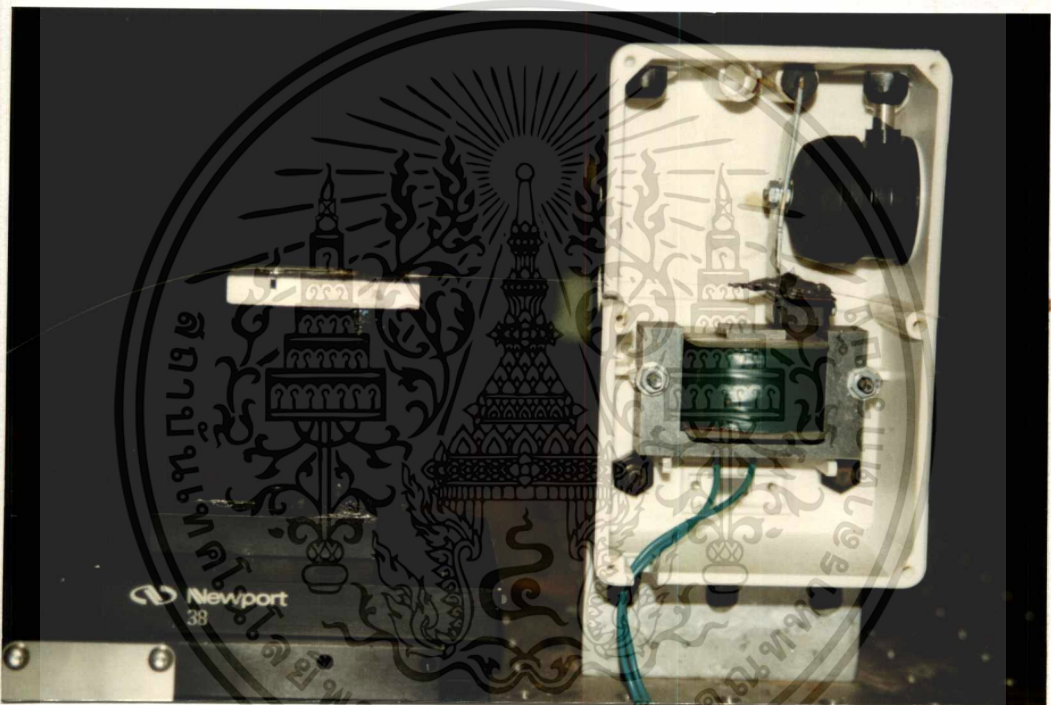
ในรูปที่ 6.1 สถานะของแสงโพลาไรซ์ก่อนที่จะถูกส่งผ่านเข้าสู่เส้นใยแก้วนำแสงจะต้องเป็นแสงโพลาไรซ์วงกลม ซึ่งจากการทดสอบพบว่าลำแสงดังกล่าวมีคุณภาพความเป็นโพลาไรซ์ใกล้เคียงกับวงกลมมาก กล่าวคือถ้าเป็นแสงโพลาไรซ์ที่มีสถานะเป็นวงกลมโดยสมบูรณ์ ความเข้มของแสงที่ผ่านโพลาไรเซอร์จะต้องมีค่าคงที่ และไม่เปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางของแกนส่งผ่านแสงของโพลาไรเซอร์

ผลการวิเคราะห์สถานะของแสงก่อนที่จะถูกส่งผ่านเข้าสู่เส้นใยแก้วนำแสงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.2 โดยมีแกนตั้งแสดงความเข้มของแสงที่ผ่าน โพลาไรเซอร์และแกนนอนแสดงทิศทางของแกนส่งผ่านแสงของโพลาไรเซอร์ จากผลของการทดลองที่ได้ออกมาเป็นแสงโพลาไรซ์วงกลมไม่สมบูรณ์อาจจะมีสาเหตุมาจากการวางตำแหน่งและการปรับมุมของ QWP1 ไม่ละเอียดพอเนื่องจากมีสเกลเป็นมิลลิเมตร และรวมถึงคุณภาพของอุปกรณ์ที่ใช้มีคุณภาพปานกลางกล่าวคือ เลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่ใช้มีค่าโพลาไรเซชันเชิงเส้นเป็น 500:1 โดยอัตราส่วนนี้จะมีค่าลดลงตามอายุการใช้งานซึ่งก็อาจเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แสงโพลาไรซ์ที่ได้ไม่เป็นวงกลม



รูปที่ 6.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงและทิศทางของแกนส่งผ่านแสงของโพลาไรเซอร์สำหรับแสงวงกลมที่ได้จากการทดลอง

จากนั้นแสงโพลาไรซ์วงกลมดังกล่าวจะถูกส่งผ่านเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งได้รับการมอดูเลตในลักษณะของการเปลี่ยนแปลงความเค้นตามจังหวะของสัญญาณขับจากตัวมอดูเลเตอร์ โดยสัญญาณที่ใช้ป้อนนี้เป็นรูปไซน์ที่มีความถี่ 20 เฮิรตซ์ ซึ่งมีผลทำให้เกิดความต่างเฟสระหว่างแสงในแนวแกนทั้งสองของเส้นใยแก้วนำแสง ชุดมอดูเลเตอร์นี้จัดให้เส้นใยแก้วนำแสงยึดติดอยู่กับแกนโลหะ (เหนือขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า) ดังแสดงในรูปที่ 6.3 ซึ่งเคลื่อนที่ไปมาขนานกับแนวพื้นโต๊ะด้วยอิทธิพลของสนามแม่เหล็กตั้งอธิบายมาแล้วในบทที่ 2 ส่วนอุปกรณ์ทางด้านซ้ายของตัวมอดูเลเตอร์เป็นตัวจับยึดเส้นใยแก้วนำแสง (เพื่อทอดแรงดึงเส้นใยแก้วนำแสงให้เหมาะสม) สามารถเคลื่อนที่ได้โดยการปรับไมโครมิเตอร์



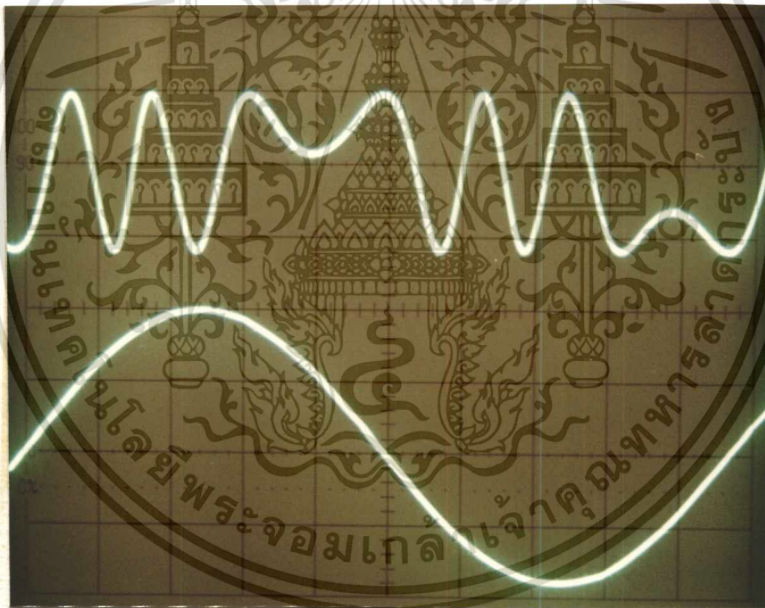
รูปที่ 6.3 แสดงตัวมอดูเลเตอร์ซึ่งใช้ในการดึงเส้นใยแก้วนำแสงให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเค้นตามจังหวะของสัญญาณขับ

สำหรับที่เอาต์พุตแผ่นผลึกหน่วงเฟสชนิด QWP2 จะทำการเปลี่ยนแสงที่ผ่านออกมาจากปลายเส้นใยแก้วนำแสงให้เป็นแสงโพลาไรซ์แบบวงกลมสองวง เนื่องจากการวางตัวของแกน ทิศนศาสตร์ของ QWP2 ทำมุม 45 องศากับแกนของเส้นใยแก้วนำแสง โดยแสงโพลาไรซ์สถานะวงกลมที่ได้ทั้งสองจะมีการหมุนในทิศทางตรงกันข้าม และเมื่อรวมกันแล้วจะให้แสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น ตามการวิเคราะห์ในส่วนของทฤษฎีโดยอาศัยโจนส์แคลคูลัส ถ้ามีการตรวจวัดสัญญาณแสงในส่วนนี้จะสังเกตได้ว่าสัญญาณจะออกมาในรูปของสัญญาณ DC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นเมื่อนำแผ่นโพลาริเซอร์มาวางทางเดินของแสงดังกล่าว และทำการตรวจวัดอีกครั้งหนึ่งจะพบว่าสัญญาณแสงมีลักษณะเป็นรีว (Fringes) ตามการวิเคราะห์จากทฤษฎีเช่นกัน (รูปที่ 6.4) สังเกตว่าในรูปประกอบด้วยสองสัญญาณ โดยสัญญาณบนเป็นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากชุดการมอดูเลตของเฟสเมื่อนำโพลาริเซอร์มากันก่อนที่แสงจะถูกตรวจวัดโดยอุปกรณ์รับแสง

สัญญาณที่ได้มีส่วนหนึ่งคล้ายกับสัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่สูงประมาณ 600 เฮิร์ตซ์ เมื่อเทียบกับความถี่ของสัญญาณไซน์ด้านล่างซึ่งเป็นสัญญาณที่ใช้ในการขับมอดูเลเตอร์ โดยความถี่ของสัญญาณขับมีค่าประมาณ 20 เฮิร์ตซ์ นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตเห็นว่าส่วนของสัญญาณความถี่สูงดังกล่าวยังมีจุดที่เรียกว่าจุดวกกลับ (Turning Points) ซึ่งเป็นจุดที่สัมพันธ์กับเวลาในขณะที่เส้นใยแก้วนำแสงมีการเปลี่ยนแปลง เช่น เปลี่ยนจากการยึดตัวเป็นการหดตัว หรือเปลี่ยนจากการหดตัวเป็นการยึดตัว เป็นต้น ตามจังหวะการเปลี่ยนแสงของมอดูเลเตอร์ ซึ่งมีผลทำให้แสงโพลาริซ์สถานะเชิงเส้นที่เกิดขึ้นนั้นมีการหมุนกลับทิศทางจากทิศทางหนึ่งไปยังอีกทิศทางหนึ่ง เช่น เปลี่ยนจากหมุนทวนเข็มนาฬิกาเป็นหมุนตามเข็มนาฬิกา เป็นต้น



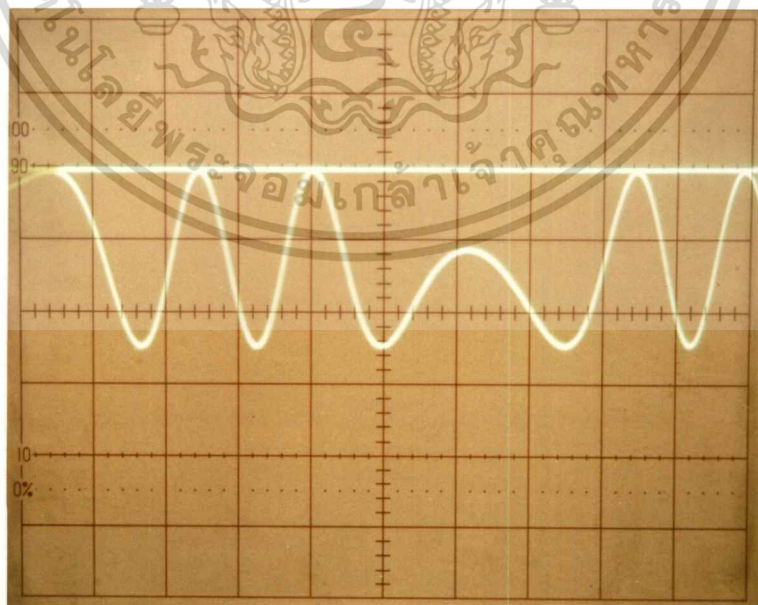
รูปที่ 6.4 แสดงรูปสัญญาณแสงโพลาริซ์เชิงเส้นที่หมุนซิมูทสามารถควบคุมได้ (สัญญาณที่อยู่ด้านบนของภาพ) เปรียบเทียบกับสัญญาณขับรูปไซน์ (สัญญาณที่อยู่ด้านล่างของภาพ) ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ (CH1: y-scale = 0.5V/div, CH2 y-scale = 5 V และ x-scale = 10 ms/div)

นอกจากนี้ยังมีการทดสอบในส่วนที่เกี่ยวกับการคงที่ของแอมพลิจูดของสัญญาณแสงเอาต์พุต ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนทิศทางของแกนส่งผ่านแสงของโพลาริเซอร์ตามสมการที่ (4.9) โดยพบว่า การหมุนแอนะไลเซอร์ (P2) จะทำให้เอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดน้อยมาก ๆ เนื่องจากแสงที่ผ่านโพลาริเซอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะเฟสของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพความเป็นโพลาริซ์ของสัญญาณแสงเอาต์พุตในขั้นตอนนี้สามารถสังเกตได้โดยตรงจากความแตกต่างระหว่างค่าที่น้อยที่สุดของสัญญาณเอาต์พุตกับกราวด์ (สัญญาณเมื่อไม่มีแสงผ่าน) โดยทั่วไปถ้ามีการทดสอบแสงโพลาริซ์เชิงเส้นด้วยการใช้โพลาริเซอร์นั้นผู้ทดสอบจะทำการหมุนโพลาริเซอร์ในระนาบที่ตั้งฉากกับทางเดินของแสง ซึ่งถ้าพบว่าสัญญาณเอาต์พุตจากอุปกรณ์รับแสงมีการเปลี่ยนแปลงเป็นศูนย์ (เทียบได้ว่าเป็นกราวด์) แสดงว่าแสงที่กำลังทดสอบเป็นแสงโพลาริซ์เชิงเส้นอย่างสมบูรณ์ และในขณะนั้นแนวแกนของแสงทำมุม 90 องศากับแกนส่งผ่านแสงของโพลาริเซอร์ สำหรับในกรณีที่ศึกษานี้โพลาริเซอร์ถูกยึดอยู่กับที่ ในขณะที่แสงโพลาริซ์เชิงเส้นที่ถูกสร้างขึ้นจะมีการหมุนแทนซึ่งสามารถนำมาพิจารณาได้ในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือเมื่อแกนของแสงโพลาริซ์เชิงเส้นตั้งฉากกับแกนส่งผ่านแสงของโพลาริเซอร์ สัญญาณเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้โดยอุปกรณ์รับแสง (ในทางทฤษฎี) ควรมีค่าเป็นศูนย์ จากผลการทดสอบสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 6.5 ค่าต่ำสุดของสัญญาณเอาต์พุต (สัญญาณ Fringes) ใกล้เคียงกับกราวด์ (สัญญาณเส้นตรง) เป็นอย่างมาก แสดงว่าสัญญาณเอาต์พุตมีคุณภาพใกล้เคียงกับแสงโพลาริซ์เชิงเส้นค่อนข้างสูง ความแตกต่างระหว่างค่าที่น้อยที่สุดของสัญญาณเอาต์พุตกับกราวด์มีค่าประมาณ 0.2 มิลลิโวลต์ ซึ่งสัมพันธ์กับคุณภาพความเป็นโพลาริซ์ของแสงประมาณ 98 เปอร์เซ็นต์จากการทดลอง โดยที่แสงไม่ได้ออกมาเป็น 100 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของอุปกรณ์ทางแสงที่เกี่ยวข้อง เช่นการปรับมุมของอุปกรณ์ที่ไม่มีความละเอียดพอเนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ซึ่งมีความละเอียดเป็นมิลลิเมตรซึ่งเป็นผลทำให้ค่าความเป็นโพลาริซ์ของแสงไม่เป็น 100 เปอร์เซ็นต์ รวมถึงคุณภาพความเป็นโพลาริซ์ของแสงที่ตกกระทบด้วย



รูปที่ 6.5 แสดงสัญญาณเอาต์พุต (สัญญาณ Fringes) ที่ได้ เปรียบเทียบกับกราวด์ (สัญญาณเส้นตรง)

(x-scale = 2 ms/div และ y-scale = 0.5 V/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบสัญญาณจากเอาต์พุตซึ่งเป็นค่าของแอมพลิจูดของสัญญาณมีหน่วยเป็นโวลต์ นั้นพบว่าสัญญาณที่ได้มีความใกล้เคียงกับสัญญาณอินพุตรูปไซน์ โดยสัญญาณที่ได้นี้มีค่าผิดพลาด ประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์จากสัญญาณอินพุตรูปไซน์ ซึ่งค่าผิดพลาดนี้อาจจะเกิดขึ้นเนื่องมาจากตัวมอดูเลเตอร์ที่ใช้ในการยึดเส้นใยแก้วนำแสงไม่เสถียรดีพอซึ่งอาจเป็นผลมาจากค่าฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ที่เกิดขึ้นในตัวมอดูเลเตอร์

นอกจากการสังเกตผลการทดลองเบื้องต้นดังที่ได้กล่าวมาแล้วยังได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะของเอาต์พุตโดยพิจารณาสโตกส์พารามิเตอร์ ที่วัดได้โดยการจัดชุดทดลองตามรูปที่ 4.5 โดยผลการทดลองอธิบายได้ดังนี้

เนื่องจากสโตกส์พารามิเตอร์ได้จากผลรวมและผลต่างของค่าความเข้มแสงที่เหมาะสมซึ่งประกอบด้วย  $I_0$ ,  $I_{90}$ ,  $I_{45}$ ,  $I_{-45}$ ,  $I_{RCP}$  และ  $I_{LCP}$  ดังนั้นในขั้นตอนแรกคือทำการวัดค่าความเข้มแสงดังกล่าวโดยอาศัยสัญญาณอ้างอิงทำให้กำหนดได้ว่าสัญญาณเอาต์พุตที่กำลังตรวจวัดมีแนวแกนขนานกับแนวแกนอ้างอิง และค่าความเข้มของแสงเป็นดังตารางที่ 6.1 ซึ่งวิธีการวัดจะกล่าวถึงในบทต่อไป

ตารางที่ 6.1 แสดงความเข้มของแสงต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับคำนวณค่าสโตกส์พารามิเตอร์

ความเข้มแสง	โวลต์ (ค่าเฉลี่ย)
$I_0$	$1.070 \pm 0.070$
$I_{90}$	$0.013 \pm 0.004$
$I_{45}$	$0.576 \pm 0.044$
$I_{-45}$	$0.483 \pm 0.043$
$I_{RCP}$	$0.561 \pm 0.020$
$I_{LCP}$	$0.462 \pm 0.021$

จากนั้นจึงนำค่าความเข้มของแสงที่ได้มาคำนวณหาค่าสโตกส์พารามิเตอร์ตามสมการที่ (4.10) ได้ดังต่อไปนี้

$$S_0 = I_0 + I_{90} = 1.083 \pm 0.074 \text{ โวลต์}$$

$$S_1 = I_0 - I_{90} = 1.059 \pm 0.066 \text{ โวลต์}$$

$$S_2 = I_{45} - I_{-45} = 0.093 \pm 0.001 \text{ โวลต์}$$

$$S_3 = I_{RCP} - I_{LCP} = 0.099 \pm 0.001 \text{ โวลต์}$$

ซึ่งเมื่อนำมาเขียนในรูปของนอร์แมลไลซ์ของสโตกส์พารามิเตอร์ จะเขียนได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S = \begin{bmatrix} 1.000 \pm 0.000 \\ 0.978 \pm 0.006 \\ 0.086 \pm 0.005 \\ 0.091 \pm 0.006 \end{bmatrix}$$

เมื่อนำนอร์แมลไลซ์ของสโตกส์พารามิเตอร์ที่ได้จากเอาต์พุตไปเปรียบเทียบกับนอร์แมลไลซ์ของสโตกส์พารามิเตอร์ ตามตารางที่ 2.1 จะพบว่าสถานะโพลาไรซ์ของเอาต์พุตมีความใกล้เคียงสถานะเชิงเส้นซึ่งมีแนวแกนของแสงขนานกับแกนอ้างอิงเป็นอย่างมาก โดยค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นอาจเนื่องมาจากแสงที่ได้ไม่มีความเป็นโพลาไรซ์เชิงเส้นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งสาเหตุเบื้องต้นอาจเนื่องมาจากคุณภาพของอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ในงานวิจัย ตลอดจนถึงการจัดวางอุปกรณ์ในการทดลอง และเพื่อจะให้ผลการวิเคราะห์ชัดเจนยิ่งขึ้นจึงได้ทำการคำนวณหาความเป็นโพลาไรซ์ของแสง (DOP) และค่าเอลลิปติกซิตี (e) เพื่อสนับสนุนผลของการทดลอง จากการทดลองพบว่า

- 1) ค่า DOP จะมีค่าประมาณ

$$\begin{aligned} \text{DOP} &= \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \times 100\% \\ &= \frac{\sqrt{(1.059 \pm 0.066)^2 + (0.093 \pm 0.001)^2 + (0.099 \pm 0.001)^2}}{(1.083 \pm 0.074)} \times 100\% \\ &= 98.570 \pm 0.660\% \end{aligned}$$

- 2) ค่าเอลลิปติกซิตี (e) จะมีค่าประมาณ

$$\begin{aligned} e &= \tan \left( \frac{1}{2} \left[ \sin^{-1} \left[ \frac{S_3}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}} \right] \right] \right) \\ &= \tan \left( \frac{1}{2} \left[ \sin^{-1} \left[ \frac{(0.099 \pm 0.001)}{\sqrt{(1.059 \pm 0.066)^2 + (0.093 \pm 0.001)^2 + (0.099 \pm 0.001)^2}} \right] \right] \right) \\ &= 0.046 \pm 0.002 \end{aligned}$$

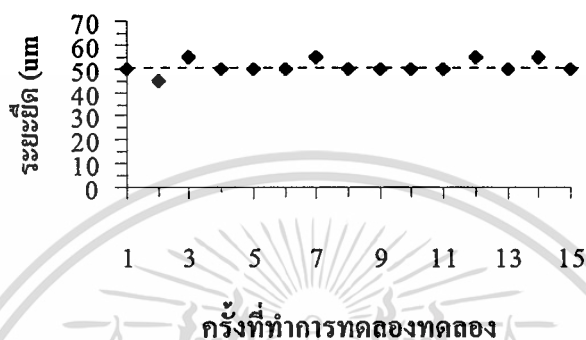
จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้มีความเป็นโพลาไรซ์ที่ค่อนข้างสูง (เมื่อเทียบกับ DOP ของแสงโพลาไรซ์ที่สมบูรณ์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 100%) และมีลักษณะของแสงใกล้เคียงกับความเป็นเชิงเส้นมาก (เมื่อเทียบกับเอลลิปติกซิตีของเส้นตรงซึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์)

จากการวิเคราะห์ข้างต้น ได้มีการใช้ประโยชน์จากสัญญาณอ้างอิงที่ถูกจัดเตรียมไว้ซึ่งใช้ประโยชน์ในการนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณตรวจสอบ ซึ่งสัญญาณอ้างอิงดังกล่าวมีความสำคัญมากเมื่อนำชุดมอดูเลตเฟสของแสงผ่านเส้นใยแก้วนำแสงไปใช้งานทางด้านการวัดด้วยแสงต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 ผลการทดลองการยืดเส้นใยแก้วนำแสง

ผลของการทดลองการยืดเส้นใยแก้วนำแสงแล้วทำให้เฟสของแสงเปลี่ยนแปลงไปเป็น  $2\pi$  ได้ค่าออกมาประมาณ  $51.00 \pm 2.70$  ไมโครเมตร ซึ่งเป็นผลที่ได้ใกล้เคียงกับทฤษฎีโดยผลที่ได้สามารถแสดงได้ในรูปที่ 6.6 ความแตกต่างอาจเกิดเนื่องมาจากการแทนค่าพารามิเตอร์บางตัวในสมการที่ (4.18) เพราะค่าที่ใช้เป็นค่าทั่วไป ซึ่งในเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละชนิดอาจมีค่าดังกล่าวแตกต่างกันบ้าง



รูปที่ 6.6 แสดงผลการทดลองหาระยะยืดของเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งทำให้เฟสของแสงมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็น  $2\pi$  โดยที่เส้นประคือค่าเฉลี่ยของผลการทดลองเท่ากับ 51 ไมโครเมตร

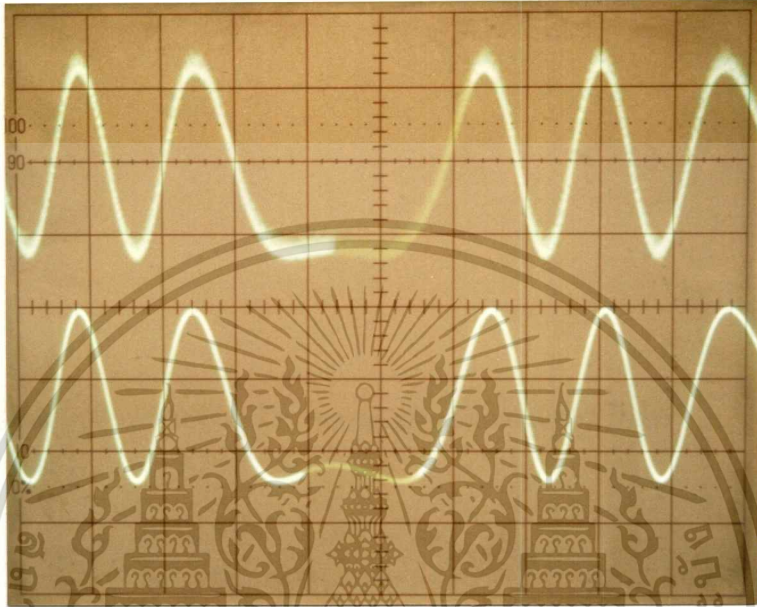
## 6.3 ผลการทดลองในการปรับปรุงคุณภาพของชุดมอดูเลตเฟสของแสง

ในการปรับปรุงคุณภาพของแสงในชุดมอดูเลตเฟสของแสงซึ่งใช้วงจรถอดสัญญาณสัญญาณรบกวนความถี่สูงนั้นทำให้คุณภาพของแสงดีขึ้น เมื่อนำไปทำการวัดค่าต่าง ๆ ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 6.2 ซึ่งเปรียบเทียบกับกรณีไม่ใช้วงจรถอดสัญญาณความถี่สูง

ตารางที่ 6.2 แสดงค่าที่วัดได้ก่อนใช้และหลังใช้วงจรถอดสัญญาณความถี่สูง

ค่าที่วัด	ไม่ใช้วงจรถอดสัญญาณรบกวน	ใช้วงจรถอดสัญญาณรบกวน	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (%)
Degree of Polarization (DOP)	$98.570 \pm 0.660$	$98.850 \pm 0.124$	$0.280 \pm 0.528$
Ellipticity (e)	$0.046 \pm 0.002$	$0.035 \pm 0.001$	$23.910 \pm 2.610$

ในรูปที่ 6.7 เป็นการเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้ก่อนและหลังใช้วงจรลดสัญญาณความถี่สูง โดยสัญญาณที่อยู่ด้านบนของรูปจะเป็นสัญญาณที่ยังไม่ได้ใช้วงจรลดสัญญาณรบกวนความถี่สูงออกไป ส่วนสัญญาณที่อยู่ทางด้านล่างของรูปจะเป็นสัญญาณที่ได้หลังจากการใช้วงจรลดสัญญาณรบกวนความถี่สูง



รูปที่ 6.7 แสดงสัญญาณที่ได้จากชุดมอดูเลตเฟสของแสง โดยใช้เส้นใยแก้วนำแสง เมื่อผ่านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (สัญญาณที่อยู่ด้านล่างในภาพ) เปรียบเทียบกับสัญญาณที่ไม่ได้ใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (สัญญาณที่อยู่ด้านบนในภาพ) : (x – scale = 2 ms/div y – scale = 0.5 V/div)

#### 6.4 ผลการทดลองในการวัดค่าคุณสมบัติทางแสงของพื้นผิวตัวอย่าง

ผลของการทดลองนี้จะแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อย ๆ ดังต่อไปนี้คือ พื้นผิวของตัวอย่างที่ไม่ดูดกลืนทางแสง พื้นผิวของตัวอย่างที่มีการดูดกลืนทางแสงต่ำ และพื้นผิวของตัวอย่างที่มีการดูดกลืนทางแสงสูง โดยจะเสนอเป็นลำดับดังต่อไปนี้

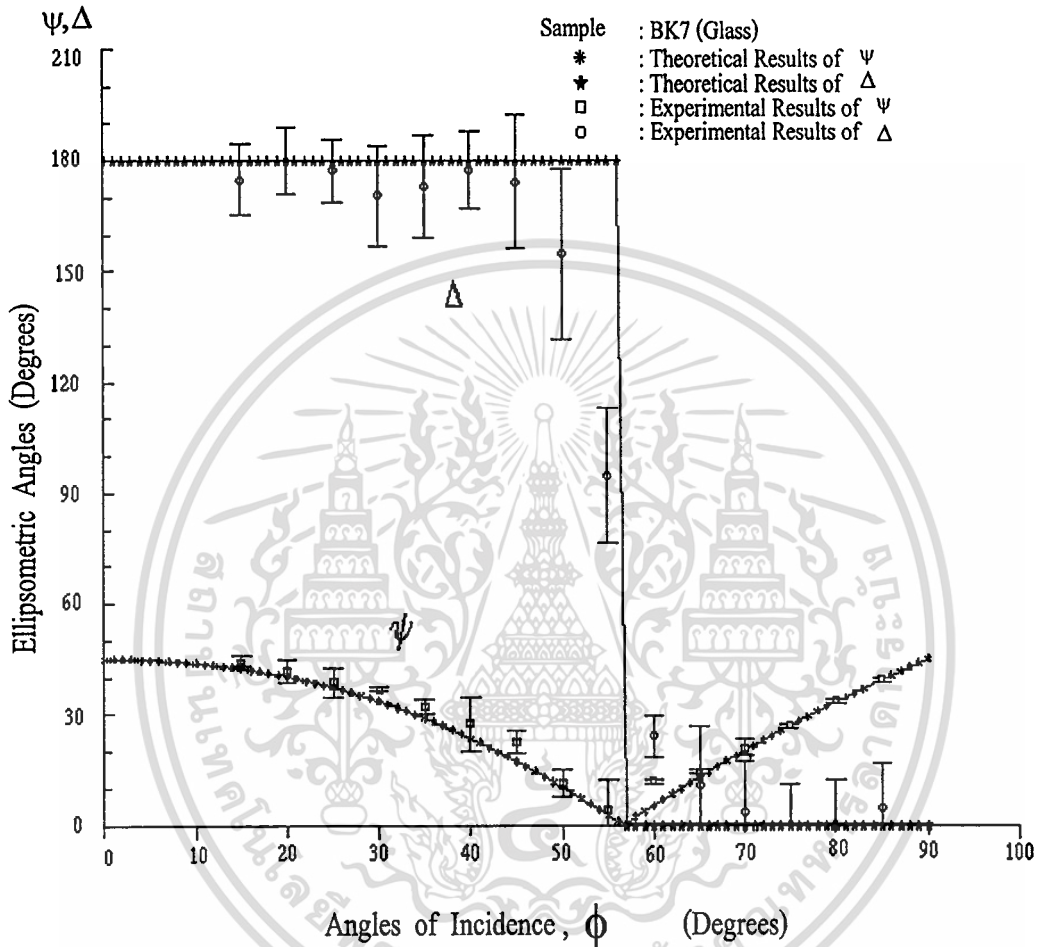
##### 6.4.1 พื้นผิวตัวอย่างที่มีคุณสมบัติไม่ดูดกลืนทางแสง

จากการทดลองวัดค่าคุณสมบัติทางแสงของพื้นผิวจากการสะท้อน โดยแสงเดินทางจากตัวกลางที่เป็นอากาศไปยังพื้นผิวของตัวกลางที่เป็นแก้ว (BK7) ซึ่งทราบค่ามาตรฐานของคุณสมบัติทางแสง คือ ค่าดัชนีหักเห และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสง ที่ความยาวคลื่นแสง 632.8 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองที่ได้แสดงในเทอมของเอลลิปโซเมตริกพารามิเตอร์  $\Psi$  และ  $\Delta$  ณ มุมตกกระทบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 6.8 ซึ่ง  $\Psi$  เป็นอัตราส่วนของความสัมพันธ์ของ  $R_p$  และ  $R_s$  ดังนี้

$$\Psi = \tan^{-1} \left( \frac{R_p}{R_s} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ และ } \Delta \text{ เป็นเฟสที่เปลี่ยนไปที่มุมตกกระทบต่าง ๆ}$$



รูปที่ 6.8 แสดงผลการทดลองวัดค่าคุณสมบัติทางแสงของพื้นผิว BK7 ในเทอมของ  $\Psi$  และ  $\Delta$  เปรียบเทียบกับทฤษฎีที่มุมตกกระทบต่าง ๆ ที่  $\lambda$  เท่ากับ 632.8 นาโนเมตร

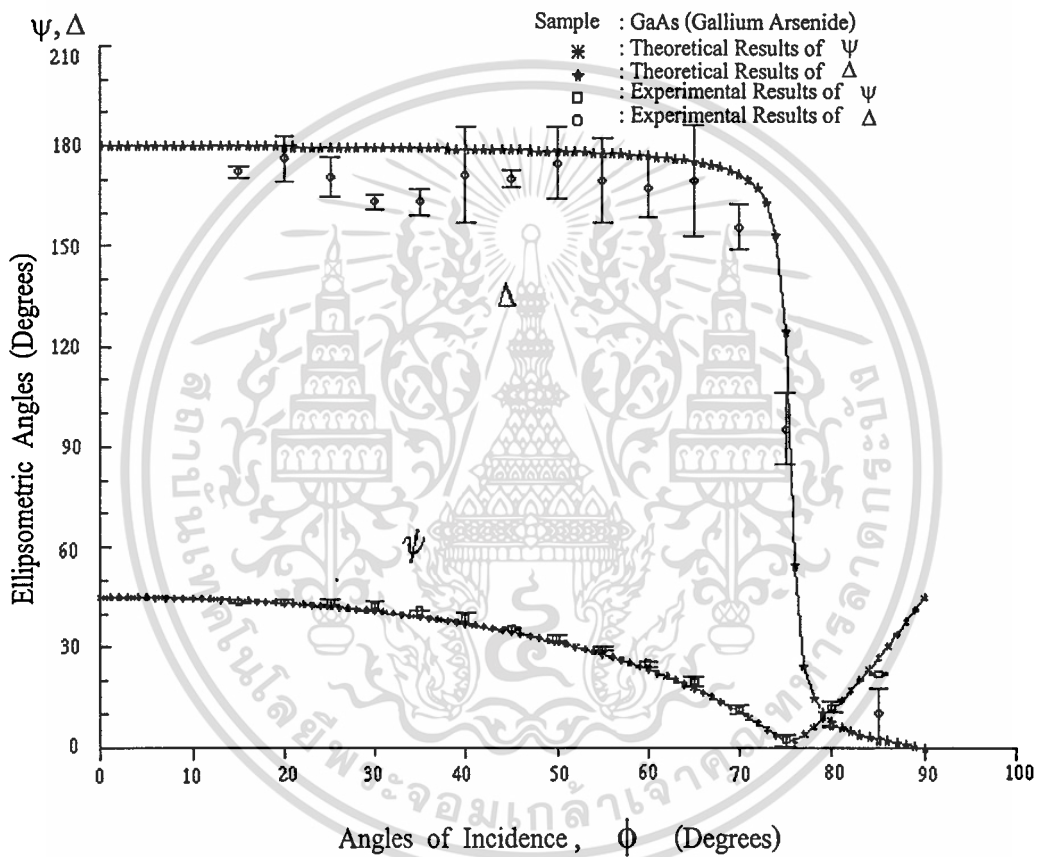
ในการวัดค่าครชนีหักเหของ BK7 นั้นเลือกที่มุมตกกระทบ 75 องศา ( $\phi = 75^\circ$ ) ค่า  $\Psi$  ที่วัดได้มีค่าเป็น 27.090 องศา มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 0.248 องศา และค่าของการเลื่อนเฟส  $\Delta$  ซึ่งวัดออกมาในรูปของ  $\cos\Delta$  ซึ่งได้จากสมการ (5.24) ได้ประมาณ 1.000 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 0.015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าที่ได้นี้นำไปคำนวณหาค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสง ( $k$ ) ของ BK7 ซึ่งได้จากการแทนค่าในสมการที่ (5.11) และ (5.12) เป็น  $1.51 (\pm 0.01) - i0.00(\pm 0.01)$  เทียบกับค่าดัชนีหักเหจากแหล่งอ้างอิง [11]

#### 6.4.2 พื้นผิวตัวอย่างที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนทางแสงต่ำ

จากการทดลองวัดค่าคุณสมบัติทางแสงของพื้นผิวจากการสะท้อน โดยแสงเดินทางจากตัวกลางที่เป็นอากาศไปยังพื้นผิวของตัวกลางที่เป็นแกเลียมอาเซไนด์ (GaAs) ซึ่งวัดค่าออกมาในเทอมของเอลลิปทริกพารามิเตอร์  $\Psi$  และ  $\Delta$  ที่มุมตกกระทบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 6.9



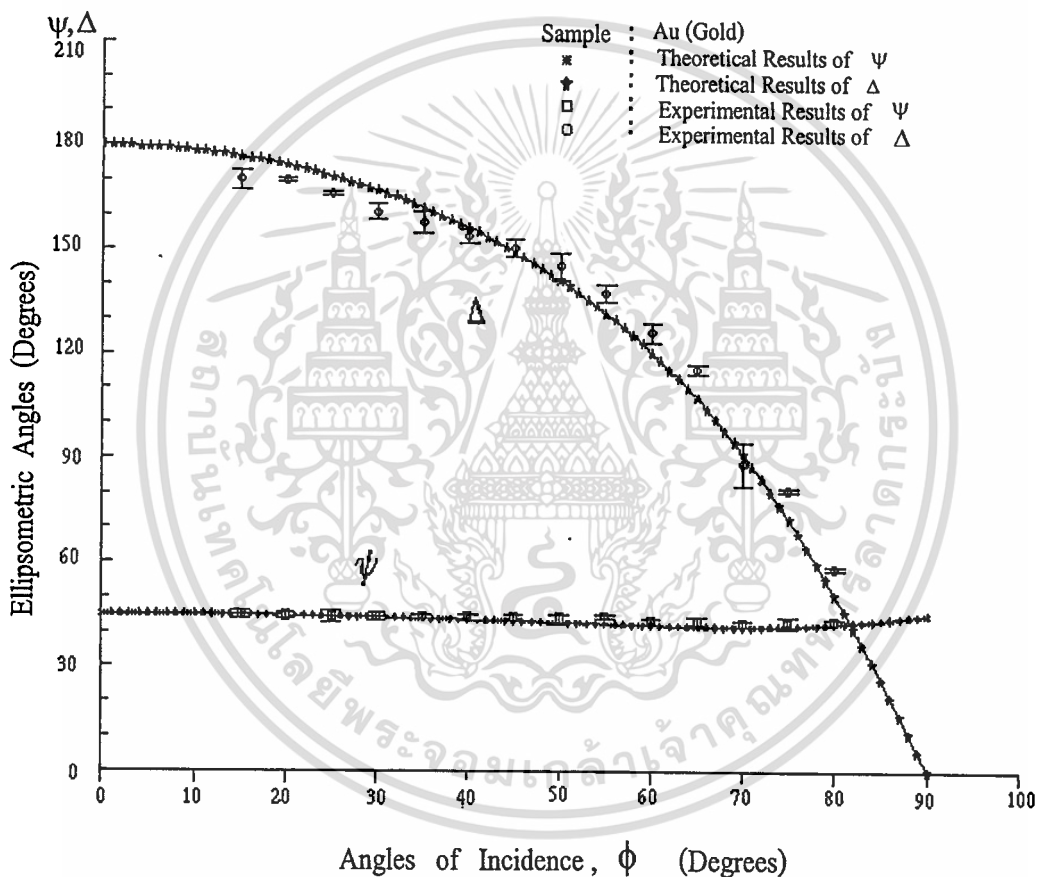
รูปที่ 6.9 แสดงผลการทดลองวัดค่าคุณสมบัติทางแสงของพื้นผิวแกเลียมอาเซไนด์ (GaAs) ในเทอมของ  $\Psi$  และ  $\Delta$  เปรียบเทียบกับทฤษฎีที่มุมตกกระทบต่าง ๆ ที่  $\lambda$  เท่ากับ 632.8 นาโนเมตร

ในการวัดค่าดัชนีหักเหที่เลือกที่มุมตกกระทบ 75 องศา ( $\phi = 75^\circ$ ) โดยการวัดค่า  $\Psi$  และ  $\cos\Delta$  ออกมาได้ดังนี้ ค่า  $\Psi$  ได้ 2.220 องศา มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 0.718 องศาและค่า  $\cos\Delta$  ได้ -0.096 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 0.078

เมื่อนำค่าที่ได้นี้ไปแทนลงในสมการที่ (5.11) และ (5.12) จะได้ค่าดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสงเป็น  $3.77 (\pm 0.09) - i0.26 (\pm 0.06)$  เทียบกับค่าดัชนีหักเหจากแหล่งอ้างอิง [11]

#### 6.4.3 พื้นผิวตัวอย่างที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนทางแสงสูง

การทดลองวัดค่าตัวอย่างที่มีการดูดกลืนทางแสงสูงนี้โดยใช้แผ่นทอง จากการทดลองวัดค่าคุณสมบัติทางแสงของพื้นผิวจากการสะท้อนโดยแสงเดินทางจากตัวกลางที่เป็นอากาศไปยังพื้นผิวของตัวกลางที่เป็นทอง โดยค่าของเอลลิปโซเมตริกพารามิเตอร์  $\Psi$  และ  $\Delta$  ที่วัดได้ที่มุมตกกระทบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 แสดงผลการทดลองวัดค่าคุณสมบัติทางแสงของพื้นผิวของ แผ่นทอง (Au)  $\Psi$  และ  $\Delta$  เปรียบเทียบกับทฤษฎีที่มุมตกกระทบต่าง ๆ ที่  $\lambda$  เท่ากับ 632.8 นาโนเมตร

ในการวัดค่าดัชนีหักเหที่เลือกที่มุมตกกระทบ 75 องศา ( $\phi = 75^\circ$ ) โดยการวัดค่า  $\Psi$  และ  $\cos\Delta$  ออกมาได้ดังนี้ ค่า  $\Psi$  ได้ 42.730 องศา มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 0.388 องศาและค่า  $\cos\Delta$  ได้ 0.136 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 0.003<sup>0</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าที่ได้นี้ไปแทนลงในสมการที่ (5.11) และ (5.12) จะได้ค่าดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสงเป็น  $0.14 (\pm 0.04) - i2.98 (\pm 0.12)$  เทียบกับค่าดัชนีหักเหจากแหล่งอ้างอิง [11]

จากการใช้ชุดทดลองการมอดูเลตเฟสของแสง วัดค่าพื้นผิวของตัวอย่างที่ต่างชนิดกันที่ผ่านมาผลที่ได้ออกมาเมื่อเทียบกับในส่วนของค่าที่ได้จากแหล่งอ้างอิงอื่น แล้วจะเห็นว่าให้ผลที่ใกล้เคียงกันมาก และยังสามารถที่จะจำแนกคุณสมบัติทางแสงของพื้นผิวต่างชนิดกันได้เช่น ค่าดัชนีหักเหและค่าสัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนทางแสงของตัวอย่าง ซึ่งความแม่นยำที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่ดี โดยผลสรุปที่ได้ดังที่แสดงในตารางที่ 6.3 โดยเปรียบเทียบกับในส่วนของค่าอ้างอิงจากแหล่งอื่น [11]

ตารางที่ 6.3 แสดงผลสรุปจากการทดลองวัดค่าพื้นผิวที่ได้เปรียบเทียบกับในส่วนของค่าอ้างอิงจากแหล่งอื่นที่มอดุผลกระทบ 75 องศา

ค่าที่วัด	BK7		GaAs		Au	
	ค่าอ้างอิง	ทดลอง	ค่าอ้างอิง	ทดลอง	ค่าอ้างอิง	ทดลอง
n	1.51	$1.51 \pm 0.01$	3.86	$3.77 \pm 0.09$	0.18	$0.14 \pm 0.04$
k	0.00	$0.00 \pm 0.01$	0.20	$0.26 \pm 0.06$	3.10	$2.98 \pm 0.12$
$\psi$	26.980	$27.090 \pm 0.284$	1.910	$2.220 \pm 0.781$	41.630	$42.730 \pm 0.388$
$\text{Cos}\Delta$	1.000	$1.000 \pm 0.015$	-0.564	$-(0.196 \pm 0.078)$	0.300	$0.136 \pm 0.003$

ผลการทดลองในการวัดค่าดัชนีหักเหของตัวอย่างที่มอดุผลกระทบอื่น ๆ โดยนำค่า  $\psi$  และ  $\Delta$  จากรูปที่ 6.8 6.9 และ 6.10 ที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาค่าดัชนีหักเห ซึ่งผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 6.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.4 แสดงค่าครรชนีหักเหของตัวอย่างที่มุดกกระทบต่าง ๆ

ตัวอย่าง ที่ทดลอง	มุดกกระทบ (องศา)						
	30	40	50	60	70	80	
BK7	n	$1.61 \pm 0.10$	$1.82 \pm 0.31$	$1.49 \pm 0.02$	$1.33 \pm 0.18$	$1.48 \pm 0.03$	$1.49 \pm 0.02$
	k	$0.07 \pm 0.07$	$0.46 \pm 0.46$	$0.13 \pm 0.13$	$0.14 \pm 0.14$	$0.05 \pm 0.05$	$0.01 \pm 0.01$
GaAs	n	$2.13 \pm 1.73$	$3.32 \pm 0.54$	$2.97 \pm 0.89$	$3.51 \pm 0.35$	$3.80 \pm 0.06$	$3.75 \pm 0.11$
	k	$0.06 \pm 0.14$	$1.34 \pm 0.14$	$0.75 \pm 0.55$	$1.03 \pm 0.83$	$0.62 \pm 0.42$	$0.17 \pm 0.03$
AU	n	$0.15 \pm 0.03$	$0.11 \pm 0.07$	$0.07 \pm 0.11$	$0.17 \pm 0.01$	$0.22 \pm 0.04$	$0.17 \pm 0.01$
	k	$1.87 \pm 1.23$	$2.23 \pm 0.87$	$2.80 \pm 0.30$	$2.81 \pm 0.29$	$2.32 \pm 0.87$	$2.95 \pm 0.15$

ข้อสังเกต จากการวัดค่าครรชนีหักเหของพื้นผิวตัวอย่างทั้งสามชนิดนั้นจะเห็นว่าที่มุดกกระทบ 75 องศาจากตารางที่ 6.3 ได้ค่าใกล้เคียงกับค่าจากแหล่งอ้างอิง ซึ่งเลือกใช้ในการวัดค่าครรชนีหักเหของตัวอย่างในการทดลองนี้

## 6.5 ผลการทดลองวัดค่าการเลื่อนเฟสและการหาแกนของผลึกหน่วงเฟส

ผลการทดลองวัดค่าการเลื่อนเฟสของผลึกหน่วงเฟสที่ใช้เป็นตัวอย่างนั้น ใช้ QWP เป็นตัวอย่างในการตรวจสอบทำมาจากผลึกควออตซ์มีคุณภาพค่อนข้างดี ในส่วนของ HWP และ FWP ได้มาจากการนำเอา QWP สองอันจัดวางให้แกนของผลึกหน่วงเฟสที่เหมือนกันให้ขนานกันและแกนของผลึกหน่วงเฟสที่ต่างกันให้ขนานกันตามลำดับ จากการตรวจสอบนั้นผลที่ได้จะใกล้เคียงกับทฤษฎีดังที่แสดงในตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 แสดงผลการทดลองวัดค่าการเลื่อนเฟสของผลึกหน่วงเฟสที่ได้จากชุดทดลอง

ชนิดที่ทดลอง	ทฤษฎี ( $\cos\Delta$ )	การทดลอง ( $\cos\Delta$ )
QWP	0	$0.018 \pm 0.010$
HWP	-1	$-(0.999 \pm 0.020)$
FWP	+1	$+(0.998 \pm 0.060)$

ในการทดลองหาแกนเร็วและแกนช้าของผลึกหน่วงเฟส นั้นผลการทดลองที่ได้ทำให้บอกได้ว่าแกนที่ตั้งฉากกับรอยบอกตำแหน่งแกนของผลึกหน่วงเฟสเป็นแกนช้าและแกนที่ขนานกับรอยบอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บอกตำแหน่งแกนของผลึกห้วงเฟสจะเป็นแกนเร็ว โดยผลการทดลองที่ได้นี้จะพิจารณาเปรียบเทียบกับความเข้มของแสงที่ได้ตั้งในตารางที่ 6.5 กล่าวคือถ้าความเข้มแสงลดลงแสดงว่าเป็นแกนช้าและถ้าความเข้มของแสงเพิ่มขึ้นจะเป็นแกนเร็ว

ตารางที่ 6.5 แสดงค่าความเข้มแสงที่ได้ในการวัดค่าหาแกนเร็วและแกนช้าของผลึกห้วงเฟส

ลักษณะการทดลอง	ความเข้มแสงก่อนใส่ WP	ความเข้มแสงหลังใส่ WP
ให้แกนที่ตั้งฉากกับรอยบอกดตำแหน่งแกนของผลึกห้วงเฟส วางในแนวขนานกับแนวแรงกดโพโตอีลาสติก	$0.93 \pm 0.04$ โวลต์	$0.75 \pm 0.03$ โวลต์ (ลดลง)
ให้แกนที่ขนานกับรอยบอกดตำแหน่งแกนของผลึกห้วงเฟส วางในแนวขนานกับแนวแรงกดโพโตอีลาสติก	$0.93 \pm 0.04$ โวลต์	$1.07 \pm 0.04$ โวลต์ (เพิ่มขึ้น)

จากตารางที่ 6.5 ความเข้มของแสงที่วัดค่าได้นั้น ซึ่งได้มาจากการวัดสัญญาณตรวจสอบเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ใช้อ้างอิง ซึ่งจะทำให้อ่านค่าความเข้มของแสงที่เปลี่ยนแปลงได้ซึ่งหลักการดังกล่าวได้กล่าวมาแล้วในบทที่ผ่านมา เมื่อเปรียบเทียบความเข้มแสงที่ได้ทำให้ทราบว่าแกนของผลึกห้วงเฟสที่ใช้มีแนวแกนเร็วที่ขนานกับรอยบอกดตำแหน่งแกน (ความเข้มของแสงที่ได้เพิ่มขึ้น) และแกนของผลึกห้วงเฟสที่ตั้งฉากกับรอยบอกดตำแหน่งแกนเป็นแกนช้า (ความเข้มของแสงลดลง) เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับรายละเอียดข้อมูลของผลึกห้วงเฟส HWP ที่ใช้ในการทดสอบแล้วผลที่ได้ถูกต้องและตรงกับรายละเอียดที่มี ซึ่งทำให้ทราบว่าวิธีการทดลองนี้ใช้ในการวัดหาแกนเร็วและแกนช้าของผลึกห้วงเฟสได้

## 6.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงผลการทดลองของชุดมอดูเลตเฟสของแสงโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสง รวมถึงผลการทดลองในการประยุกต์ใช้งานทางด้านการวัดค่าคุณสมบัติทางแสงของพื้นผิวต่างชนิดกัน ค่าการเลี้ยวเบนเฟสของผลึกห้วงเฟสได้ผลที่ใกล้เคียงกับทฤษฎี และการหาแกนเร็วและแกนช้าของผลึกห้วงเฟส โดยผลส่วนใหญ่ออกมาใกล้เคียงกับทฤษฎีและแหล่งอ้างอิงมาก ในบทต่อไปจะเป็นบทสรุปโดยรวมทั้งหมด

## บทที่ 7

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวสรุปทั้งหมดที่ได้ทำการศึกษา มา รวมถึงปัญหาที่เกิดขึ้น และข้อเสนอแนะในการพัฒนาชุดทดลองนี้ต่อไป ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดเรียงลำดับเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

#### 7.1 บทสรุป

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกทำการควบคุมทิศทางของโพลาไรเซชันด้วยวิธีการมอดูเลตเฟสของแสงโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลาง เส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้เป็นชนิดรักษาสถานะโพลาไรซ์ซึ่งทำได้โดยการยึดเส้นใยแก้วนำแสงตามแนวยาวด้วยตัวมอดูเลเตอร์ซึ่งใช้สัญญาณรูปไซน์ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ เป็นตัวขับ ซึ่งมีผลทำให้สามารถควบคุมทิศทางของแสงโพลาไรเซชันได้อย่างต่อเนื่องและสะดวกรวดเร็ว และสามารถที่นำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านต่าง ๆ ได้ เช่นทำเป็นอุปกรณ์ในการตรวจรู้ และวัดค่าคุณสมบัติทางแสงของพื้นผิวต่างชนิดกันได้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการควบคุมทิศทางของโพลาไรเซชันด้วยวิธีการมอดูเลตเฟสของแสงโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงมีดังนี้

- แหล่งกำเนิดแสงฮีเลียมนีออนเลเซอร์ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เลเซอร์ชนิดนี้เนื่องจากฮีเลียมนีออนเลเซอร์มีความเสถียรทางแสงที่ออกมาและเป็นแสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นที่สำคัญคือให้ความเข้มของแสงค่อนข้างมาก
- อุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ได้แก่ ผีเสื้อรวมและแยกแสงโพลาไรซ์ซึ่งใช้ในการแยกแสงโพลาไรซ์เพื่อทำให้ได้คุณภาพของแสงดีขึ้น แผ่นผลึกหน่วงเฟสชนิดหนึ่งในสี่ช่วงคลื่น (Quarter-Wave Plate) จะใช้ในการสร้างแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามซ้ายหรือขวา ส่วนเลนส์ที่ใช้เป็นชนิดที่ใช้ในกล้องจุลทรรศน์ (Objective Lens) จะใช้ในการรวมแสงที่ได้เพื่อส่งผ่านเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง เส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้เป็นชนิดรักษาสถานะโพลาไรซ์ซึ่งใช้เป็นตัวกลางของแสงโดยเฟสของแสงถูกมอดูเลตผ่านการมอดูเลตเส้นใยแก้วนำแสงโดยวิธีการเปลี่ยนแปลงความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง แผ่นแก้วสไลด์ใช้ในการแยกแสงไว้สำหรับใช้เป็นลำแสงอ้างอิงเปรียบเทียบกับลำแสงหลักที่นำไปวัดค่าต่าง ๆ ทางแสง ส่วนต่อมาก็คือโพลาไรเซอร์ซึ่งใช้ในการตรวจสอบแสงโพลาไรซ์ที่เวลาใดๆ
- อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ ตัวมอดูเลเตอร์ ซึ่งใช้ในการยึดหดเส้นใยแก้วนำแสงตามแนวยาว ซึ่งใช้หลักการของสนามแม่เหล็กผลักแท่งเหล็กที่ยึดติดกับเส้นใยแก้วนำแสงให้เคลื่อนที่ไปตามจังหวะของสัญญาณที่ใช้ขับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อุปกรณ์การประมวลสัญญาณทางแสงได้ใช้อุปกรณ์เปลี่ยนสัญญาณทางแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าหรือโฟโตนิกโอดเพื่อทำการตรวจรับสัญญาณแสง โดยสัญญาณที่รับจะมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงที่มากกระทบบนโฟโตนิกโอดสัญญาณที่ได้จะแสดงผลทางไฟฟ้า

ผลจากการศึกษาและวิจัยนี้จะทำให้ทราบว่า

- การนำเส้นใยแก้วนำแสงนำแสงชนิดรีกษาสถานะโพลาริซซ์มาใช้เป็นตัวกลางของแสง ทำให้ลดปัญหาและข้อบกพร่องเกี่ยวกับเทคนิคการผลิตและควบคุมทิศทางของแสงโพลาริซซ์ไปได้มากและเส้นใยแก้วนำแสงที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะต้องเป็นเส้นใยแก้วนำแสงชนิดรีกษาสถานะโพลาริซซ์เท่านั้น
- สถานะของแสงโพลาริซซ์ที่ได้จากการศึกษา (ในเชิงทฤษฎี) จะเป็นแสงโพลาริซซ์ชนิดเชิงเส้นซึ่งได้จากการรวมกันของแสงโพลาริซซ์ชนิดวงกลมตามซ้ายและตามขวาโดยที่ทิศทางของมุมอิมพัลส์ของแสงโพลาริซซ์เชิงเส้นนี้สามารถควบคุมได้จากการมอดูเลตความต่างเฟสระหว่างแสงวงกลมทั้งสองผ่านการเปลี่ยนแปลงความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง โดยในส่วนของทฤษฎีการวิเคราะห์อาศัยโจนส์แคลคูลัสซึ่งเป็นคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์แสงโพลาริซซ์เพราะมีความสะดวกในการคำนวณ สำหรับในเชิงปฏิบัตินอกจากจะอาศัยการสังเกตสัญญาณเอาต์พุต โดยตรงแล้วยังอาศัยการวิเคราะห์ผลโดยใช้สโตกส์พารามิเตอร์ เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ออกมาแน่นอนยิ่งขึ้น
- การมอดูเลตเฟสของแสงโดยวิธีการทำให้เส้นใยแก้วนำแสงมีการเปลี่ยนแปลงความยาวเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ เนื่องจากไม่ทำให้เกิดปัญหาเรื่องการบิด โค้งงอของเส้นใยแก้วนำแสง อันอาจจะนำมาซึ่งการสูญเสียสัญญาณแสง และรบกวนสถานะของโพลาริซซ์ของแสงได้
- สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากชุดทดลองจะมีคุณภาพที่ใกล้เคียงกับในส่วนของทฤษฎีดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 แสดงค่า DOP และเอลลิปติกซิตี (e) จากการทดลองเปรียบเทียบกับทฤษฎี

ค่าที่วัด	จากทฤษฎี	จากการทดลอง
DOP	100%	$98.850 \pm 0.124 \%$
e	0	$0.046 \pm 0.008$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ในการนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดคุณสมบัติพื้นผิวของแสงของตัวอย่างโดยใช้เทคนิคเอลลิปโซเมตรีนั้นผลการทดลองที่ได้ จะใกล้เคียงกับค่าจากแหล่งอ้างอิง ดังที่แสดงในตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 แสดงค่าคุณสมบัติทางแสงของตัวอย่างที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับทฤษฎี ที่มุมตกกระทบ  $\phi$  เท่ากับ 75 องศา

ค่าที่วัด	BK7		GaAs		Au	
	ค่าอ้างอิง	ทดลอง	ค่าอ้างอิง	ทดลอง	ค่าอ้างอิง	ทดลอง
n	1.51	$1.51 \pm 0.01$	3.86	$3.77 \pm 0.09$	0.18	$0.14 \pm 0.04$
k	0.00	$0.00 \pm 0.01$	0.20	$0.26 \pm 0.06$	3.10	$2.98 \pm 0.12$
$\psi$	26.980	$27.090 \pm 0.284$	1.910	$2.220 \pm 0.781$	41.630	$42.730 \pm 0.388$
$\cos\Delta$	1.000	$1.000 \pm 0.015$	-0.564	$-0.196 \pm 0.078$	0.300	$0.136 \pm 0.003$

- ในการนำไปประยุกต์วัดค่าการเลื่อนเฟสของผลึกหน่วงเฟสนั้นผลที่ได้ใกล้เคียงกับในส่วนของทฤษฎีดังที่แสดงในตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 แสดงผลการทดลองวัดค่าการเลื่อนเฟสของผลึกหน่วงเฟส

ชนิดที่ทดลอง	ทฤษฎี ( $\cos\Delta$ )	การทดลอง ( $\cos\Delta$ )
QWP	0	$0.018 \pm 0.010$
HWP	-1	$-(0.999 \pm 0.020)$
FWP	+1	$+(0.998 \pm 0.060)$

- เมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดหาแกนเร็วและแกนช้าของผลึกหน่วงเฟสในการทดลองสามารถบอกได้ว่าแกนที่ขนานกับรอยดำหนีจะเป็นแกนเร็วและแกนที่ตั้งฉากกับรอยดำหนีจะเป็นแกนช้า

## 7.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น

ความแตกต่างระหว่างสัญญาณที่ได้จากการทดลองและทฤษฎีเกิดขึ้น โดยสาเหตุหลายประการเช่น คุณภาพของอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ในงานวิจัย รวมถึงข้อจำกัดต่าง ๆ ในการปรับค่ามุมของอุปกรณ์ทางแสงไม่ละเอียดพอหรือการปรับแต่งมุมที่ไม่เหมาะสมซึ่งอาจทำให้แสงมีความเป็นโพลาไรซ์น้อยลง ซึ่งเป็นสาเหตุให้ผลการทดลองต่างจากทฤษฎี

ตัวมอดูเลเตอร์ที่ใช้เป็นการพัฒนาจากปมลมที่ใช้กับตู้เลี้ยงปลาซึ่งอาจมีผลทำให้การยืดของเส้นใยแก้วนำแสงบางครั้งไม่เสถียรคือพอซึ่งอาจเป็นผลมาจากค่าฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) อีกทั้งยังไม่สามารถที่จะใช้กับสัญญาณที่เป็นรูปแบบอื่น เช่น สัญญาณรูปสามเหลี่ยมเป็นต้น ซึ่งยังต้องพัฒนาต่อไปอีก

โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณยังไม่ละเอียดพอ อันเนื่องมาจากสัญญาณที่ได้จากชุดทดลองนี้เป็นสัญญาณที่เป็นแอนะล็อก เมื่อใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์ผลที่ได้นี้จะต้องทำการแปลงสัญญาณนี้ให้เป็นสัญญาณดิจิทัลก่อน ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงสัญญาณนี้มีความละเอียดน้อย ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของปัญหาที่เกิดขึ้น และเกิดจากตัวโปรแกรมที่ใช้ด้วยสาเหตุจากผู้เขียนเองซึ่งยังต้องพัฒนาต่อไป

## 7.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

แนวทางหนึ่งที่น่าสนใจในการนำเทคนิคการควบคุมทิศทางของแสงโพลาไรซ์ด้วยวิธีการมอดูเลตเฟสของแสงโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางทางแสงไปใช้ประโยชน์คือ การนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านอุปกรณ์ตรวจรู้ (Sensing Device Application) โดยอาศัยหลักการเปรียบเทียบสถานะโพลาไรซ์ของแสงที่แตกต่างก่อนและหลังการตรวจวัด เช่น ใช้ในทางการแพทย์เป็นอุปกรณ์ตรวจหาปริมาณน้ำตาลในเลือดสำหรับผู้ป่วยที่เป็นโรคเบาหวานโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงของสถานะโพลาไรซ์เนื่องจากปริมาณน้ำตาลในเลือดของผู้ป่วย โดยการตรวจวัดผ่านทางตาของผู้ป่วย รวมถึงการประยุกต์ใช้เกี่ยวกับการศึกษาพื้นผิวของฟิล์มบาง โดยนำเทคนิคนี้ไปใช้ร่วมกับวิธีการวัดแบบเอลลิปโซเมตรี

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Ulrich R. "Polarization Stabilization on Single-Mode Fiber." Appl. Phys. Lett., vol. 35, no. 11, 1979. pp. 840-842 .
- [2] Kubota M., Ohara T., Furuya K. and Suematsu Y. "Control on Sing-Mode Optical Fibers." Electron. Lett., vol. 16, 1980. pp. 573 .
- [3] Lefevere H.C. "Single-Mode Fiber Fractional Wave Devices and Polarization Controllers." Electron. Lett., vol. 16, no. 20, 1980. pp. 778-780 .
- [4] Okoshi T., Fukay N. and Kikuchi K. "New Polarization State Control Devices : Rotatable Fiber Cranks." Electron. Lett., vol. 21, no. 20, 1985. pp. 895-896.
- [5] Tatam R.P., Pannell C.N., Jones J.D.C. and Jackson D.A. "Full Polarization State Control Utilizing Linaly Birefringent Monomode Optical Fibre." Journal of Lightwave Technol., vol. LT-5, no. 7, 1987. pp. 980-985.
- [6] Johnson M. and Pannell C.N. "Remote State-of-Polarization Control in Polarization Maintaining Fiber." Optics Communication., vol. 90, 1990. pp. 32-34.
- [7] Heismann F. and Whalen M.S. "Fast Automatic Polarization Control System." IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 4, no. 5, May 1992. pp. 503-505.
- [8] Prat J., Comellas J., and Junyent G. "Experimental Demonstration of an All-Fiber Endless Polarization Controller Based on Faraday Rotation." IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 7, no. 12, December 1995. pp. 1430-1432.
- [9] Hecht E. Optics. New York : Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1987.
- [10] John M. Optical Fiber Communications. Second Edition. New York : Prentice - Hall, Inc. 1992.
- [11] Harland G. A User's Guide to Ellipsometry. New York : Academic Press, Inc. 1993.
- [12] David S., James W. and Cora E.R. Polarized Light In Optics And Spectroscopy. New York : Academic Press, 1990.
- [13] Singher L., Brunfeld A. and Shamir J. "Ellipsometry with a Stabilised Zeeman Laser." Applied Optics., vol. 29, 1990. pp. 2405-2408.

- [14] Azzam RMA. and Bashara NM. *Ellipsometry and Polarised Light*. North Holland : Publishing company, 1977.
- [15] Varnham M.P., Barlo A.J., Payne D.N., and Okamoto K. "Polarimetric Strain Gauges Using High Birefringence Fiber." *Electron. Lett.*, vol. 19, no.17, August.1983. pp. 699-700.
- [16] Chiang K.S., Wong D., and Chu P.L. "Strain- Induced Birefringence in a Highly Birefringent Optical Fiber." *Electron. Lett.*, vol. 26, no. 17, Aug. 1990. pp. 1344-1346.
- [17] Noda J., Okamoto K., and Sasaki Y. "Polarization-Maintaining Fibers and Their Applications." *Journal of Lightwave Technol.*, vol. LT-4, no. 8, Aug. 1986. pp. 1071-1089.
- [18] Martens G. "Fiber Optic Photoelastic Sensors." *International Journal of Optoelectronics.*, vol. 7, no.3, 1986. pp. 385-393.
- [19] Chitaree R. "An optical Fiber Based Polarization Modulation Technique: Development and Applications." A Thesis Submitted to City University for Degree of Doctor of Philosophy in Electrical and Electronic Engineering. 1994.
- [20] Green P.E. *Fiber Optic Networks*. New York, Prentice Hall, 1993.
- [21] Zbar B., Malvino P. and Miller A. *Basic Electronics A Text-Lab Manual*. Macmillan, McGraw-Hill, 1994.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. Helium Neon Laser

การหาแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงก็คือ ความเข้มของแสงต้องมีกำลังที่เหมาะสมเพื่อสามารถที่จะใช้ในงานวิจัยได้ ความยาวของคลื่นแสงที่ให้ออกมา และมีความเป็นโพลาไรซ์เชิงเส้นของแสงที่เหมาะสม รวมถึงเสถียรภาพในการใช้งาน ต้องดีพอสมควร ซึ่งข้อมูลต่างๆ ของฮีเลียมนีออนเลเซอร์ที่ใช้มีดังนี้

### Specifications

Laser Type:	Helium Neon
Class Laser:	II
Minimum Output:	0.5 mV
Wavelength:	632.8 nm
Beam Diameter:	0.48 mm
Beam Divergence:	1.70mrad
Beam Pointing Stability:	< 0.10 mrad (25°)
Polarization:	linear (500:1)
Operating Current:	82 mA

## 2. BPX 65 high speed photodiode

การเลือกใช้พิน โฟโอดีโอดสำหรับงานวิจัยนี้ประการแรกต้องคำนึงถึงก็คือช่วงความยาวคลื่นที่ตอบสนองจะต้องมีความสัมพันธ์กับแหล่งกำเนิดแสงที่นำมาใช้งาน ผลของการเปลี่ยนแปลงกระแสเนื่องจากอุณหภูมิมีค่าสูง ความไวในการตอบสนองสัญญาณทางแสงต้องมีการตอบสนองต่อสัญญาณทางแสงที่เข้ามาอย่างรวดเร็ว และช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานจะต้องอยู่ในช่วงที่กว้างเพื่อที่จะสามารถนำไปใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ตัวอย่างของข้อกำหนดทางเทคนิคสามารถดูได้จากข้อมูลข้างล่างดังนี้

### Absolute maximum ratings

At +25° (unless stated)

Reverse voltage  $V_R$

50 V

Forward current  $I_F$

10mA

(200mA pulsed 1  $\mu$ s 1% duty cycle)

Operating temperature range

-25°C to +70°C

Storage temperature range

-55°C to +125°C

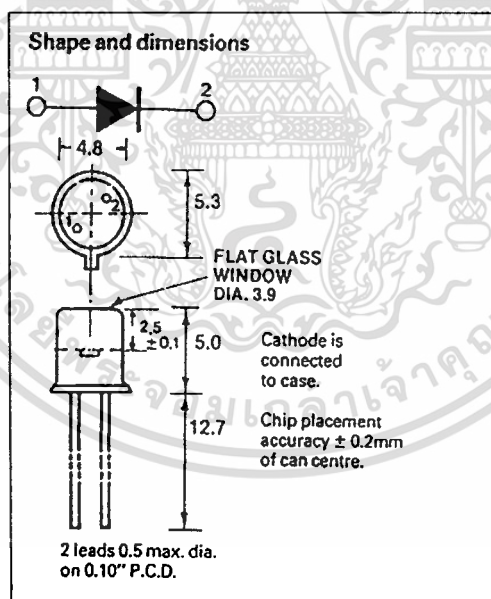
Junction temp.  $T_J$

+125°C

Power dissipation  $P_d$

250mW

(derate linearly 2.5 mW/°C above +25°C)



รูปแสดงลักษณะรูปร่างของฟิโนโต้ไดโอด

Electrical characteristics at +25°C (unless stated)

	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
A	Radiant sensitive area			1		Mm <sup>2</sup>
$\lambda_{s \text{ max.}}$	Wavelength of max. sensitivity			850		Nm
$R_e$	Responsivity	$\lambda = 450\text{nm}$		0.2		A/W
		$\lambda = 900\text{nm}$		0.55		A/W
		$\lambda = 1064\text{nm}$		0.15		A/W
$t_r$	Response time (10-90% levels)	$R_L = 50\Omega; V_R = 20V; \lambda = 900\text{nm}$		0.5	1	Ns
$C_0$	Capacitance $V_R = 0V$			15		PF
$C_1$	$V_R = 1V$			12		PF
$C_{20}$	$V_R = 20V$			3.5		PF
$f_f$	Cut-off frequency			500		MHz
$I_p$	Dark current	$V_R = 20V; \text{Dark } (E=0)$		1	5	NA
S	Spectral sensitivity	$V_R = 20V; \text{ see Note 1}$	7	10		NA/L <sub>x</sub>
NEP	Noise equivalent power	$V_R = 20V$		$3.6 \times 10^{-14}$		W/ $\sqrt{\text{Hz}}$

Note 1. The illuminance indicated refers to unfiltered radiation of a tungsten filament lamp at a colour temperature of 2856K (standard light A in accordance with DIN 5033 and IEC publ. 306-1)

### 3. ET-PCDIO

เป็นการ์ดที่ใช้เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ PC เพื่อให้รับสัญญาณอินพุตหรือให้สัญญาณเอาต์พุตออกมาได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้นำการ์ดชนิดนี้มาใช้ในการรับสัญญาณในรูปของสัญญาณแอนะล็อก แล้วแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล ซึ่งการ์ดที่ใช้จะติดตั้งเข้าไปที่ตัวคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะขอกกล่าวถึงรายละเอียดในส่วนที่ใช้งานเท่านั้นซึ่งมีดังนี้

ไอซี ADC (Analog to digital Converter) จำนวน 1ตัว ซึ่งเลือกใช้เบอร์ ADC0804 (8บิต) และเวลาในการแปลงสัญญาณ 100  $\mu\text{s}$  ซึ่งทำให้การ์ดนี้สามารถประยุกต์ใช้ในงานการตรวจจับหรือการวัดสัญญาณหรือรับสัญญาณอินพุตในรูปของสัญญาณแอนะล็อกได้ 1 ช่องสัญญาณ ซึ่งขนาดของสัญญาณ แอนะล็อกที่รับเข้ามาสามารถที่จะรับได้โดยตรงสูงถึง 5 VDC ทำให้ ET-DIO สามารถประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือวัดสัญญาณต่าง ๆ ได้มากมายเช่น เครื่องวัดแรงดัน เครื่องวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแส เครื่องวัดอุณหภูมิ เครื่องวัดความต้านทาน ซึ่งผลของการวัดแบบต่าง ๆ สามารถที่จะเก็บข้อมูลหรือแสดงผลในรูปแบบอื่น ๆ ได้ตามต้องการ โดยผู้ใช้เขียน โปรแกรมควบคุมเอง

การใช้งานไอซี ADC0804 เป็นไอซีทำหน้าที่รับสัญญาณอินพุตในรูปแบบของแอนะล็อกแล้วเปลี่ยนเป็นดิจิตอล เพื่อส่งให้ CPU ประมวลผล ซึ่งสามารถที่จะประยุกต์ใช้งานในการเชื่อมต่อ (Interface) กับอุปกรณ์ภายนอกที่ให้สัญญาณเป็นแอนะล็อก ซึ่ง ET-DIO CARD สามารถรับสัญญาณแอนะล็อกได้โดยตรงถึง 5 VDC ซึ่งขนาดสัญญาณแอนะล็อกที่รับเข้ามานั้น สามารถกำหนดแถบกว้าง (Range) ของสัญญาณได้โดยการควบคุมขนาดของ  $V_{in(-)}$  และ  $V_{ref}/2$  ซึ่ง  $V_{in(-)}$  จะเป็นตัวกำหนดจุดเริ่มต้นหรือค่าต่ำสุดของสัญญาณที่รับเข้ามาโดยบน ET-DIO CARD ถ้าเลือกต่อกับ Ground จะทำให้สัญญาณเริ่มต้นจาก 0V จนถึงสูงสุด (ไม่ควรเกิน 5V) ส่วน  $V_{ref}/2$  จะเป็นตัวกำหนดขนาดสูงสุดของสัญญาณที่รับเข้ามา (Maximum)

ตัวอย่างเช่น เลือก  $V_{in(-)}$  เท่ากับ 0V และเลือก  $V_{ref}/2$  เท่ากับ 2.50V แล้วจะได้ว่าช่วงของสัญญาณแอนะล็อกอินพุตจะต้องอยู่ระหว่าง 0V-5V เท่านั้นซึ่งความละเอียดของแต่ละช่วงสัญญาณที่รับเข้ามามีความละเอียดถึง 256 ระดับ นั่นคือ

$$\begin{aligned} \text{ความละเอียดของสัญญาณ} &= (5V-0V) / 256 \\ &= 0.0195 \text{ V} \end{aligned}$$

#### 4. Waveplates (Retarders)

การเลือกใช้ผลึกหน่วงเฟสชนิดหนึ่งในสี่ช่วงคลื่น ( $\lambda/4$ ) และครึ่งช่วงคลื่น ( $\lambda/2$ ) ในงานวิจัยนี้ทั้งคำนึงถึงก็คือความยาวช่วงคลื่นที่ใช้งาน ชนิดของวัสดุที่เป็นโครงสร้าง ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน รวมถึงคุณภาพและตำแหน่งของแกนเร็วและแกนช้าของผลึกหน่วงเฟสที่ใช้งาน ซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

#### Specifications

Temperature Coefficient :

Multiple Order                      0.0015 $\lambda$ /Deg.C (Design Temp. 20<sup>0</sup> C)

Recommended Energy Limits :      500MW/cm<sup>2</sup> in 5ns pulse  
2MW/cm<sup>2</sup> CW

Material :                                  Quartz, Single-Crystal

Wavelength :                              632.8 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wavefront Distortion :	1/10 Wave
Parallelism :	0.5 Second
Surface Quality :	20-10
AR Coating :	Less than 0.25% per surface
Diameter :	25.4 mm
Clear Aperture :	15 mm
Thickness :	8 mm

ตำแหน่งแกนเร็วและแกนช้าของผลึกหน่วงเฟสที่ใช้ดังแสดงในรูปข้างล่างนี้



## 5. Photoelastic Material

เป็นวัสดุที่สามารถเกิดปรากฏการณ์ไบรฟรินเจนซ์ได้เมื่อถูกแรงมากระทำหรือเกิดความเค้นขึ้นในเนื้อวัสดุนั้น โดยในแต่ละแกนหลักมีค่าดัชนีหักเหเป็น  $n_x$ ,  $n_y$  และ  $n_z$  ซึ่งมีความสัมพันธ์กับหลักการให้แรงเค้นสามารถเขียนได้ดังนี้

$$n_x = n_0 + C_1\sigma_x + C_2(\sigma_y + \sigma_z) \quad (ก-1)$$

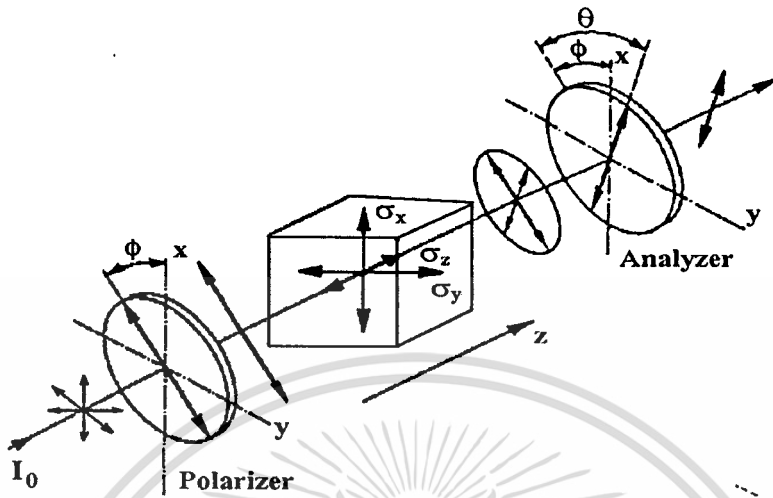
$$n_y = n_0 + C_1\sigma_y + C_2(\sigma_z + \sigma_x) \quad (ก-2)$$

$$n_z = n_0 + C_1\sigma_z + C_2(\sigma_z + \sigma_y) \quad (ก-3)$$

$n_0$  คือ ค่าดัชนีหักเหในขณะไม่มีแรงเค้นไปกระทำ  $C_1$  และ  $C_2$  เป็นสัมประสิทธิ์ของโฟโตอีลาสติก  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  และ  $\sigma_z$  เป็นส่วนประกอบของแรงเค้นในแนวแกนทั้งสาม

ในรูปข้างล่างนี้ แสงที่ไม่เป็นโพลาไรซ์ถูกส่งผ่านโพลาไรเซอร์ทำให้ได้แสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้น ซึ่งทำมุมกับแกน x เป็นมุม  $\phi$  และเมื่อผ่านเข้าไปในตัววัสดุองค์ประกอบของเวกเตอร์แสงในแนว x และ y จะมีผลต่างของความเร็วแสงเป็น  $V_x = cn_x$  และ  $V_y = cn_y$  ซึ่งเป็นตัวกำหนดผลต่าง

ของค่าดัชนีหักเห  $n_x$  และ  $n_y$  ( $c$  เป็นความเร็วของแสงในสุญญากาศ) เมื่อผ่านวัสดุผลต่างของส่วน  
ประ



รูปแสดงการจัดชุดทดลองวัสดุโฟโต้เอลาสติก โดยการให้แรงเค้น

กอบทั้งสองของแสงจากการทดลองเป็น  $\Delta\delta$  ซึ่งในกรณีที่แรงเค้นไม่ได้เป็นอย่างเดียวกันตลอด  
เพราะฉะนั้นเขียนสมการได้โดย

$$\Delta\delta = \int_1 (n_x - n_y) dz \quad (ก-4)$$

ความสัมพันธ์ของแรงเค้นจากสมการ (ก-1) และ (ก-2) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\Delta\delta = \int_1 (\sigma_x - \sigma_y) dz \quad (ก-5)$$

$$C = C_1 - C_2 \quad (ก-6)$$

โดย  $C$  คือความสัมพันธ์กับค่าคงที่ของโฟโต้เอลาสติก 1 คือระยะทางที่แสงเดินทางในตัวกลาง และ  
ผลต่างของ  $\Delta\delta$  ขึ้นกับ  $\sigma_x$  และ  $\sigma_y$  ส่วนประกอบของ  $\sigma_z$  ซึ่งขนานกับการเคลื่อนที่ของแสงจะไม่มี  
ผลต่อการเปลี่ยนแปลง

เมื่อกำหนดให้  $\delta$  ผลต่างของทางเดินของแสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้น และแอนะโรเซอร์ซึ่ง  
จัดให้มีมุม  $\theta$  กับโพลาไรเซอร์ ส่วนประกอบของแสงในกรณีที่เป็นการผสมของแสง  $I(\phi, \theta)$  ซึ่ง  
ผ่านแอนะโรเซอร์เขียนได้เป็น

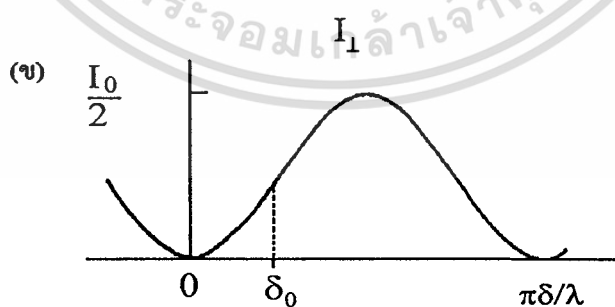
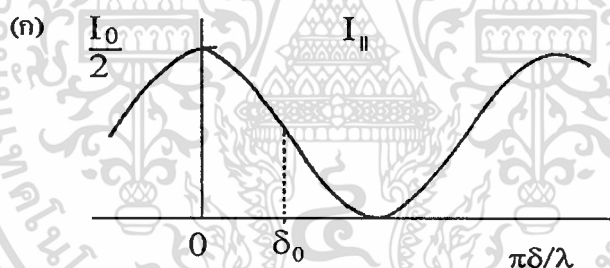
$$I(\phi, \theta) = \frac{I_0}{2} \{ \cos^2 \theta - \sin 2\phi \sin[2(\phi - \theta)] \sin^2(\pi G / \lambda) \} \quad (\text{ก-7})$$

เมื่อ  $\lambda$  เป็นความยาวของคลื่นแสงในสุญญากาศ โดยที่ความเข้มของแสงนี้จะขึ้นกับค่าความแตกต่างของทางเดินของแสง  $\delta$  (Path Difference) และเมื่อให้ความเค้นที่ต่างกันโดยที่  $\phi = 45$  องศา และ  $\theta = 0$  หรือ  $90$  องศา ในแนวขนานและแนวตั้งฉากของแอนะไรเซอร์ ในกรณีนี้สมการ (ก-7) จะเขียนได้เป็น

$$I_{\parallel} = \frac{I_0}{2} \cos^2(\pi\delta / \lambda) \quad (\text{ก-8})$$

$$I_{\perp} = \frac{I_0}{2} \sin^2(\pi\delta / \lambda) \quad (\text{ก-9})$$

เมื่อ  $\delta$  เท่ากับ  $\delta_0 + \Delta\delta$  ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ของความเข้มแสงที่ได้ดังนี้



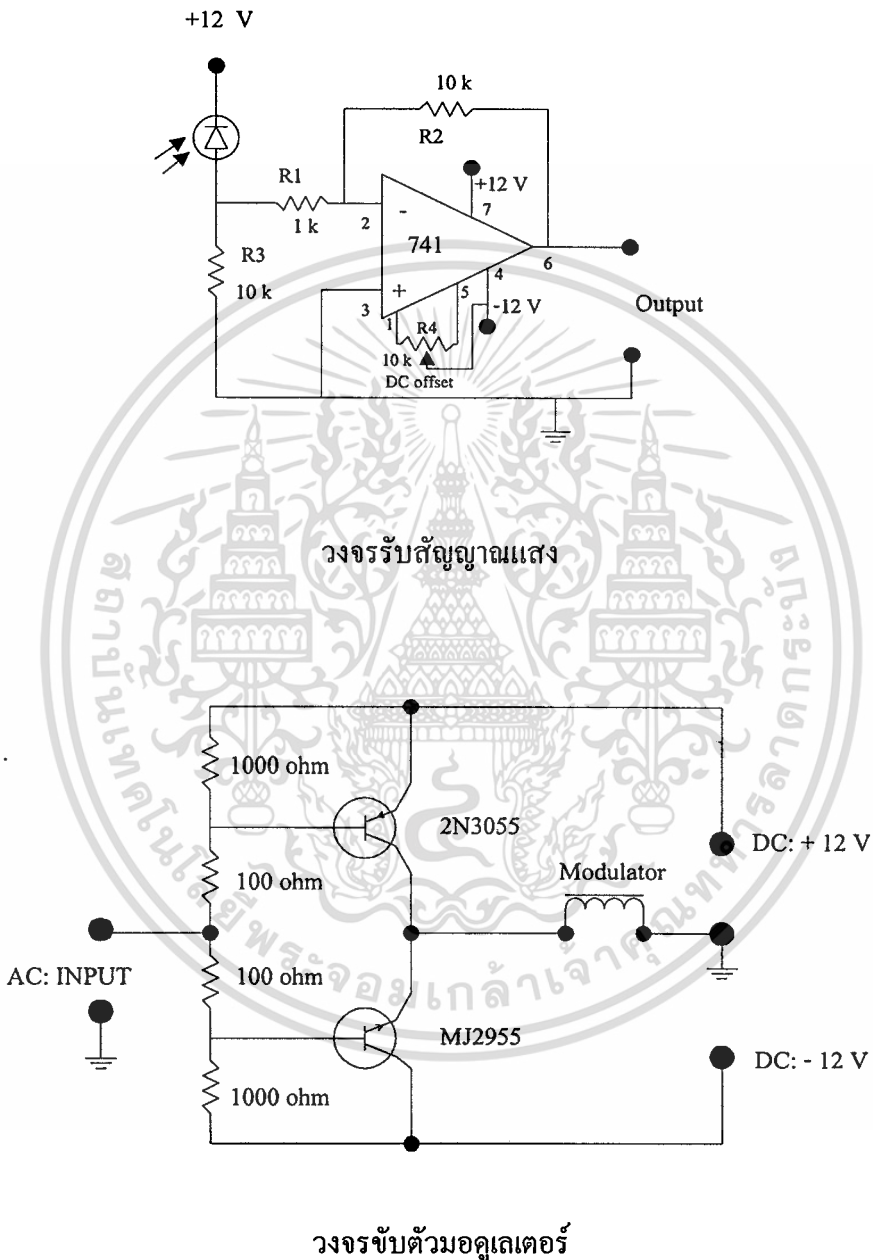
รูปแสดงความเข้มของแสงในกรณีขนานและตั้งฉากของแอนะไรเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

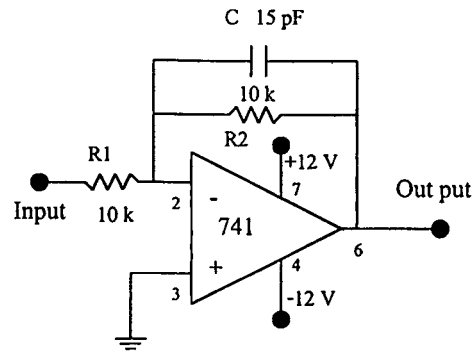


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

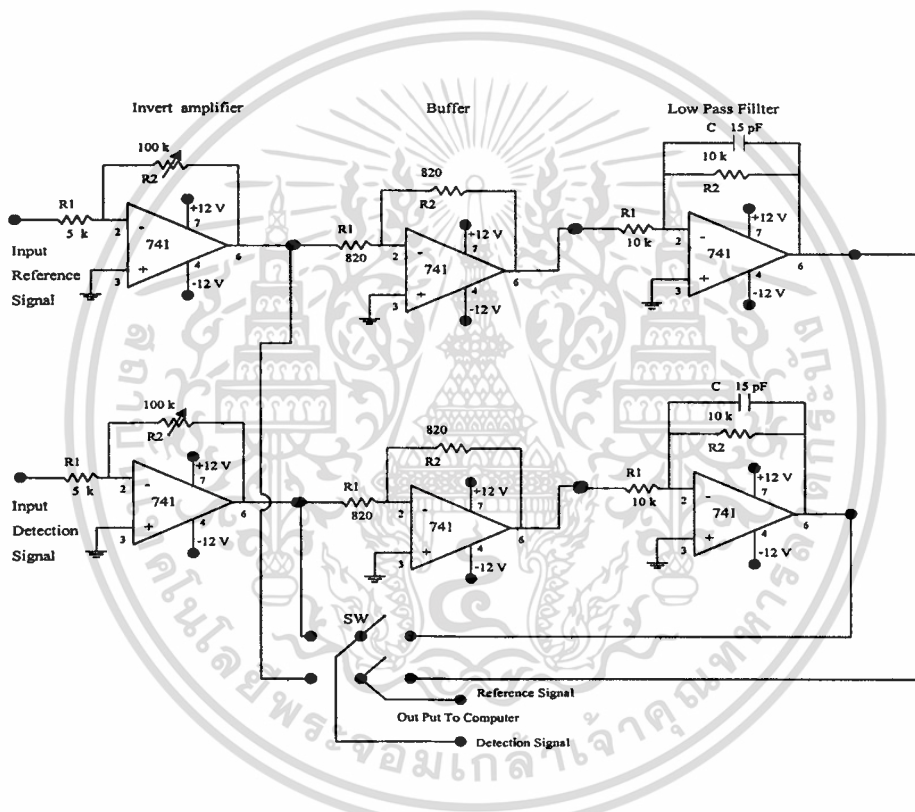
ในภาคผนวก ข. นี้จะกล่าวถึงวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย วงจรรับสัญญาณแสง วงจรขับตัวมอดูเลเตอร์ วงจรกรองความถี่ (Low pass filter) วงจรรับสัญญาณที่ได้จากชุดทดลองที่เป็นสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณ Detection เพื่อใช้กับคอมพิวเตอร์ผ่านการ์ด ET-PCDIO โดยจะกล่าวถึงเป็นลำดับดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



วงจรกรองความถี่ต่ำ



วงจรที่ใช้รับสัญญาณที่ได้จากชุดทดลองที่เป็นสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณที่เป็นสัญญาณตรวจสอบ เพื่อใช้เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านการ์ด ET-PCDIO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายชื่องานวิจัยหลัก

1. Suebtarkul Suchat, Ratchapak Chitaree, **The measurement of ellipsometric parameters of various surfaces using a highly birefringent fiber polarization**, J. Science and Technology, Thammasat University, vol. 5, No.2, 1997, pp. 47-58.
2. R. Chitaree, S. Suchart, **Study of Optical Modulation Using Polarization Preserving Fiber**, J. Engineering Transactions, Mahanakorn University of Technology, vol.1, No.3, 1998, pp.219-229.
3. S. Suchart, R. Chitaree, **A Novel Optical Fiber Ellipsometer**, The 1998 IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems, Chiangmai, Thailand, pp. 205-208.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**การวัดค่าอติลิปโซเมตริกพารามิเตอร์ของพื้นผิวที่แตกต่างกันโดยใช้เทคนิคการมอดูเลตเฟส  
ของแสงซึ่งมีเส้นใยแก้วนำแสงชนิดไฮไบรฟ์รินเจนซ์เป็นตัวกลาง**

**The measurement of ellipsometric parameters of various surfaces using a highly  
birefringent fiber polarization modulation technique.**

ตีพิมพ์โดย สุชาติ และ รัชภาภย์ จิตต์อารี\*\*

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคการมอดูเลตเฟสของแสง ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งของการผลิตและความคุมแสง ให้มีสถานะโพลาไรซ์ตามต้องการ มาใช้ในงานทางด้านการวัดคุณสมบัติทางแสงของพื้นผิวที่สนใจ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดคริสตสถานะโพลาไรซ์ (Highly Birefringent Fiber) เป็นตัวกลางของแสง และทำการมอดูเลตเฟสของแสงโดยการบิดหัดเส้นใยแก้วนำแสงตามแนวยาวด้วยมอดูเลเตอร์ โดยใช้ความถี่ในการบิดหัดคงที่ จากการทดลองนี้พบว่าสัญญาณแสงที่ได้จากการมอดูเลตเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น ที่มีมุมอซิมุท (azimuth) ควบคุมได้ ซึ่งสามารถนำสัญญาณแสงที่ได้นี้ไปทำการวัดคุณสมบัติทางแสง เช่น ค่าดัชนีหักเห สัมประสิทธิ์ของการสะท้อน ค่าอติลิปโซเมตริกพารามิเตอร์ ฯลฯ ของพื้นผิวต่างชนิดกันได้ เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้กับทฤษฎี แล้วพบว่ามีความคล้อยอยู่ในเกณฑ์ดี

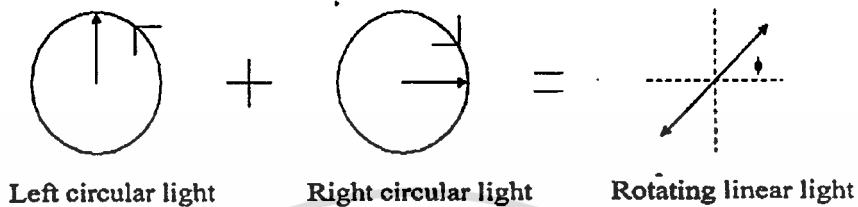
\* ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121

\*\* ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

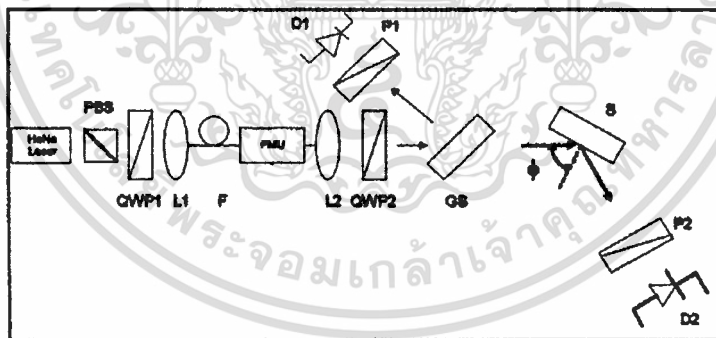
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการศึกษา เริ่มจาก ใช้หลักการรวมกันของแสงโพลาไรซ์สถานะวงกลม ซึ่งมีปลายเวกเตอร์  
 ฟิลด์ของสนามไฟฟ้ากวาดไปในทิศทางตรงกันข้าม (ทวนเข็มนาฬิกาและตามเข็มนาฬิกา) ทำให้ได้ผลเป็น  
 แสงโพลาไรซ์สถานะเชิง มีมุม azimuth  $\phi$  ขึ้นกับความต่างเฟส ระหว่างสถานะวงกลมทั้งสอง ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงการรวมกันของแสงโพลาไรซ์วงกลมโดยให้ผลออกมาเป็นแสงโพลาไรซ์สถานะเชิง  
 เส้นซึ่งมีมุม azimuth เป็น  $\phi$

ในการมอดูเลตนี้ใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาไรซ์เป็นตัวกลางของแสง โดยทำการ  
 มอดูเลตให้เกิดความต่างเฟสระหว่างแสงโพลาไรซ์สถานะวงกลมทั้งสองซึ่งมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง  
 ของมุม azimuth ของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่เอาท์พุท (output) ซึ่งสามารถควบคุมได้  
 รูปแบบของการมอดูเลตเฟสของแสงโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางของแสงแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงการจัดชุดการทดลองการมอดูเลตเฟสของแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลาง P1,2  
 : Polarizers ; L1,2 : Lenses ; QWP1,2 : Quarter-Wave Plates; Gs : Glass Slide ; D1,2 : Detectors ;  
 FMU : Fiber Modulation Unit ; F : HiBi Fiber ; S : Sample ; PBS : Polarizing Beam Splitter .

จากรูปที่ 2 ทางค่านอินพุท (input) แสงโพลาไรซ์วงกลมถูกส่งผ่านเข้าไปในเส้นใยนำแสงซึ่งได้รับการออกแบบเพื่อให้ความต่างเฟสของแสงซึ่งเคลื่อนที่ใน eigenaxes ทั้งสองเปลี่ยนแปลงตามเวลา ที่เอาต์พุท แสงทั้งสองถูกเปลี่ยนให้มีสถานะโพลาไรซ์วงกลมหมุนทวนและตามเข็มนาฬิกา (ได้จากการปรับ QWP ให้มีทิศทางของ optic axis ที่เหมาะสม) ซึ่งเมื่อแสงวงกลมทั้งสองรวมกันจะเป็นแสงโพลาไรซ์สถานะเชิงเส้น โดยการเปลี่ยนแปลงความต่างเฟสระหว่างลำแสงทั้งสองด้วย FMU ทำให้สามารถควบคุมมุม azimuth ของแสงเอาต์พุทได้

การพิจารณาโดยใช้รูปแบบทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเสนอโดย Jones (Jones,1941) ของสัญญาณเอาต์พุท ( $\vec{E}_{output}$ ) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\vec{E}_{output} = Q_{\theta} M \vec{E}_{input} \quad (1)$$

เมื่อ  $\vec{E}_{input}$  แสดงเวกเตอร์สนามไฟฟ้าของลำแสงอินพุท M แสดง modulator matrix และ  $Q_{\theta}$  เป็น Jones matrix สำหรับ quarter-wave plate ซึ่งทำมุม  $\theta$  กับแกนของเส้นใยแก้วนำแสง

กำหนดให้แสงจาก HeNe laser เขียนแทนได้ด้วย Jones vector ดังนี้

$$\vec{E}_{input} = \frac{E_0}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} e^{i\omega_0 t} \quad (2)$$

โดยที่

$E_0$  คือ แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า

$\omega_0$  คือ ความถี่เชิงมุม

$t$  คือ เวลา

โดยลำแสงเคลื่อนที่ผ่านส่วนประกอบต่างๆ ตามลำดับ (ตามรูปที่ 2) ในที่นี้ QWP2 ทำมุม  $45^\circ$  กับแกนของเส้นใยนำแสง และจากสมการที่ (1) แสงเอาต์พุท สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} \vec{E}_{output} &= Q_{+45^\circ} (M) (\vec{E}_{input}) \\ &= \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\Delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \frac{E_0}{2} e^{i\omega_0 t} \end{aligned} \quad (3)$$

เมื่อ

$\begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix}$  คือ Jones matrix สำหรับ Quarter-wave plate ซึ่งมี fast axis ทำ

มุม  $45^\circ$  กับแกนของเส้นใยแก้วนำแสง

$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\Delta} \end{bmatrix}$  คือ Pseudo Jones matrix (Tatam et al. (1987)) สำหรับ

เส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาไรซ์ ซึ่งถูกออกแบบ

ทำให้เฟสของแสงในแนวแกนที่ตั้งฉากกันมีความแตกต่างเท่ากับ  $\Delta$

ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่เอาท์พุท เขียนได้ดังนี้

$$\vec{E}_{\text{output}} = \begin{bmatrix} \cos \frac{1}{2} \left( \Delta + \frac{\pi}{2} \right) \\ \sin \frac{1}{2} \left( \Delta + \frac{\pi}{2} \right) \end{bmatrix} E_0 e^{i(\omega_0 t + \gamma)} ; \gamma = \frac{1}{2} \left( \Delta + \frac{\pi}{2} \right) \quad (4)$$

ซึ่งเป็นแสงโพลาไรซ์สถานะเชิงเส้น ที่สามารถควบคุมมุม azimuth ผ่านการเปลี่ยนแปลงของ  $\Delta$  เนื่องจากการมอดูเลต

เอาท์พุทของแสงที่ออกมาจะถู กวักออกมาในรูป ปรของความเข้มแสงโดยใช้อุปกรณ์รับแสง (photodetector) ความเข้มของเอาท์พุทหาได้จาก

$$I_{\text{output}} = (\vec{E}_{\text{output}}) \cdot (\vec{E}_{\text{output}})^* \\ = I_0 \quad (5)$$

เมื่อ  $I_0 = |E_0|^2$  ค่าคงที่ และ  $(\vec{E}_{\text{output}})^*$  คือคอนจูเกต (conjugate) ของ  $(\vec{E}_{\text{output}})$

ดังนั้นการวัดสัญญาณเอาท์พุทหลังจาก Quarter-wave plate จะได้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ถ้านำ Analyzer เข้ามาก่อน Photodetector การส่งผ่านสนามไฟฟ้าจะกลายเป็น

$$\vec{E}_{\text{analyzer}} = A_\theta \vec{E}_{\text{output}} \\ = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta \cos \frac{1}{2} \left( \Delta + \frac{\pi}{2} \right) + \cos \theta \sin \theta \sin \frac{1}{2} \left( \Delta + \frac{\pi}{2} \right) \\ \cos \theta \sin \theta \cos \frac{1}{2} \left( \Delta + \frac{\pi}{2} \right) + \sin^2 \theta \sin \frac{1}{2} \left( \Delta + \frac{\pi}{2} \right) \end{bmatrix} E_0 e^{i(\omega_0 t + \gamma)} \quad (6)$$

เมื่อ

$A_\theta$  คือ Jones matrix สำหรับ analyzer ที่ทำมุม  $\theta$  ใดกับแกนอ้างอิง

$$= \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix}$$

ดังนั้น ความเข้มหลังจากผ่าน analyzer เขียนได้เป็น

$$I_{\text{analyzer}} = (\vec{E}_{\text{analyzer}}) \cdot (\vec{E}_{\text{analyzer}})^* \\ = \frac{I_0}{2} [1 + \cos\{2\theta - (\Delta + \frac{\pi}{2})\}] \quad (7)$$

สัญญาณเอาท์พุทที่แสดงนี้เป็นฟังก์ชันของมุมที่ทำกับ analyzer ( $\theta$ ) และ modulation phase ( $\Delta$ ) จากสมการที่ (7) สังเกตได้ว่าแอมพลิจูด (amplitude) ของสัญญาณคงที่ในขณะที่เฟสของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไป และผลที่ได้ตามมาก็คือสามารถควบคุมทิศทาง (orientation) ของแสงโพลาไรซ์สถานะเชิงเส้นได้ตามต้องการ

เมื่อนำสัญญาณทางแสงที่ได้ไปวัดค่าทางแสงของพื้นผิวตัวอย่างโดยวัดออกมาในเทอมของ ellipsometric parameters  $\Psi$  และ  $\Delta$  (Azzam, 1977) ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$\Psi = \tan^{-1} \left[ \frac{|r_p|}{|r_s|} \right] \quad (8)$$

$$\Delta = \delta_p - \delta_s \quad (9)$$

เมื่อ  $r_p$  และ  $r_s$  เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนแบบ Fresnel ในแนวขนาน (p) และแนวตั้งฉาก (s) กับระนาบอ้างอิงตามลำดับ เมื่อ  $\delta_p$  และ  $\delta_s$  เป็นการเปลี่ยนเฟสของแสงในแนวขนาน (p) และแนวตั้งฉาก (s) จากการสะท้อนที่พื้นผิวของตัวกลางที่นำมาวัดค่า ในการวัดค่าจะเริ่มจากการจัดอุปกรณ์ในการมอดูเลตเฟสของแสงตามรูปที่ 2 โดยแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้เป็นเลเซอร์แบบฮีเลียมนีออน ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ) สัญญาณเอาท์พุทที่ผ่าน QWP2 จะถูกแยกออกเป็นสองส่วนโดยส่วนหนึ่งนำไปใช้เป็นลำแสงสำหรับอ้างอิง (reference) และอีกส่วนหนึ่งนำไปใช้วัดคุณสมบัติของพื้นผิว การแยกลำแสงดังกล่าวทำได้โดยใช้แผ่นแก้วสไลด์บาง (GS) โดยจัดให้แผ่นแก้วสไลด์ทำมุมประมาณ  $3^\circ$  กับลำแสงที่ตกกระทบ แสงที่สะท้อนจากแผ่นแก้วสไลด์นี้ถูกจัดให้ผ่านโพลาไรซ์เซอร์ (P1) ไปยังตัวรับแสงตัวที่ 1 (photodetector: D1) โดยสัญญาณที่ได้จากตัวรับแสงตัวที่ 1 ถูกใช้เป็นสัญญาณอ้างอิง (reference signal) ส่วนลำแสงหลักที่ทะลุผ่านแผ่นแก้วสไลด์บางไปยังพื้นผิวของ sample ถูกจัดให้มีมุมตกกระทบ ( $\phi$ ) เมื่อเกิดการสะท้อนแสงที่สะท้อนจากพื้นผิวของ sample ถูกส่งผ่านไปยังโพลาไรซ์เซอร์ตัวที่ 2 (P2) ซึ่งจัดให้ทำมุม  $45^\circ$  กับระนาบของการตกกระทบและผ่านต่อไปยังตัวรับแสงตัวที่ 2 (photodetector: D2) โดยสัญญาณที่ได้จาก D2 นี้กำหนดให้เป็น สัญญาณเอาท์พุท การวิเคราะห์ผลการทดลองในเชิงทฤษฎีสามารถดำเนินการได้โดยอาศัย Jones matrix จากสมการที่ (4)

$$\vec{E}_1 = \begin{bmatrix} \cos \phi' \\ \sin \phi' \end{bmatrix} E_0 e^{i\epsilon} \quad (10)$$

เมื่อ  $\phi' = \frac{1}{2} \left( \Delta + \frac{\pi}{2} \right)$  และ  $\epsilon = \omega_0 t + \gamma$  เมื่อแสงตกกระทบ sample Jones vector  $\vec{E}_2$  เขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} \vec{E}_2 &= S \vec{E}_1 \\ &= \begin{bmatrix} r_p \cos \phi' \\ r_s \sin \phi' \end{bmatrix} E_0 e^{i\epsilon} \end{aligned} \quad (11)$$

เมื่อ Jones matrix ของ sample (s) เขียนได้โดย (Singher, 1990)

$$S = \begin{bmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (12)$$

ดังนั้นเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ผ่าน sample ไปยังโพลาริซเซอร์ที่ทำมุม  $\theta$  สัมพันธ์กับระนาบของการตกกระทบสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\vec{E}_{3,\theta} = P_\theta \vec{E}_2 = \begin{bmatrix} r_p \cos\phi' \cos^2\theta - r_s \sin\phi' \cos\theta \sin\theta \\ r_p \cos\phi' \cos\theta \sin\theta - r_s \sin\phi' \sin^2\theta \end{bmatrix} E_0 e^{i\epsilon} \quad (13)$$

เมื่อโพลาริซเซอร์ทำมุม  $45^\circ$  กับระนาบของการตกกระทบจะเขียนสมการที่ (13) ได้เป็น

$$\vec{E}_{3,45^\circ} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} (r_p \cos\phi' - r_s \sin\phi') \frac{E_0}{2} e^{i\epsilon} \quad (14)$$

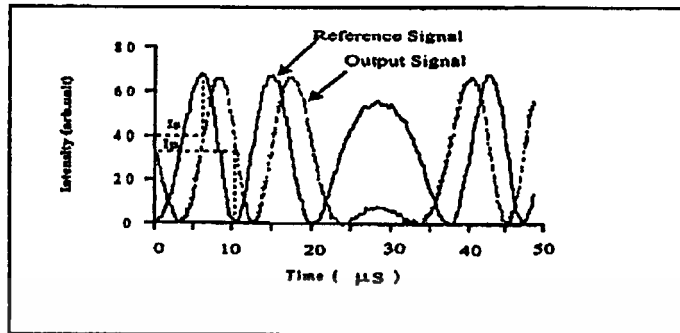
ดังนั้นความเข้มของแสงที่ได้จาก photodetector (D2) คือ

$$I_{45} = \vec{E}_{3,45^\circ} \cdot \vec{E}_{3,45^\circ}^* \\ I_{45} = \frac{I_0}{2} [R_p \cos^2\phi' + R_s \sin^2\phi' - \sqrt{R_p R_s} \sin 2\phi' \cos\Delta] \quad (15)$$

เมื่อ  $I_0$  เป็นค่าคงที่,  $R_p$  และ  $R_s$  เป็นสัมประสิทธิ์ความเข้มของแสงสะท้อนแบบ Fresnel โดยที่  $R_p = |r_p|^2$ ,  $R_s = |r_s|^2$  และ  $\phi'$  เป็นมุม azimuth ของแสงโพลาริซซ์ที่ขึ้นกับเวลาของแสงที่ตกกระทบ

ในการศึกษานี้ sample ที่นำมาใช้แต่ละตัวจะมีคุณสมบัติทางพื้นผิวที่แตกต่างกันในการดูดกลืนแสงที่  $\lambda=632.8$  nm ตัวแรกคือ BK7 เป็นแก้วที่มีคุณสมบัติไม่ดูดกลืนแสง และมีค่าดัชนีหักเหเป็น  $1.51-i0.00$  (คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของ sample แสดงได้ด้วยค่าดัชนีหักเหในส่วนของจำนวนจินตภาพ) ส่วนแผ่น Gallium Arsenide (GaAs) เป็นสารกึ่งตัวนำมีค่าการดูดกลืนทางแสงต่ำ ซึ่งค่าดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงคือ  $3.86-i0.20$  มีประโยชน์ในการทำชิปเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ และทอง (Au) มีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงสูงซึ่งมีค่าดัชนีหักเหคือ  $0.18-i3.10$  ซึ่ง sample ทั้งสามนี้เมื่อทำการทดลองวัดค่าและเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีแล้วจะพบว่าให้ผลที่ใกล้เคียงกันมาก

โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเขียนขึ้นมาเฉพาะสำหรับการทดลองนี้ ทำให้สามารถหาค่า  $I_p$  และ  $I_s$  ออกมาได้ ซึ่งหลักการโดยย่อแสดงได้ตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงสัญญาณที่ได้จากการทดลอง สัญญาณอ้างอิง (reference signal) และสัญญาณเอาต์พุต (output signal) และการหาค่า  $I_p$  และ  $I_s$  โดยอาศัยการพิจารณาเวลา ณ จุดสูงสุดและจุดต่ำสุดของสัญญาณอ้างอิง ซึ่งแสดงถึงเวลาที่ทั้งสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณเอาต์พุต อยู่ในแนวขนานและตั้งฉากกับระนาบของการตกกระทบ

#### การทดลอง

จัดชุดทดลองการมอดูเลตเฟสของแสงโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงตามรูปที่ 2 ในชุดทดลองจะประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออน ซึ่งให้แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ต้องผ่านผลึกแยก/รวมลำแสงชนิดโพลาไรซ์ (PBS : polarizing Beam Splitter) เพื่อให้คุณภาพโพลาไรซ์ของแสงดีขึ้น แผ่นผลึกหน่วงเฟส (Quarter-Wave plate: QWP1) (ทำมาจากผลึก quartz และมี retardation tolerance เท่ากับ  $\lambda/500$ ) ถูกจัดให้แกนของผลึกอยู่ในทิศทางที่เหมาะสมเพื่อที่จะทำให้ลำแสงก่อนที่จะผ่านเข้าสู่เส้นใยแก้วนำแสงมีสถานะของแสงเป็นโพลาไรซ์วงกลมโดยสถานะนี้จะทำให้ปริมาณของแสงที่ผ่านเข้าไปในแกนของเส้นใยแก้วนำแสง (eigenaxes) มีค่าเท่ากัน เส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในงานนี้เป็นชนิดที่สามารถรักษาสถานะโพลาไรซ์ของแสงได้ กล่าวคือค่าไบร์พรีนเจนซ์ของเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าประมาณ  $10^{-4}$  และมีความยาวประมาณ 50 เซนติเมตร การมอดูเลตกระทำได้โดยการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงตามแนวแกนของเส้นใยแก้ว ตามจังหวะของสัญญาณขับที่ป้อนให้กับตัวมอดูเลเตอร์ (modulator) สัญญาณที่ใช้ขับตัวมอดูเลเตอร์นี้เป็นสัญญาณรูปไซน์ ความถี่ประมาณ 20 เฮิรตซ์ (ตัวมอดูเลเตอร์นี้ใช้หลักการของสนามแม่เหล็ก ผลึกให้แกนหลักที่ยึดกับเส้นใยแก้วนำแสงเคลื่อนที่ตามแนวยาวของเส้นใยแก้วนำแสงตามจังหวะการมอดูเลตที่เป็นสัญญาณรูปไซน์) ทางด้าน output แสงที่อยู่ในแนวแกนของเส้นใยแก้วนำแสงที่ตั้งฉากกันจะเคลื่อนที่ผ่านแผ่นผลึกหน่วงเฟสแผ่นที่สอง (QWP2) ซึ่งถูกจัดให้แกนของแผ่นผลึกทำมุม  $45^\circ$  กับแกนของเส้นใยแก้วนำแสง มีผลทำให้แสงที่อยู่ในแต่ละแนวแกนของเส้นใยแก้วนำแสงถูกเปลี่ยนเป็นแสงโพลาไรซ์สถานะวงกลมที่มีทิศทางการกวาดของเวกเตอร์สวนทางกันดัง

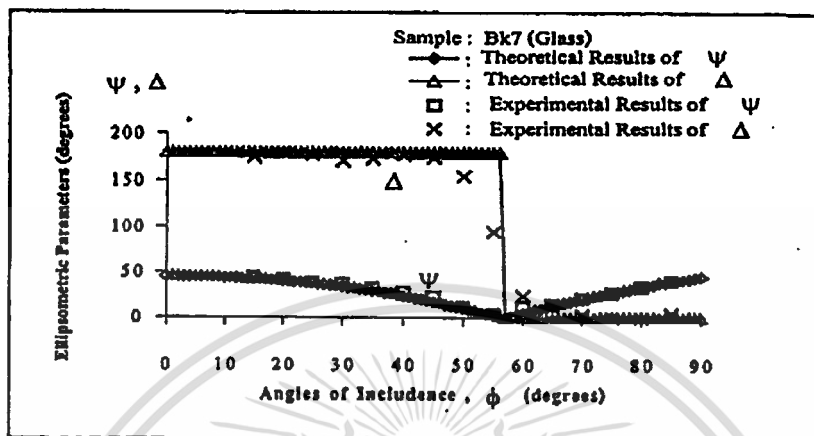
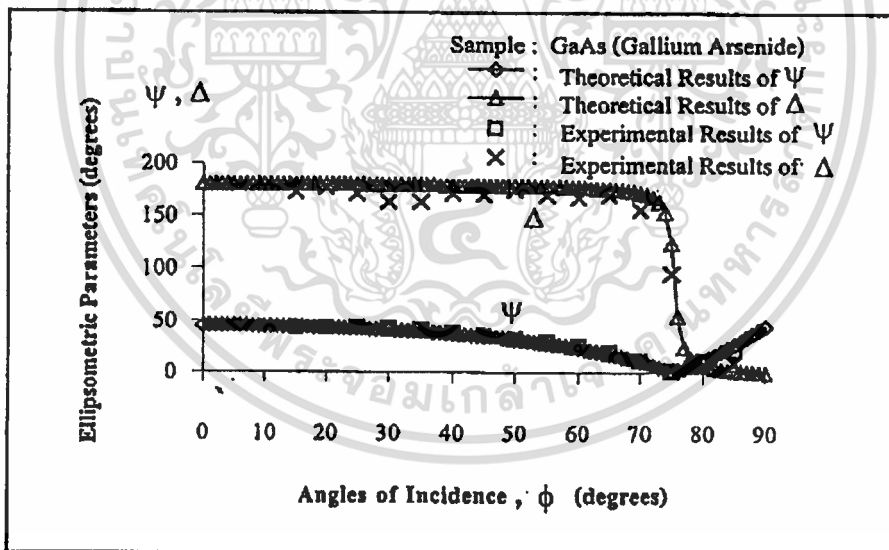
รูปที่ 1 ณ ตรงจุดนี้แสงโพลาไรซ์สถานะวงกลมดังกล่าวก็จะรวมกันทำให้เกิดเป็นแสงโพลาไรซ์สถานะเชิงเส้นซึ่งมีแนวแกนของแสงทำมุม azimuth ค่าหนึ่งกับแกนของเส้นใยแก้วนำแสง และโดยการมอดูเลตเส้นใยแก้วนำแสงดังกล่าวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าไบร์พรีนเจนซ์ (ค่าความแตกต่างระหว่างดัชนีหักเหในแนวแกนของเส้นใยแก้วนำแสง) และความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงเทียบกับเวลา ส่งผลให้เกิดความต่างเฟสระหว่างแสงโพลาไรซ์วงกลมทั้งสองและทำให้แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่ได้มีทิศทางเปลี่ยนแปลงไปตามจังหวะการมอดูเลต เกิดเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นซึ่งสามารถควบคุมได้ จากนั้นลำแสงที่ผ่านแผ่นผลึกหน่วงเฟสอันดับที่ 2 ออกมาจะถูกนำไปแยกลำแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นส่วนหนึ่งออกจากลำแสงหลัก เพื่อใช้เป็นสัญญาณทางแสงสำหรับอ้างอิง ส่วนลำแสงหลักจะนำไปใช้ในการวัดค่าโดยกำหนดให้เป็นสัญญาณเอ๊าท์พุท ในการแยกลำแสงนี้จะใช้แผ่นแก้วสไลด์บาง (GS) เป็นตัวแยก โดยจัดให้แผ่นแก้วสไลด์ทำมุมตกกระทบประมาณ  $3^\circ$  กับระนาบของแสงที่ตกกระทบ แสงที่สะท้อนจากแผ่นแก้วสไลด์ผ่านโพลาไรซ์เซอร์ตัวที่ 1 (P1) และตกลงบนตัวรับแสงตัวที่ 1 (D1) ซึ่งสัญญาณที่ได้จากจุดนี้จะกำหนดให้เป็นสัญญาณอ้างอิง ส่วนลำแสงที่ทะลุผ่านแผ่นแก้วสไลด์ไปตกกระทบพื้นผิวของ sample โดยที่กำหนดให้มุมตกกระทบ ( $\phi$ ) เปลี่ยนไปทีละ  $5^\circ$  จาก  $0-90^\circ$  ส่วนแสงที่สะท้อนจากพื้นผิวของ sample ผ่านโพลาไรซ์เซอร์ตัวที่ 2 (P2) และตกลงบนตัวรับแสงตัวที่ 2 (D2) โดยกำหนดให้เป็นสัญญาณเอ๊าท์พุท สัญญาณที่ได้จากตัวรับแสงทั้งสอง ( สัญญาณอ้างอิง และสัญญาณเอ๊าท์พุท ) ถูกนำไปวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป

ในส่วนของการทดลองได้ทำการวัดค่า  $\Psi$  และ  $\Delta$  สำหรับ sample ต่างชนิดกันซึ่งประกอบไปด้วย แผ่นแก้ว BK7 แผ่น Gallium Arsenide (GaAs) และแผ่นทอง (Au) นอกจากนี้ยังได้นำค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ดังกล่าว ไปคำนวณค่าดัชนีหักเห  $N_1$  ( Tompkins, 1993 ) ของแต่ละ sample ดังแสดงได้ในตารางที่ 1

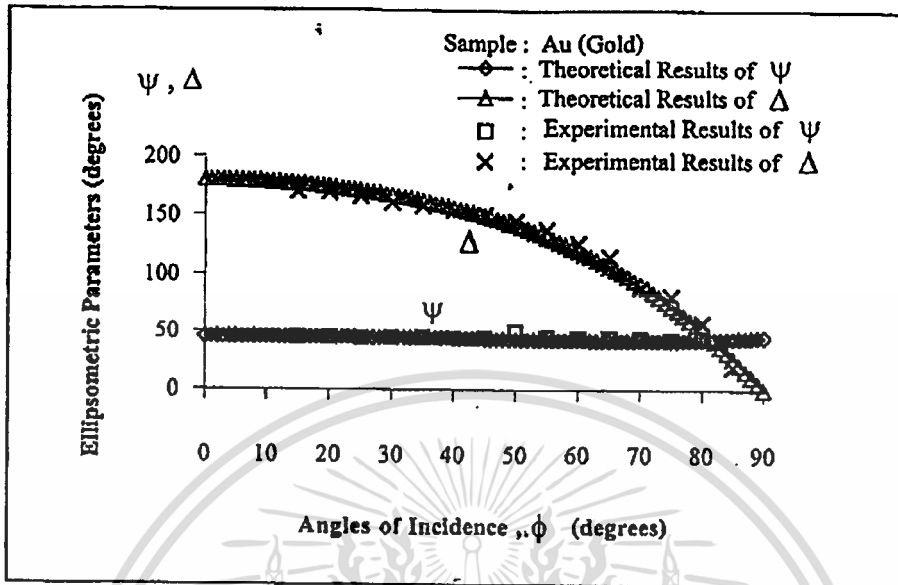
ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $\Psi$ ,  $\Delta$  และ  $N_1$  ระหว่างผลการทดลองและทฤษฎีสำหรับมุมตกกระทบ ( $\phi$ ) =  $75^\circ$

SAMPLE	BK7		GaAs		Au	
	ทฤษฎี	การทดลอง	ทฤษฎี	การทดลอง	ทฤษฎี	การทดลอง
$\Psi$	26.98	27.09	1.91	2.22	41.63	42.73
$\Delta$	0	0	124.32	95.51	72.53	81.14
$N_1$	1.51-i0.00	1.51-i0.00	3.86-i0.20	3.74-i0.27	0.18-i3.10	0.26-i2.92

## ผลการทดลอง

รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $\Psi$  และ  $\Delta$  ของแผ่น BK7 ระหว่างค่าจากการทดลองและทฤษฎีรูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $\Psi$  และ  $\Delta$  ของแผ่น GaAs ระหว่างค่าจากการทดลองและทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $\Psi$  และ  $\Delta$  ของแผ่น Au ระหว่างค่าจากการทดลองและทฤษฎี

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาพบว่าเทคนิคการมอดูเลตเฟสทางแสงนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดค่าทางแสงสำหรับพื้นผิวที่ต่างชนิดกันได้ โดยแสดงค่าทางแสงออกมาในเทอมของ ellipsometric parameters  $\Psi$  และ  $\Delta$

จากการศึกษาพบว่ายังมีความแตกต่างกันอยู่บ้างระหว่างผลการทดลองและค่าในทางทฤษฎี ซึ่งอาจมาจากสาเหตุหลายประการ เช่น คุณภาพของอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ การปรับมุมของอุปกรณ์ต่างๆ ไม่สามารถปรับได้ละเอียดพอเนื่องมาจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ ตลอดจนการวิเคราะห์สัญญาณโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความละเอียดในการอ่านค่าได้น้อย จึงเป็นสิ่งที่ต้องปรับปรุงต่อไป

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับก็คือ สามารถที่จะนำเทคนิคการมอดูเลตเฟสของแสงโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางนี้ไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านการวัดทางแสงอื่นๆ ได้ หรือนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านอุปกรณ์ตรวจรู้ (sensing device applications) โดยอาศัยหลักการเปรียบเทียบสถานะโพลาไรซ์ของแสงที่แตกต่างกันก่อนและหลังการตรวจวัด

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Tatam, R. P., Pannell, C. N., Jones, J. D. C. and Jackson, D. A. 1987. Full Polarisation State Control Utilizing Linearly Birefringent Monomode Optical Fibre, Journal of Lightwave Technology (LT-5) : pp980-985.
- [2] Jones, R.C. 1941. A New Calculus for the Treatment of Optical System. Journal of the Optical Society of America (31) : pp488-493.
- [3] Singher, L., Brunfeld, A. and Shamir, J. 1990. Ellipsometry with a Stabilised Zeeman Laser. Applied Optics (29) : pp2405-2408.
- [4] Harland G. Tompkins. 1993. A User's Guide to Ellipsometry ( New York : Academic Press)
- [5] Azzam, RMA and Bashara, NM. 1977. Ellipsometry and Polarised Light (Amsterdam: North Holland)

### The measurement of ellipsometric parameters of various surfaces using a highly birefringent fiber polarization modulation technique

Suebtakul Suchat Ratchapak Chitaree\*\*

Physic Department, Faculty of Science and Technology, Thammasat University,  
Rangsit Campus, Pathumtani 12121

\*\* Applied Physics Department, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology  
Ladkrabang, Ladkrabang District, Bangkok 10520

### Abstract

The polarization modulation technique, which is considered as a technique for controlling the state of polarization of light, was studied for a potential of the optical measurement on surfaces of interest. In this research, a length of highly birefringent optical fiber was used as light medium. The modulation method was performed by stretching the fiber longitudinally by a modulator with a constant drive frequency. In this study, optical data such as index of refraction, reflection coefficients and ellipsometric parameters of surfaces under study were obtained. The experimental results gained were in good agreement to the corresponding theoretical analysis.

# การศึกษาการมอดดูเลตเฟสของแสงโดยมีเส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลาง

## Study of Optical Modulation Using Polarisation Preserving Fiber

รัชภักย์ จิตต์อารี\* และ ถิ่นตระกูล สุชาติ\*\*

\*ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

\*\*ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ กรุงเทพฯ

E-mail: kcratcha@kmitl.ac.th

### บทคัดย่อ

การผลิตและการควบคุมแสงที่มีสถานะโพลาไรซ์ตามต้องการมีประโยชน์อย่างมากในงานทางด้านการวัดทางแสง เนื่องจากการวิเคราะห์สัญญาณแสงเป็นไปได้อย่างต่อเนื่องและสะดวกรวดเร็ว สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกที่จะทำการผลิตและควบคุมแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นโดยทำการมอดดูเลตเฟสของแสงซึ่งมีเส้นใยนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาไรซ์เป็นตัวกลาง ในการศึกษาครั้งนี้ได้เริ่มจากการวิเคราะห์ผลที่คาดว่าจะได้จากชุดทดลองโดยอาศัย Jones calculus จากนั้นจึงสังเกตผลที่ได้รวมถึงทำการทดลองวัดค่า Stokes parameters ซึ่งเป็นปริมาณที่วัดได้ในทางปฏิบัติเพื่อที่จะสรุปลักษณะของสัญญาณแอมพลิจูดที่ได้ออกมาจากชุดทดลอง จากผลของการศึกษาพบว่าแสงที่ผลิตออกมาจากชุดมอดดูเลตเฟสของแสงโดยมีเส้นใยนำแสงเป็นตัวกลางมีสถานะของโพลาไรซ์ใกล้เคียงกับความเป็นเชิงเส้นตามทฤษฎีเป็นอย่างมาก โดยมี degree of polarisation ประมาณ 98 % และ ellipticity ของแสงโพลาไรซ์ ประมาณ  $10^{-3}$

### ABSTRACT

There are obvious advantages of being able to produce and control the state of polarisation. The advantages include the continuity of the data measurement and speedy acquisition. In this work, a technique of the phase modulation using polarisation maintaining fiber as a light medium is employed. This

allows an experimenter to control the output; a rotating plane polarised beam, to a desired azimuth via the phase modulation. The study started from a theoretical analysis based on Jones calculus. Then, the experimental results were observed and appropriately analysed by ways of Stokes parameters. This was found that the results were satisfactory because the output characteristics were slightly different from the preliminary theoretical analysis. The degree of polarisation of the output was found approximately to be 98% with an ellipticity in the order of  $10^{-3}$ .

**Keywords :** optical modulation, polarisation preserving fiber

### 1. บทนำ

ในงานทางด้านการตรวจวัดสมบัติต่างๆทางแสงของวัสดุ เช่น งานทางด้านการวัดค่า ดัชนีหักเห, ความหนาของฟิล์มบาง สามารถอาศัยหลักการพื้นฐานของการสะท้อนแสงโพลาไรซ์บนผิววัสดุที่ต้องการศึกษา กล่าวคือ ทำการตรวจสอบถึงความแตกต่างระหว่างสถานะของแสงโพลาไรซ์ชุดหนึ่งก่อนและหลังการสะท้อนกับผิววัสดุที่ต้องการศึกษา ซึ่งจากกฎของการสะท้อนของแสงโพลาไรซ์จะพบว่า แสงที่สะท้อนนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งความเข้มและเฟสไปจากแสงตกกระทบที่พื้นผิว โดยการเปลี่ยนแปลงสมบัติทั้งสองของแสงนี้จะสัมพันธ์กับสมบัติทางแสงของผิววัสดุที่สะท้อนแสงนั้นๆ

จากหลักการพื้นฐานดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าในระบบการ

ตรวจวัดสมบัติทางแสงของวัสดุ จะต้องประกอบไปด้วย 3 ส่วนสำคัญ คือ (1) ส่วนของการผลิตแสงโพลาไรซ์ (2) ส่วนของพื้นผิวที่ต้องการศึกษา และ (3) ส่วนของการวัด และการประมวลผลแสงโพลาไรซ์ โดยส่วนที่ได้ถูกเลือกมาเป็นหัวข้อในการวิจัยนี้ก็คือในส่วนของการผลิตแสงโพลาไรซ์ เนื่องจากว่าด้านแสงโพลาไรซ์ที่ถูกผลิตออกมามีคุณภาพดี กล่าวคือมีความเป็นโพลาไรซ์สูง รวมทั้งถ้าเทคนิคที่ใช้ในการสร้างแสงโพลาไรซ์สามารถที่จะทำให้มีการควบคุมสถานะของแสงโพลาไรซ์ได้ง่ายและแม่นยำ ผลที่ตามมาก็คือการดำเนินงานในส่วนที่เหลืออีกสองส่วนก็จะสะดวกยิ่งขึ้น

จากอดีตจนถึงปัจจุบัน ได้มีการพัฒนาและศึกษาถึงวิธีการในการควบคุมหรือมอดูเลตแสงโพลาไรซ์อยู่หลายวิธี เช่น การหมุนปรับ polariser การฉายแสงผ่านตัวกลางประเภท crystal ซึ่งทำหน้าที่เหมือน retardation plate ซึ่งเปลี่ยนค่าพหุนามมอดูเลตแสงได้ตามค่าแรงดันที่มากระตุ้น [1] ตลอดจนการนำเทคนิคของ interferometry มาใช้เพื่อการมอดูเลตเฟสของแสง [2]

ถึงแม้ผลที่ได้จากการพัฒนาดังกล่าวจะตอบสนองความต้องการในการนำไปประยุกต์ใช้ได้ในระดับหนึ่ง นั่นคือในแง่ของการควบคุมสถานะของโพลาไรซ์ได้ง่ายและแม่นยำ แต่ยังไม่ครอบคลุมไปถึงในแง่ของจำนวนอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้รวมทั้งความสะดวกในการจัดวางอุปกรณ์ และความสะดวกในการทำงานของระบบภายใต้สภาวะแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการปรับปรุงวิธีการควบคุมสถานะโพลาไรซ์โดยอาศัยแนวทางของ Taim *et al* [3] ด้วยการนำเส้นใยนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาไรซ์ (Polarisation Preserving Fiber) มาใช้เป็นตัวกลางของแสงแทนที่จะเป็นอากาศค้ำเช่นเทคนิคต่างๆที่กล่าวมาข้างต้น

ผลดีที่คาดว่าจะได้รับจากการใช้เส้นใยนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาไรซ์ก็คือ ลดความยุ่งยากในการจัดวางอุปกรณ์ทางแสงลง เพิ่มความสะดวกให้กับการทำงานของระบบ เนื่องจากแนวทางการเดินของแสงไม่ถูกรบกวนได้ง่าย รวมทั้งทำให้โอกาสที่จะได้ความถี่ที่ใช้ในการมอดูเลตแสงมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากในส่วนของการมอดูเลต จะปราศจากส่วนที่เคลื่อนที่ทางเชิงกล ซึ่งผลดีที่ตามมาก็คือ จะทำให้ขอบเขตของการประยุกต์ใช้เทคนิคนี้ในเครื่องมือวัดเป็นไปได้อย่างกว้างขวางยิ่งขึ้น

## 2. ทฤษฎี

รูปทรงของเส้นใยนำแสงสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นเส้นใยแก้วที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก โดยมีความสมมาตรรอบแกนของเส้นใยนำแสง ดังนั้นในทางลุ่มคดี ถ้าทำการฉายแสงที่มีสถานะทางโพลาไรซ์เป็นอะไรก็ตาม (เส้นตรง วงกลม หรือ วงรี) เข้าไปยังปลายด้านหนึ่งของเส้นใยนำแสง สถานะทางโพลาไรซ์ของแสงที่วัดได้จากปลายอีกด้านหนึ่งก็ยังคงเป็นเช่นเดิม กล่าวคือความต่างเฟสระหว่างส่วนประกอบย่อยของแสงที่ตั้งฉากกันมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง แต่ในทางปฏิบัติ ความไม่สมบูรณ์ต่างๆของเส้นใยนำแสง เช่น ความไม่สม่ำเสมอของความเครียดรอบแกนของเส้นใยนำแสง (asymmetrical stress) และความไม่สมมาตรรอบแกน (rotational asymmetry) ทำให้สถานะโพลาไรซ์ของแสงที่ปลายด้านออกมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสาเหตุก็เนื่องมาจากความแตกต่างของเฟสระหว่างส่วนประกอบย่อยของแสงที่ตั้งฉากกันมีการเปลี่ยนแปลงไปนั่นเอง โดยเฟสที่มีการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นเนื่องจากแต่ละส่วนประกอบย่อยของแสงเคลื่อนที่ผ่านเส้นใยนำแสงในแนวแกนหลัก (eigen axes) ด้วยความเร็วในการเคลื่อนที่ต่างกัน เพราะค่าดัชนีหักเหที่ต่างกัน (ปรากฏการณ์ที่ค่าดัชนีหักเหในแนวแกนหลักของเส้นใยนำแสงมีค่าต่างกันเรียกว่า ปรากฏการณ์ไบรีฟรินเจน Birefringence [4])

ความไม่สมบูรณ์ของเส้นใยนำแสงดังกล่าว สามารถถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการสร้างและควบคุมสถานะโพลาไรซ์ของแสง ความต้องการได้ ซึ่งสามารถกระทำได้โดยการทำให้เส้นใยนำแสงโค้งงอ (bending) การบิดเส้นใยนำแสง (twisting) [5] การออกแรงกดเส้นใยนำแสง (transverse pressure) [6] หรืออาศัยผลของสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก [7] การกระทำในลักษณะนี้เป็นความถี่สูงที่ต้องการทำให้เกิดไบรีฟรินเจนที่ทราบค่าขึ้นภายในเส้นใยนำแสง เพื่อให้แสงที่ส่องผ่านเส้นใยนำแสงดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสและทำให้เกิดแสงที่มีสถานะโพลาไรซ์ตามต้องการในที่สุด

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านเส้นใยนำแสงได้รับการพัฒนาขึ้นเป็นอย่างมาก โดยมีแรงกระตุ้นจากการขยายตัวทางด้านการศึกษาผ่านเส้นใยนำแสงเป็นสำคัญ อุปกรณ์ทางแสงในรูปแบบของเส้นใยนำแสงมากมายได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นรวมถึงเส้นใยนำแสงชนิดที่สามารถรักษาสถานะโพลาไรซ์ได้ ลักษณะการทำงานของเส้นใย

นำแสงชนิดนี้เป็นดังนี้ ถ้ามีการฉายแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นเข้าไปตามแนวแกนหลักของเส้นใยนำแสง สัญญาณแสงที่ออกมาจากเส้นใยนำแสงตามแนวแกนดังกล่าวยังคงเป็นแสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นเช่นเดิม เส้นใยนำแสงสามารถรักษาสถานะโพลาไรซ์ของแสงได้โดยอาศัยปรากฏการณ์โพลาไรซ์ในเส้นใยนำแสงที่ถูกสร้างขึ้นอย่างฉาบฉวยที่เส้นใยนำแสงถูกผลิตขึ้น [8] โดยเส้นใยนำแสงที่สามารถรักษาสถานะโพลาไรซ์ของแสงโพลาไรซ์ไว้ได้รู้จักกันในชื่อของ Highly Birefringent fiber (HiBi fiber) เนื่องจากโครงสร้างของเส้นใยนำแสงชนิดนี้ได้ถูกออกแบบมาเป็นพิเศษให้สามารถรักษาสถานะโพลาไรซ์ของแสงได้ ดังนั้นถ้าทำการฉายแสงโพลาไรซ์เข้าไปในเส้นใยนำแสงดังกล่าว โดยมีแนวแกนของแสงทำมุมกับแกนของเส้นใยนำแสงค่าหนึ่ง แสงที่มีโพลาไรซ์ดังกล่าวจะถูกแยกออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนของเส้นใยนำแสง โดยแสงทั้งสองจะเดินทางผ่านไปตามความยาวของเส้นใยนำแสงด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงทำให้เกิดความต่างเฟสระหว่างแสงทั้งสองขึ้น ซึ่งเมื่อใช้วิธีการที่เหมาะสมในการรวมแสงทั้งสองเข้าด้วยกันอีกครั้งที่ด้านเอาต์พุต จะทำให้ได้แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีทิศทางของแกนแสงอยู่ที่มุมค่าหนึ่ง วิธีการหนึ่งที่จะทำให้ทิศทางของแกนแสงเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงคือ การให้ความเค้นต่อเส้นใยนำแสงตามแนวยาว (หรืออาจกล่าวได้ว่าการควบคุมทิศทางของแสงโพลาไรซ์ได้)

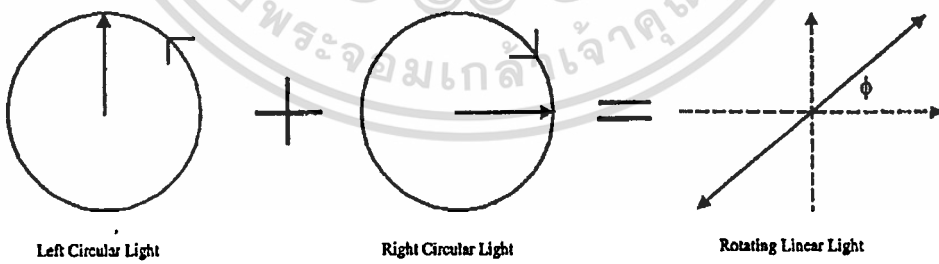
รูปที่ 1 แสดงการเกิดแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีทิศทางของแกนแสงเป็นมุม azimuth ค่าหนึ่งเทียบกับแกนอ้างอิง โดยการสร้างแสงดังกล่าวอาศัยหลักการรวมกันของแสงโพลาไรซ์สถานะวงกลมซึ่งมีปลาวยเวกเคอร์รัทีของสนามไฟฟ้ากวาดไปในทิศทางตรงกันข้าม (ทวนเข็มนาฬิกา และตามเข็มนาฬิกา) ทำให้ได้ผลเป็นแสงโพ

ลาไรซ์สถานะเชิงเส้นโดยมีมุม azimuth ขึ้นกับความต่างเฟสระหว่างสถานะวงกลมทั้งสอง

การมอดูเลตเฟสของแสงโพลาไรซ์ อาศัยการให้แรงคิงต่อเส้นใยนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาไรซ์ในแนวยาว ตามจังหวะของสัญญาณขับ โดยวิธีการการมอดูเลตนี้ จะทำให้เกิดความต่างเฟสระหว่างแสงโพลาไรซ์ทั้งสองสถานะวงกลม และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของมุม azimuth ของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่สถานะเอาต์พุตในที่สุด การจับอุปกรณ์การมอดูเลตเฟสของแสงโดยให้เส้นใยนำแสงเป็นศูนย์กลางของแสง แสงจะได้ดังในรูปที่ 2

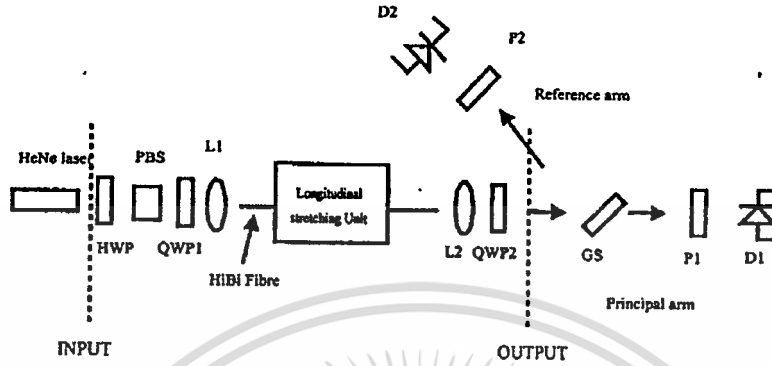
เนื่องจากจุดประสงค์ของการวิจัยคือการสร้างแสงเอาต์พุตที่เป็นแสงโพลาไรซ์สถานะเชิงเส้นที่สามารถทำการควบคุมมุม azimuth ได้ จากรูปที่ 2 ทางด้านอินพุต แสงโพลาไรซ์ที่ถูกฉายเข้าไปในเส้นใยนำแสงตามแนวแกนทั้งสองของเส้นใยนำแสงถูกทำให้มีขนาดความเข้มแสงเท่าๆ กัน เนื่องจากเส้นใยนำแสงนี้ได้รับการมอดูเลตทำให้ความต่างเฟสระหว่างแสงในแนวแกนทั้งสองเปลี่ยนแปลงตามเวลา ณ ที่เอาต์พุต แสงทั้งสองจะถูกเปลี่ยนให้มีสถานะโพลาไรซ์วงกลมหมุนทวนและตามเข็มนาฬิกา (ได้จากการปรับ Quarter Waveplate 2 (QWP2)) ซึ่งเมื่อแสงวงกลมทั้งสองรวมกันจะได้เป็นแสงโพลาไรซ์สถานะเชิงเส้นโดยการควบคุมมุม azimuth สามารถกระทำได้โดยการควบคุมการเปลี่ยนแปลงความต่างเฟสระหว่างลำแสงโพลาไรซ์สถานะวงกลมผ่าน Longitudinal Stretching Unit

การวิเคราะห์ในเชิงทฤษฎีสามารถดำเนินการได้โดยใช้รูปแบบทางคณิตศาสตร์เสนอโดย Jones [9] ซึ่งกล่าวว่าแสงโพลาไรซ์และอุปกรณ์ทางแสงที่เกี่ยวข้องใดๆสามารถแทนได้ด้วยเมทริกซ์



รูปที่ 1 แสดงการรวมกันของแสงโพลาไรซ์วงกลมโดยให้ผลออกมาเป็นแสงโพลาไรซ์สถานะเชิงเส้น ซึ่งมีมุม azimuth เป็น  $\phi$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 แสดงการจับชุดทดลองการมอดูเลตเฟสของแสงโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสง โดยที่ HWP = Half Waveplate, QWP1,2 = Quarter Waveplates, L1,2 = Lenses, PBS = Polarising Beam Splitter, GS = Glass Slide, P1,2 = Polarisers, D1,2 = Detectors, HiBi Fiber Polarisation Preserving Fiber

โดยการวิเคราะห์สิ่งที่เกิดขึ้นสามารถกระทำได้ตามหลักการของแมทริกซ์

$\omega_0$  คือ ความถี่เชิงมุม  
 $t$  คือ เวลา

กำหนดให้เวกเตอร์ทางไฟฟ้าของลำแสงเอาต์พุต  $E_{output}$  ซึ่งเขียนในเทอมของ Jones calculus ได้ดังนี้

$$E_{output} = Q\theta M E_{input} \tag{1}$$

โดยลำแสงเคลื่อนที่ผ่านส่วนประกอบต่างๆ ตามลำดับ (ตามรูปที่ 2) โดยในที่นี้ QWP2 ทำมุม  $45^\circ$  กับแกนของเส้นใยนำแสง และจากสมการที่ (1) แสงเอาต์พุต สามารถเขียนได้เป็น

$$E_{output} = Q_{+45^\circ} (M) E_{input} = \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\Delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \frac{E_0}{2} e^{i\omega_0 t} \tag{3}$$

เมื่อ  $E_{input}$  เป็น Jones vector แสดงเวกเตอร์สนามไฟฟ้าของลำแสงอินพุต,  $M$  แสดง modulator matrix,  $Q\theta$  เป็น Jones matrix สำหรับ quarter waveplate ซึ่งทำมุม  $\theta$  กับแกนของเส้นใยนำแสง กำหนดให้แสงอินพุตเขียนแทนได้ด้วย Jones vector ดังนี้

$$E_{input} = \frac{E_0}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} e^{i\omega_0 t} \tag{2}$$

โดยที่

$E_0$  คือ แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า

เมื่อ  $\begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix}$  คือ Jones matrix สำหรับ quarter waveplate ซึ่งมี fast axis ทำมุม  $45^\circ$  กับแกนของเส้นใยนำแสง

$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\Delta} \end{bmatrix}$  คือ Pseudo Jones matrix [3] สำหรับเส้นใยนำแสงชนิด

รักษาสถานะโพลาไรซ์ ซึ่งถูกมอดูเลตทำให้เฟสของแสงในแนวแกนที่ตั้งฉากกันมีความแตกต่างเท่ากับ  $\Delta$  ดังนั้น

$$E_{output} = \begin{bmatrix} 1 + ie^{i\Delta} \\ i + e^{i\Delta} \end{bmatrix} \frac{E_0 e^{i\omega t}}{2}$$

$$= \frac{\begin{bmatrix} e^{i\frac{1}{2}(\Delta + \frac{\pi}{2})} + e^{-i\frac{1}{2}(\Delta + \frac{\pi}{2})} \\ e^{i\frac{1}{2}(\Delta + \frac{\pi}{2})} - e^{-i\frac{1}{2}(\Delta + \frac{\pi}{2})} \end{bmatrix}}{2i} E_0 e^{i(\omega t + \gamma)}$$

(4)

$\gamma = +\frac{1}{2}(\Delta + \frac{\pi}{2})$

ซึ่งสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$E_{output} = \begin{bmatrix} \cos \frac{1}{2}(\Delta + \frac{\pi}{2}) \\ \sin \frac{1}{2}(\Delta + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} E_0 e^{i(\omega t + \gamma)}$$

(5)

สมการที่ (5) เป็นสมการที่แสดงแสงโพลาไรซ์สถานะเชิงเส้นที่สามารถควบคุมมุม azimuth ผ่าน  $\Delta$  (เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการมอดูเลต) การมอดูเลตนี้สามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น การให้ความร้อนแก่เส้นใยนำแสง การดึงเส้นใยนำแสงตามยาว และการพันเส้นใยนำแสงรอบ piezoelectric รูปทรงกระบอกซึ่งถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณขับที่เหมาะสม (สำหรับการศึกษานี้เลือกใช้วิธีการดึงตามแนวยาว ด้วย Longitudinal Stretching Unit)

สัญญาณเอาต์พุต ของแสงถูกวัดออกมาในรูปของความเข้มแสงโดยใช้ photodetector (D1) ความเข้มแสงของเอาต์พุต เขียนได้เป็น

$$I_{output} = (E_{output}) \cdot (E_{output})^* = I_0$$

(6)

เมื่อ  $I_0 = E_0^2$  = ค่าคงที่ และ  $(E_{output})^*$  คือ conjugate ของ  $E_{output}$

ดังนั้นการวัดสัญญาณเอาต์พุต หลังจาก QWP 2 โดยทันที จะได้เป็นสัญญาณ DC แต่ก่อนนำ Polariser (P1) เข้ามาก็ก่อน D1 การส่งผ่านสนามไฟฟ้าจะกลายเป็น

$$E_{polariser} = P\theta E_{output} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta \cos \frac{1}{2}(\Delta + \frac{\pi}{2}) + \cos \theta \sin \theta \sin \frac{1}{2}(\Delta + \frac{\pi}{2}) \\ \cos \theta \sin \theta \cos \frac{1}{2}(\Delta + \frac{\pi}{2}) + \sin^2 \theta \sin \frac{1}{2}(\Delta + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} E_0 e^{i(\omega t + \gamma)}$$

(7)

เมื่อ  $P\theta$  คือ Jones matrix สำหรับ Polariser (P1) ที่ทำมุม  $\theta$  ใดๆกับแกนอ้างอิง และมีค่าเป็น

$$\begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix}$$

ดังนั้น ความเข้มหลังจากผ่าน polariser สามารถเขียนได้เป็น

$$I_{polariser} = (E_{output}) \cdot (E_{output})^* = \frac{I_0}{2} [1 + \cos(2\theta - (\Delta + \frac{\pi}{2}))]$$

(8)

สัญญาณเอาต์พุต ที่แสดงนี้ (สมการที่ (8)) เป็นฟังก์ชันของมุม  $\theta$  (มุมระหว่างแกนของ P1 และแกนอ้างอิง) และ  $\Delta$  (เฟสของแสงที่ถูกมอดูเลต) จากสมการที่ (8) สังเกตได้ว่าแอมพลิจูดของสัญญาณคงที่ เมื่อมีการหมุน P1 ในขณะที่เฟสของสัญญาณแสงมีการเปลี่ยนแปลงไป และผลที่ได้ตามมาก็คือความสามารถในการควบคุมทิศทาง (orientation) ของแสงโพลาไรซ์สถานะเชิงเส้น

จากการใช้ Jones calculus วิเคราะห์ระบบการมอดูเลตเฟสของแสงข้างต้นทำให้สามารถคาดได้ว่าลักษณะของเอาต์พุตที่ถูกต้องตรงตามทฤษฎีควรเป็นเช่นไร โดยแสดงออกมาในรูปของ Jones vector แต่เนื่องจากรูปแบบดังกล่าวเขียนอยู่ในรูปของสนามไฟฟ้าซึ่งไม่ใช่ค่าที่วัดได้โดยตรง ในการวิเคราะห์ผลสุดท้ายทุกครั้งจึงต้องทำการแปลงรูปแบบดังกล่าวให้อยู่ในรูปความเข้มของแสง

เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบผลระหว่างทฤษฎีและผลที่ได้จากการทดลองจริง

จากความไม่สะดวกดังกล่าวข้างต้น ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการนำคณิตศาสตร์กรุปแบบหนึ่งซึ่งแสดงสถานะโพลาไรซ์ของแสงได้เช่นเดียวกันเพื่อมาวิเคราะห์ผลการศึกษารูปแบบของคณิตศาสตร์ดังกล่าวรู้จักกันในนามของ Stokes vectors หรือ Stokes parameters [10]

Stokes parameters สามารถแทนสถานะโพลาไรซ์ของแสงและอุปกรณ์ทางแสงด้วยเมทริกซ์ได้เช่นเดียวกับ Jones vectors แต่ความแตกต่างระหว่าง vectors ทั้งสองเห็นได้ชัดเจนจากขนาดของเมทริกซ์ที่ใช้ ในขณะที่ Jones vectors แทนสถานะโพลาไรซ์ของแสงด้วยเมทริกซ์ขนาด  $2 \times 1$  โดยสมาชิกแต่ละตัวอยู่ในรูปของตามไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยแอมพลิจูดและเฟส (สิ่งที่ได้แสดงไว้ในการวิเคราะห์ข้างต้น) แต่ Stokes parameters แทนสถานะโพลาไรซ์ของแสงด้วยเมทริกซ์  $4 \times 1$  ซึ่งสมาชิกทั้งสี่ตัวสามารถแทนได้ด้วยสัญลักษณ์  $S_0, S_1, S_2$  และ  $S_3$  โดยอยู่ในรูปของความเข้มแสงทั้งสิ้น โดยที่  $S_0$  เป็นความเข้มของแสงทั้งหมด (total intensity) ในขณะที่  $S_1, S_2$  และ  $S_3$  เป็นความเข้มแสงที่เกี่ยวข้องกับสถานะโพลาไรซ์ของแสงที่กำลังทำการวิเคราะห์ ดังนั้นจะเห็นว่า Stokes parameters นั้นเหมาะสมและสะดวกรวดเร็วในการวิเคราะห์ที่ต้องการทราบลักษณะเอาต์พุต ที่ได้จากระบบการมอดูเลตที่กำลังศึกษา เนื่องจาก parameters ที่นำมาใช้แสดงสถานะโพลาไรซ์ของแสงสามารถวัดได้โดยตรง ซึ่งในส่วนของการทดลอง ได้มีการนำเสนอผลของการศึกษาลักษณะเอาต์พุต โดยใช้ Stokes parameters

โดยทั่วไป Stokes parameters สามารถเขียนอยู่ในรูปของ column matrix ได้ดังนี้

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

โดยแต่ละ parameter มีนิยามดังนี้

$$S_0 = I_0 + I_{90} \quad (10)$$

สมการที่ (10) หมายถึงความเข้มของแสงโพลาไรซ์ (total intensity) ที่ทำการวิเคราะห์

$$S_1 = I_0 - I_{90} \quad (11)$$

สมการที่ (11) บอกถึงผลต่างระหว่างความเข้มของแสงโพลาไรซ์ที่ทำการวิเคราะห์เมื่อทำการวัดที่มุม  $0^\circ$  และ  $90^\circ$  เทียบกับแกนอ้างอิง ซึ่งในกรณีที่ผลต่างมีค่ามากกว่าศูนย์แสดงว่าแสงโพลาไรซ์ดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีแกนหลักขนานกับแกนอ้างอิง แต่ถ้าผลต่างมีค่าน้อยกว่าศูนย์ก็จะแสดงว่าแสงโพลาไรซ์มีแนวโน้มที่จะเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีแกนหลักตั้งฉากกับแกนอ้างอิง

$$S_2 = I_{45} - I_{135} \quad (12)$$

สมการที่ (12) บอกถึงผลต่างระหว่างความเข้มของแสงโพลาไรซ์ที่ทำการวิเคราะห์เมื่อทำการวัดที่มุม  $45^\circ$  และ  $135^\circ$  เทียบกับแกนอ้างอิง ซึ่งในกรณีที่ผลต่างมีค่ามากกว่าศูนย์แสดงว่าแสงโพลาไรซ์ดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีแกนหลักทำมุม  $45^\circ$  กับแกนอ้างอิง แต่ถ้าผลต่างมีค่าน้อยกว่าศูนย์ก็จะแสดงว่าแสงโพลาไรซ์มีแนวโน้มที่จะเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีแกนหลักทำมุม  $135^\circ$  กับแกนอ้างอิง

$$S_3 = I_R - I_L \quad (13)$$

สมการที่ (13) บอกถึงผลต่างระหว่างความเข้มของแสงโพลาไรซ์ที่ทำการวิเคราะห์ เมื่อทำการวัดความเข้มแสงโพลาไรซ์วงกลมหมุนตาม ( $I_R$ ) และทวนเข็มนาฬิกา ( $I_L$ ) ซึ่งในกรณีที่ผลต่างมีค่ามากกว่าศูนย์แสดงว่าแสงโพลาไรซ์ดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะเป็นแสงโพลาไรซ์วงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกา แต่ถ้าผลต่างมีค่าน้อยกว่าศูนย์ก็จะแสดงว่าแสงโพลาไรซ์มีแนวโน้มที่จะเป็นแสงโพลาไรซ์วงกลมทวนเข็มนาฬิกา

ดังนั้นในการวิเคราะห์สถานะของเอาต์พุต ที่ได้จากชุดมอดูเลตเฟสของแสงโดยมีเส้นนำแสงเป็นตัวกลางสามารถทำได้โดยการวัดความเข้มแสงต่างๆตามที่ปรากฏในสมการที่ (10) (12) และ

(13) แล้วนำชุดของ Stokes parameters ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับชุด Stokes parameters อ้างอิงเพื่อคัดกรองสถานะโพลาไรซ์ของแสง

วิธีการในทางปฏิบัติที่นิยมใช้ในการวัดค่าความเข้มแสงที่ ต้องการเหล่านี้ก็คือ การใช้อุปกรณ์ทางแสงสองชนิดประกอบด้วย แผ่น polariser และผลึกหน่วงเฟส Quarter Waveplate มาจัดเรียง ในตำแหน่งที่เหมาะสม ณ บริเวณ เอกลักษณ์ของชุดทดลอง

นอกจากการนำ Stokes parameters มาเขียนให้อยู่ในลักษณะ column matrix เพื่อเปรียบเทียบกับ normalised Stokes parameters มาตรฐานและคัดกรองว่าแสงที่กำลังตรวจสอบเป็นแสงโพลาไรซ์ หรือไม่และมีสถานะเป็นเช่นไร ผู้ทำการทดลองยังสามารถนำ Stokes parameters ไปคำนวณหาปริมาณที่สำคัญสองปริมาณที่สามารถใช้บ่งชี้ถึงคุณภาพและลักษณะของแสงโพลาไรซ์ที่กำลัง ถูกตรวจสอบ โดยปริมาณทั้งสอง (เขียนอยู่ในเทอมของ Stokes parameters) ประกอบด้วย

#### 1) Degree Of Polarisation (DOP)

$$DOP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \times 100\% \quad (14)$$

โดยปริมาณนี้บอกถึงความเป็นโพลาไรซ์ของแสง กล่าวคือ ถ้าคำนวณได้ว่า DOP ของแสงที่กำลังถูกตรวจสอบมีค่า 100% แสดงว่าแสงดังกล่าวเป็นแสงโพลาไรซ์อย่างสมบูรณ์ และยังถ้า จำนวนเปอร์เซ็นต์น้อยลงเท่าใด ความเป็นโพลาไรซ์ของแสงก็จะมี น้อยลงเท่านั้น อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ การสร้างแสงโพลาไรซ์ ที่มี DOP เท่ากับ 100% เป็นไปได้ยากมาก เนื่องจากความไม่ สมบูรณ์ของอุปกรณ์ทางแสงที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นค่า DOP ที่คาดหวัง จึงเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับ 100% มากที่สุด

#### 2) Ellipticity (e)

$$e = \tan^{-1} \frac{S_3}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}} \quad (15)$$

โดยทั่วไป ellipticity คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวของ minor axis กับ major axis ของวงรี ซึ่งในที่นี้สามารถนำมาใช้เป็น

อีกปริมาณหนึ่งเพื่อบ่งบอกลักษณะความเป็นโพลาไรซ์ของแสงให้ ชัดเจนยิ่งขึ้น กล่าวคือ โดยทั่วไปสถานะโพลาไรซ์ของแสงสามารถ แบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือโพลาไรซ์เชิงเส้น (linear polarisation) โพลาไรซ์วงกลม (circular polarisation) และโพลาไรซ์วงรี (elliptical polarisation) ในกรณีที่แสงที่กำลังถูกตรวจสอบเป็นแสง โพลาไรซ์สถานะใดก็ตามคงที่กล่าวข้างต้น ค่า DOP ที่คำนวณได้ ก็จะมีค่าเข้าใกล้ 100% ซึ่งถ้าหากในงานวิจัยนี้ การได้ค่านี้มาเพียง ค่าเดียวยังไม่เพียงพอที่จะคัดกรองลักษณะโพลาไรซ์ของแสง เพราะ แสงโพลาไรซ์ทั้งสามชนิดค่าก็มีโอกาสให้ DOP เท่ากันออกมา ดังนั้นเพื่อให้ได้เห็นถึงความแตกต่างของสถานะโพลาไรซ์ของ แสงที่ได้รับจึงจำเป็นต้องใช้ค่า ellipticity เนื่องจากแสงโพลาไรซ์ แต่ละแบบจะมีค่า ellipticity ที่แตกต่างกัน เช่น แสงโพลาไรซ์เชิง เส้นจะมี ellipticity เป็นศูนย์ ในขณะที่แสงโพลาไรซ์วงกลมจะมี ellipticity เป็นหนึ่ง และแสงโพลาไรซ์วงรีจะมี ellipticity อยู่ ระหว่างค่าศูนย์กับหนึ่ง

จากผลของการวิเคราะห์โดยใช้ Jones calculus ข้างต้น สามารถระบุผลในเชิงทฤษฎีออกมาได้ว่า ลักษณะของแสงเอกลักษณ์ จะเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นซึ่งมีมุม azimuth ที่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นการที่จะคัดกรองว่าผลในทางปฏิบัติถูกต้องตรงตามทฤษฎีเพียง ใดก็สามารถตรวจสอบได้ โดยสังเกตจากรูปสัญญาณที่ได้ รวมถึง การพิจารณาจาก Stokes parameters และการคำนวณ degree of polarisation และ ellipticity ของแสงเอกลักษณ์

#### 3. การทดลอง

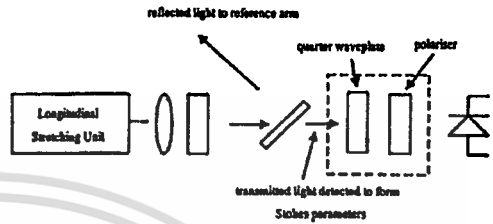
จัดการทดลองตามรูปที่ 2 โดยในชุดทดลองประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออน (HeNe laser) ซึ่งให้แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ออกมา แกนของ แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่ถูกปล่อยออกมาจากเลเซอร์ถูกปรับให้อยู่ ในระนาบที่เหมาะสมโดย Half Waveplate (HWP) คุณภาพของ แสงโพลาไรซ์ (Degree of Polarisation) ได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้น โดยการต่อผ่านผลึกแยก/รวมลำแสงชนิดโพลาไรซ์ (Polarising Beam Splitter : PBS) ซึ่งทำมาจากแก้ว Borosilicate และมีค่า extinction ratio ประมาณ  $10^2$  แผ่นผลึกหน่วงเฟส Quarter Waveplate (QWP1) แผ่นแรก (ทำมาจากผลึก quartz และมี retardation tolerance เท่ากับ  $\lambda/500$ ) ได้ถูกจัดให้แกนของผลึกอยู่

ในทิศทางที่เหมาะสม เพื่อที่จะทำให้ลำแสงก่อนที่จะผ่านเข้าสู่เส้นใยนำแสงมีสถานะของแสงเป็นโพลาไรซ์วงกลม โดยสถานะเช่นนี้จะทำให้ปริมาณของแสงที่ผ่านเข้าไปในแกนของเส้นใยนำแสง (eigen axes) มีค่าเท่ากันโดยอัตโนมัติ เส้นใยนำแสงที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิดที่สามารถรักษาสถานะโพลาไรซ์ของแสงไว้ได้ (polarisation preserving fiber) โดยค่าโมริฟรินเจนของเส้นใยนำแสงมีค่าประมาณ  $10^{-4}$  และความยาวของเส้นใยนำแสงที่ใช้มีค่าประมาณ 50 เซนติเมตร การมอดูเลตสามารถกระทำได้โดยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวของเส้นใยนำแสง (คือการทำให้เกิดความดันนั่นเอง) ตามจังหวะของสัญญาณขับที่ป้อนให้กับตัวมอดูเลเตอร์ (modulator) ในส่วนของ Longitudinal stretching unit สัญญาณที่ใช้ขับตัวมอดูเลเตอร์นี้เป็นสัญญาณไซน์ ความถี่ประมาณ 50 เฮิรตซ์ ณ จุดเอาต์พุต แสงที่อยู่ในแนวแกนของเส้นใยนำแสงที่ตั้งฉากกันจะเคลื่อนที่ผ่านแผ่นผลึกหน่วงเฟสแผ่นที่สอง (QWP2) ซึ่งถูกจัดวางให้แกนของแผ่นผลึกทำมุม  $45^\circ$  กับแกนของเส้นใยนำแสง มีผลทำให้แสงที่อยู่ในแต่ละแนวแกนของเส้นใยนำแสงถูกเปลี่ยนเป็นแสงโพลาไรซ์สถานะวงกลมที่มีทิศทางการกวาดของเวกเตอร์ทิศทางต่างกัน (โพลาไรซ์สถานะวงกลมที่เกิดขึ้นประกอบด้วยความถี่และคาบเชิงนาฬิกา ตามรูปที่ 2 ครบจุดนี้เองแสงโพลาไรซ์สถานะวงกลมดังกล่าวก็จะรวมกันทำให้เกิดเป็นแสงโพลาไรซ์สถานะเชิงเส้นซึ่งมีแนวแกนของแสงทำมุม azimuth ค่าหนึ่งกับแกนของเส้นใยนำแสง และจากการมอดูเลตเส้นใยนำแสงด้วยมอดูเลเตอร์ดังที่กล่าวมา ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโมริฟรินเจนและความยาวของเส้นใยนำแสงเทียบกับเวลา มีผลให้เกิดความต่างเฟสระหว่างแสงโพลาไรซ์วงกลมทั้งสอง และแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่ได้มีทิศทางเปลี่ยนแปลงไปตามจังหวะการมอดูเลต เกิดเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นซึ่งสามารถควบคุมทิศทางได้ทันที

จากรูปที่ 2 จะสังเกตเห็นว่าสัญญาณแสงที่ผ่านจากแผ่นผลึกหน่วงเฟส QWP2 จะถูกตรวจวัดหลังผ่านแผ่น polariser (P2) ด้วย detector (D1) และมีการใช้แผ่นสโกลด์ (GS) ในชุดทดลองเพื่อทำการแยกลำแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นส่วนหนึ่งออกจากลำแสงหลัก (principal signal) เพื่อนำไปใช้เป็นลำแสงอ้างอิง (reference signal) ต่อไป

หลังจากได้สัญญาณเอาต์พุตเรียบร้อยแล้ว เมื่อจะทำการวิเคราะห์

สัญญาณโดยอาศัย Stokes parameters สามารถกระทำได้โดยการเพิ่มเครื่องมือทางแสงซึ่งประกอบด้วยแผ่น polariser และผลึกหน่วงเฟสชนิด quarter waveplate ลงไปด้าน principal arm ตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงการจัดอุปกรณ์ทางแสงซึ่งประกอบด้วยแผ่น polariser และผลึกหน่วงเฟสชนิด quarter waveplate เพื่อทำการวัด Stokes parameters

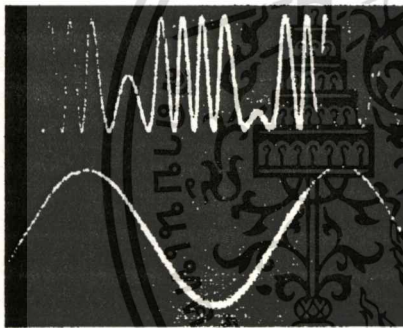
เนื่องจากในการวัดความเข้มแสงเพื่อนำมาเขียนเป็น parameter ต่างๆ ของ Stokes จำเป็นต้องวัดเทียบกับแกนอ้างอิงเสมอ ซึ่งในการจัดชุดทดลองตามรูปที่ 3 การอ้างอิงสามารถกระทำได้ผ่านสัญญาณอ้างอิงที่ได้มาจาก reference arm ทำให้การวัดผลเป็นไปได้อย่างสะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น

4. ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าที่เอาต์พุต แผ่นผลึกหน่วงเฟสชนิด Quarter Waveplate จะทำการเปลี่ยนแสงที่ผ่านออกมาจากปลายเส้นใยนำแสงให้เป็นแสงโพลาไรซ์แบบวงกลมสองวง เนื่องจาก การวางตัวของ optic axis ของ waveplate ทำมุม  $45^\circ$  กับแกนของเส้นใยนำแสง โดยแสงโพลาไรซ์สถานะวงกลมที่ได้ทั้งสองจะมีการหมุนในทิศทางตรงข้ามกัน และเมื่อรวมกันแล้วจะให้แสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นตามการวิเคราะห์ในส่วนของทฤษฎีโดยอาศัย Jones calculus ถ้ามีการตรวจวัดสัญญาณแสงในส่วนนี้จะสังเกตเห็นว่าสัญญาณจะออกมาในรูปของสัญญาณ DC จากนั้นเมื่อนำแผ่น polariser มาวางทางเดินของแสงดังกล่าว และทำการตรวจวัดอีกครั้งหนึ่ง จะพบว่าสัญญาณแสงมีลักษณะเป็นริ้ว (fringes) ตามการวิเคราะห์จากทฤษฎีเช่นกัน (รูปที่ 4) สังเกตว่าในรูปประกอบด้วย

สองสัญญาณ โดยสัญญาณด้านบนเป็นสัญญาณ เอคต์ทูต ที่ได้จาก ชุดการมอดูเลตเฟสของแสงเมื่อนำ polariser มากั้น ก่อขึ้นที่แสงจะถูกตรวจวัดโดย detector

สัญญาณที่ได้มีส่วนหนึ่งคล้ายกับสัญญาณซายน์ที่มีความถี่สูงเมื่อเทียบกับความถี่ของสัญญาณซายน์ด้านล่างซึ่งเป็นสัญญาณที่ใช้ในการขับมอดูเลเตอร์ โดยความถี่ของสัญญาณขับมีค่าประมาณ 50 เฮิรตซ์ นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตเห็นว่าส่วนของสัญญาณความถี่สูงดังกล่าวยังมีจุดที่เรียกว่าจุดวกกลับ (turning points) ซึ่งเป็นจุดที่สัมพันธ์กับเวลาในขณะที่เส้นใยนำแสงมีการเปลี่ยนแปลง เช่น เส้นใยนำแสงเปลี่ยนจากการบิดตัวเป็นการหดตัว หรือเปลี่ยนจากการหดตัวเป็นการบิดตัว เป็นต้น ตามจังหวะการเปลี่ยนแปลงของมอดูเลเตอร์ ซึ่งมีผลทำให้แสงโพลาไรซ์สถานะเชิงเส้นที่เกิดขึ้น มีการหมุนกลับทิศทางจากทิศทางหนึ่งไปยังอีกทิศทางหนึ่ง เช่น เปลี่ยนจากหมุนทวนเข็มนาฬิกาไปเป็นหมุนตามเข็มนาฬิกา เป็นต้น



รูปที่ 4 แสดงรูปสัญญาณแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มุม azimuth สามารถควบคุมได้เปรียบเทียบกับสัญญาณขับรูปซายน์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์

นอกจากนี้ยังได้มีการทดสอบในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการคงที่ของ แอมพลิจูดของสัญญาณแสงเอคต์ทูต เมื่อมีการเปลี่ยนทิศทางของ transmission axis ของ polariser ตามสมการที่ (8) โดยพบว่า การหมุน analyser ทำให้ เอคต์ทูต มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดที่น้อยมาก

สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะของเอคต์ทูต โดยใช้ Stokes

parameters ได้ผลการทดลองดังนี้

เนื่องจาก Stokes parameters ได้จากผลรวมและผลต่างของ ค่าความเข้มแสงที่เหมาะสมซึ่งประกอบด้วย  $I_0, I_{90}, I_{45}, I_{135}, I_R$  และ  $I_L$  ดังนั้นในขั้นตอนแรกคือทำการวัดค่าความเข้มแสงดังกล่าว โดยอาศัยสัญญาณอ้างอิง ทำให้กำหนดได้ว่าสัญญาณเอคต์ทูต ที่กำลังตรวจวัดมีแนวแกนทำมุมอย่างไร โดยค่าความเข้มของแสง แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่าความเข้มแสงต่างๆที่ใช้สำหรับคำนวณค่า Stokes parameters

ความเข้มแสง	มิลลิโวลท์ (ค่าเฉลี่ย)
$I_0$	55.00
$I_{90}$	0.68
$I_{45}$	29.57
$I_{135}$	24.79
$I_R$	29.75
$I_L$	23.69

จากนั้นจึงนำค่าความเข้มแสงที่ได้มาคำนวณหา Stokes parameters ตามสมการที่ (10) ถึง (13) ดังต่อไปนี้

$$S_0 = I_0 + I_{90} = 55.68 \text{ มิลลิโวลท์}$$

$$S_1 = I_0 - I_{90} = 54.32 \text{ มิลลิโวลท์}$$

$$S_3 = I_{45} - I_{135} = 4.78 \text{ มิลลิโวลท์}$$

$$\text{และ } S_4 = I_R - I_L = 5.06 \text{ มิลลิโวลท์}$$

จึงเมื่อนำมาเขียนในรูปแบบของ normalised Stokes parameters จะเขียนได้ดังนี้

$$S = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.98 \\ 0.09 \\ 0.09 \end{bmatrix}$$

เมื่อนำ normalised Stokes parameters ที่ได้จากเอคต์ทูตไป

เปรียบเทียบกับ normalised Stokes parameters [11] จะพบว่า สถานะโพลาไรซ์ของ เอคท์หุด มีความใกล้เคียงสถานะเชิงเส้นซึ่งมี แนวแกนของแสงขนานกับแกนอ้างอิงเป็นอย่างมาก โดยค่าผิด ทลาคที่เกิดขึ้นอาจเนื่องมาจากแสงที่ได้ไม่มีความเป็นโพลาไรซ์เชิง เส้นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งสาเหตุเบื้องต้นอาจเนื่องมาจากอุปกรณ์ทาง แสงที่ใช้ในงานวิจัยเป็นอุปกรณ์ที่มีคุณภาพปานกลาง และเพื่อจะ ให้ผลการวิเคราะห์ที่ชัดเจนยิ่งขึ้นจึงได้ทำการคำนวณหา degree of polarisation และ ellipticity เพื่อสนับสนุนผลของการทดลอง

จากการคำนวณพบว่า degree of polarisation มีค่าประมาณ 98.35% และ ellipticity มีค่าประมาณ 0.05 โดยผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า สัญญาณ เอคท์หุด ที่ได้มีความเป็นโพลาไรซ์ที่ค่อนข้างสูง (เมื่อเทียบกับ degree of polarisation ของแสงโพลาไรซ์ที่สมบูรณ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 100%) และมีลักษณะของแสงใกล้เคียงกับความเป็น เชิงเส้นมาก (เมื่อเทียบกับ ellipticity ของเส้นตรงซึ่งมีค่าต่ำสุด)

จากการวิเคราะห์ข้างต้น ได้มีการใช้ประโยชน์จากสัญญาณ อ้างอิงที่ถูกจัดเตรียมไว้ ซึ่งสัญญาณอ้างอิงดังกล่าวมีความสำคัญ มากเมื่อนำชุดมอดูเลเตอร์เฟสของแสงผ่านเส้นใยนำแสงไปใช้งาน ทางด้านการวัดด้วยแสงต่อไป

5. สรุป

จากผลการศึกษาการมอดูเลเตอร์เฟสของแสงโดยมีเส้นใยนำ แสงเป็นตัวกลางแสดงให้เห็นว่าเส้นใยนำแสงสามารถนำมาใช้งาน ทางด้านการผลิตแสงและควบคุมสถานะโพลาไรซ์ของแสงได้ จึง เป็นสิ่งที่น่าสนใจเนื่องจากเป็นความพยายามในการนำเส้นใยนำ แสงมาใช้ในงานทางด้านเครื่องมือวัดนอกเหนือจากงานทางด้าน การสื่อสารซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในปัจจุบัน แต่เส้นใยนำแสงที่เลือกใช้ ต้องเป็นชนิดที่สามารถรักษาสถานะโพลาไรซ์ (highly birefringent fiber)

สำหรับสัญญาณเอคท์หุดที่ได้จากชุดทดลอง มีคุณภาพและ ลักษณะใกล้เคียงกับลักษณะสัญญาณที่ได้จากการวิเคราะห์ ทางทฤษฎีดังจะดูได้จากผลการทดลองและผลการคำนวณค่า degree of polarisation และ ellipticity ความแตกต่างระหว่าง สัญญาณที่ได้จากการทดลองและทฤษฎีมีโอกาเกิดขึ้นได้ ด้วย สาเหตุหลายประการ เช่น คุณภาพของอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ในงาน วิจัย รวมถึงข้อจำกัดต่างๆ ในการปรับแต่งมุมของอุปกรณ์จับทิศทาง

แสงที่ใช้ในการทดลอง กล่าวคือ คุณภาพและการปรับแต่งมุมของ อุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ในการทดลองมีผลต่อ degree of polarisation ของแสงที่ได้เป็นอย่างมาก เพราะถ้าคุณภาพของอุปกรณ์ไม่มี คุณ ภาพหรือการปรับแต่งมุมไม่เหมาะสม อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ แสงมีความเป็นโพลาไรซ์ลดลง ซึ่งก็จะทำให้ผลการทดลองที่ได้ แคลคูลาจากทางทฤษฎีอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

แนวทางหนึ่งที่น่าสนใจในการนำเทคนิคการมอดูเลตที่ได้ ศึกษาใช้ประโยชน์คือ การนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้าน อุปกรณ์ตรวจรู้ (sensing device applications) โดยอาศัยหลักการ เปรียบเทียบสถานะโพลาไรซ์ของแสงที่แตกต่างกันก่อนและหลัง การตรวจวัดรวมถึงการประยุกต์ใช้เกี่ยวกับการศึกษาพื้นผิวของ ฟิล์มบางโดยนำเทคนิคนี้ไปใช้ร่วมกับวิธีการวัดแบบ ellipsometry

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสภาวิจัยแห่งชาติประเภท ทั่วไป ประจำปี 2539

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. N. Jaspersen and S. E. Schnatterly, "An Imporved Method for High Reflectivity Ellipsometry Based on a New Polarisation Technique", *The Review of Scientific Instrument*, Vol. 40, pp 761-767, 1969.
- [2] R. P. Tatam, J. D. C. Jones and D. A. Jackson, "Optical Polarisation Control Scheme Using Fiber Optics or Bragg Cells", *Journal of Physices E: Science and Instrumentation*, Vol. 19, pp 711-717, 1986.
- [3] R. P. Tatam, C. N. Pannell, J. D. C. Jones and D. A. Jackson, "Full Polarisation State Control Utilizing Linearly Birefringent Monomode Optical Fiber", *Journal of Lightwave Technology (LT-5)*, pp 980-985, 1987.
- [4] J. Wilson and J. F. B. Hawkes, *Optoelectronics : An Introduction*, Prentice Hall, New York, 1989.
- [5] H. C. Lefevre, "Single-Mode Fiber Fractional Wave Devlces and Polarisation Controllers", *Electronics Letters*, Vol. 16, pp 778-780, 1980.
- [6] R. Ulrich, "Polarisation Stabilisation on Single-Mode Fiber", *Applied Physics Letters*, Vol. 35, pp 840-842, 1970.
- [7] T. Okoshi, Y. H. Cheng and K. Kikuchi, "New Polarisation Control Scheme for Optical Heterodyne Receiver Using Two Faraday Rotators", *Electronics Letters*, Vol 21, pp 787-788, 1985.
- [8] J. Noda, K. Okamoto and Y. Sasaki, "Polarisation-Maintaining Fiber and Their Applications", *Journal of Lightwave (LT-4)*, pp 1071-1089, 1986.
- [9] R. C. Jones "A New Calculus for the Treatment of Optical System", *Journal of the Optical Society of America*, Vol 31, pp 488-493, 1941.
- [10] W. A. Schureliff, *Polarisation Light and Use*, Harvard UP, Massachusetts, 1962.

- [11] D. S. Kliber, J. W. Lewis and C. E. Randall, *Polarised Light in Optics and Spectroscopy*, Academic press, New York, 1990.



รัชภาคย์ จิตต์อาวี จบการศึกษา  
ระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ (เกียรติ  
นิยม) จากมหาวิทยาลัยมหิดล พ.ศ.  
2533 และปริญญาเอกจาก The City  
University ประเทศอังกฤษ ในปี  
พ.ศ. 2538 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำ  
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยา

ศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
มีงานวิจัยที่สนใจเกี่ยวกับ Optical fiber sensors



สิทธิ์รณกุล ตุชชาติ จบการศึกษาระดับ  
ปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ จาก  
มหาวิทยาลัยรามคำแหง พ.ศ. 2534  
ปัจจุบันเป็นเป็นเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์  
ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และกำลัง  
ศึกษาคณะระดับปริญญาโทที่ภาควิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีงานวิจัยที่สนใจเกี่ยวกับ Optical fiber  
sensors

## A Novel Optical Fiber Ellipsometer

S Suchart R Chitaree

Department of Applied Physics, Faculty of Science,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,  
Bangkok 10520, THAILAND

Telephone : 662-737-3333 ext. 6272, Fax : 662-326-9981, e-mail : kcratcha@kmitl.ac.th

### Abstract

In this report, a novel ellipsometer based on a highly birefringent fiber is described. The description of the novel optical fiber ellipsometer is presented and also its performance was thoroughly investigated by being used to study materials with different degrees of light absorption. The results obtained were in agreement with theoretical values.

### 1. Introduction

The ellipsometer is a familiar instrument which is widely used for determining optical constants of optical surfaces and thin films. The device is a non-contact sensor which is an important requirement when non-destructive evaluation of optical constants and characteristics of a material is needed. Conventionally, the ellipsometer arrangement is mainly composed of bulk optical components which are large, rigid and heavy [1] so that the instrument applications could be limited. In this paper an alternative configuration of the ellipsometer is proposed. The novel ellipsometer uses a highly birefringent fiber as a light propagation medium which allows an effective technique of polarization modulation [2] to be implemented. The technique produces a linear output polarization, the azimuth of which is continually rotating. This is a major development in ellipsometry as no mechanically adjustment is required during the measurement procedures. The resulting ellipsometric system is more compact, flexible and non-mechanical and has potential for wider applications such as high speed operations.

In this work, a preliminary performance of the proposed ellipsometric system has been studied by using the instrument to investigate the ellipsometric characterization of three different types of materials, namely, glass (BK7), gallium arsenide and gold plates.

### 2. Experimental Arrangement

The novel optical fiber ellipsometer arrangement based on linear polarization modulation scheme is illustrated in Figure 1. The operation is summarized briefly as follows. Light from a HeNe laser is transformed into a circularly polarized beam by a quarter-wave plate (QWP1). This is a convenient way to equally excite both eigenmodes of the fiber. The light then is launched into the fiber (F) by way of X10 objective lens (L1). Next, the fiber modulation unit (FMU), driven by a sinusoidal signal with a frequency of 20 Hz, stretches the fiber longitudinally to modulate the fiber birefringence. Thus, the phase difference between the two orthogonally polarized beam emerging from the eigenmodes of the fiber is accordingly modulated. At the output end, these beams are coupled out of the fiber by the other X10 objective lens (L2) and propagate through the second quarter-wave plate (QWP2) orientated at  $45^\circ$  to the eigenaxes of the fiber. The function of the waveplate is to transform the output beams into two orthogonal circularly polarized beams with opposite handedness. This is equivalent to a linear polarization state with an azimuth determined by the phase difference between the two circularly polarized beams. As the phase difference is modulated, the azimuth of polarization is modulated.

A fraction of the output is sampled by a glass slide (GS), adjusted to have an angle of incidence of  $\approx 3^\circ$ . This fraction passes through a polarizer (P1) orientated at a pre-determined direction and onto a detector (D1) to form a reference signal. From this signal, the azimuth of polarization may be determined at any time. The main light beam is incident onto a sample (S) at an angle of incidence,  $\phi$ . The reflected light then propagates through a polarizer (P2) with its transmission axis orientated at  $45^\circ$  to the plane of incidence, and onto a detector (D2) to provide the output signal. Both signals (output and reference) are then transferred to an online computer for further analysis.

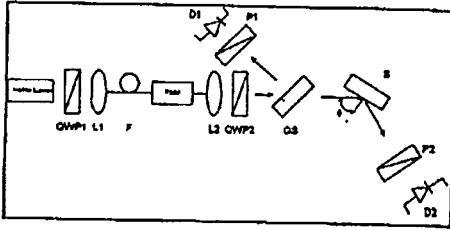


Figure 1 Illustration of an optical fiber based ellipsometer. P1,2 : Polarizers ; L1,2 : Lenses ; QWP1,2 : Quarter-Wave Plates; GS : Glass Slide; D1,2 : Detectors; FMU : Fiber Modulation Unit; F : Highly Birefringent Fiber; S : Sample.

3. Theoretical Analysis

To analyze the process as shown in Figure 1, the electric field  $E_i$  of the output rotating linearly polarized light (after QWP2) can be represented by a vector, using Jones notation [3],

$$E_i = \begin{bmatrix} E_0 \cos \theta(t) \\ E_0 \sin \theta(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

where  $\theta(t)$  = time-dependent azimuth of the polarization beam,  $E_0$  = electric vector amplitude and  $t$  = time

After the reflection at a sample surface with an incident angle of  $\phi$ , the light beam then transversed a polarizer (P2) with its axis at  $45^\circ$  to the plane of incidence. The change in polarization of the light beam as a result of this, observed at the detector D2, can be described in terms of the product of Jones matrices as follows,

$$E_f = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_p e^{j\Delta} & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_0 \cos \theta(t) \\ E_0 \sin \theta(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

polarizer (P2)      sample (S)      rotating light ( $E_i$ )

where  $E_f$  describes the electric field of the detected light,  $r_p, r_s$  = Fresnel reflection coefficients; for the incident polarization  $p$ , parallel, and  $s$ , perpendicular, to the plane of incidence,  $\Delta$  = optical phase difference due to reflection from a sample surface.

Consequently, the total reflected intensity is given by

$$I_f = E_f E_f^* \quad (3)$$

; therefore,

$$I_f = \frac{1}{2} [R_p \cos^2 \theta(t) + R_s \sin^2 \theta(t) + \sqrt{R_p R_s} \sin 2\theta(t) \cos \Delta] \quad (4)$$

where  $R_p = r_p^2, R_s = r_s^2$  and  $I_0$  = constant.

In order to characterize a sample by way of ellipsometry, it is customary to determine a ratio  $\rho$  of the complex Fresnel reflection coefficients for the  $p$  and  $s$  polarization defined to be [4]

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} e^{j\Delta} \quad (5)$$

It is convenient to write  $\rho$  in the form

$$\rho = \tan \psi e^{j\Delta} \quad (6)$$

where  $\psi = \tan^{-1} \left( \frac{R_p}{R_s} \right)^{\frac{1}{2}}$  and  $\Delta$  are the ellipsometric angles.

Since the analyzing beam used in this experiment is rotating polarized light in which the azimuth depends upon the modulation signal, two required polarization directions, the parallel and perpendicular directions, can easily be identified using the reference signal provided by the signal from the detector D1.

When the light is modulated to be parallel to an incident plane, the intensity,  $I_p$ , detected by D2 is given by

$$I_p = \frac{I_0 R_p}{2} \quad (7)$$

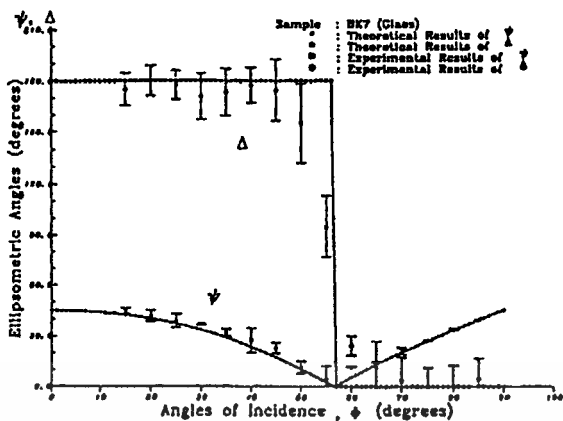


Figure 2 Comparison of ellipsometric parameters of BK7 obtained from the novel optical fiber ellipsometer (using  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ) to corresponding theoretical results. Reference Refractive Index 1.51-10.00 ( $\delta$ ). Experimental Refractive index 1.51-10.00. ( at  $\phi = 75^\circ$  )

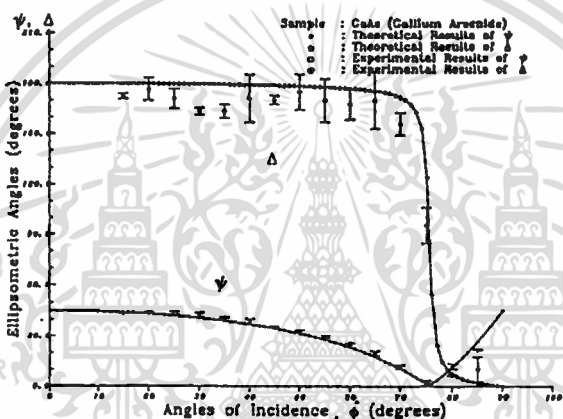


Figure 3 Comparison of ellipsometric parameters of GaAs obtained from the novel optical fiber ellipsometer (using  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ) to corresponding theoretical results. Reference Refractive Index 3.50-10.20 ( $\delta$ ). Experimental Refractive index 3.74-10.27. ( at  $\phi = 75^\circ$  )

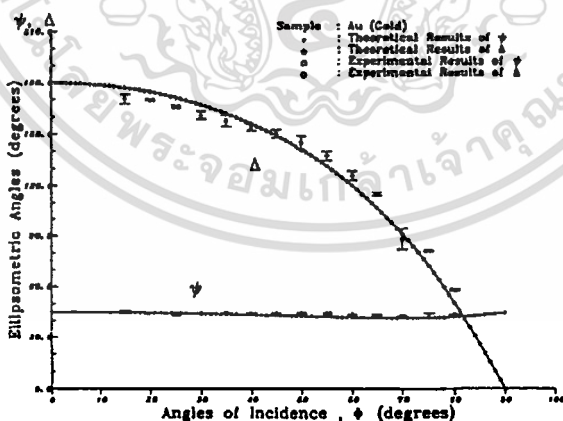


Figure 4 Comparison of ellipsometric parameters of Au obtained from the novel optical fiber ellipsometer (using  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ) to corresponding theoretical results. Reference Refractive Index 0.18-13.10 ( $\delta$ ). Experimental refractive index 0.28-12.92 ( at  $\phi = 75^\circ$  )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Likewise, when it becomes perpendicular to the incident plane, the intensity,  $I_s$ , is written as

$$I_s = \frac{I_0 R_s}{2} \quad (8)$$

The orientation, where the analysis could be simplified, of the incident polarization occurs when the azimuth is at  $45^\circ$  to the incident plane and the intensity is given by

$$I_{45} = \frac{I_0}{2} \left[ \frac{R_p}{2} + \frac{R_s}{2} + \sqrt{R_p R_s} \cos \Delta \right] \quad (9)$$

Clearly, ratio of equations (7) & (8) allows the determination of the ratio  $\frac{R_p}{R_s}$ , and the substitution of (7), (8) & (9) allows the phase shift  $\Delta$  to be determined, ellipsometrically characterizing the reflecting surfaces without any mechanical movement of optical component.

By making use of the Snell's law and expressions for Fresnel complex reflection coefficients [5], the equation used to determine the complex refractive index characterizing a sample is

$$\frac{N_1}{N_0} = \sin \phi \left[ 1 + \left( \frac{1 - \rho}{1 + \rho} \right)^2 \tan^2 \phi \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

where  $\phi$  = an incidence angle,  $N_0$  = the complex refractive index of medium 0 (medium of incidence),  $N_1$  = the complex refractive index of medium 1 (sample). Equation (10) shows that the complex refractive index of medium 1 can be determined if the refractive index of medium 0 (medium of incidence) is known and the ellipsometric ratio  $\rho$  is measured at angle of incidence  $\phi$ . Normally, the medium 0 is air which has a refractive index of 1.00.

#### 4. Experimental Results

To illustrate the performance of the optical fiber based ellipsometer, three different types of materials were studied and their characteristic were measured in terms of ellipsometric parameters  $\psi$  and  $\Delta$  as a function of the angle of incidence. The materials include a glass plate (BK7), gallium arsenide plate and

gold plate. The selection of materials under study is based on their different degrees of light absorption at the wavelength used. The glass plate, at the wavelength of 632.8 nm, is non-absorbing while gallium arsenide and gold are known to be low and high absorbing materials at the wavelength. According to such a distinctive absorbing property for each sample, their characteristics measured in terms of  $\psi$  and  $\Delta$  were distinguishable from one another as illustrated in Figures 2, 3 and 4. In these figures, comparison between measured and theoretical  $\psi$  and  $\Delta$  as well as the indices of refraction for each sample were presented.

#### 5. Conclusion

In conclusion, the preliminary study of the novel optical fiber ellipsometer performance has been demonstrated. The experimental results indicated that the instrument is capable of determining ellipsometric parameters as well as refractive indices of materials with different degrees of light absorption. This preliminary study is necessary as, for further work, it is well-known that these parameters have to be known prior to characterizing even more complex samples such as thin films if the materials are utilized as the thin film substrate [7].

#### 6. Acknowledgment

The authors are pleased to acknowledge support from the National Research Council of Thailand by way of a research fund.

#### References

- [1] P S Hauge, "Recent Development in Instrumentation in Ellipsometry", Surface Science, vol. 96, pp 108-140, 1980.
- [2] R P Tatum, J D C Jones and D A Jackson, "Optical Polarization State Control Scheme Using Fiber Optics and Bragg Cells", J. Phys. E. : Sci, Instum., vol. 19, pp 711-717, 1986.
- [3] R C Jones, "A New Calculus for the Treatment of Optical System", J. Opt. Soc. Am., vol. 31, pp 488-493, 1941.
- [4] R M A Azzam and N M Bashara, "Ellipsometry and Polarized Light", North Holland, Amsterdam 1977.
- [5] E Hecht and A Zajac, "Optics", Addison-Wesley, London, 1974.
- [6] H G Tompkins, "A User's Guide to Ellipsometry", Academic Press, New York, 1996.
- [7] I P Herman, "Optical Diagnostics for Thin Film Processing", Academic Press, New York, 1996.

## ประวัติผู้เขียน

นาย สืบตระกูล สุชาติ เกิดเมื่อวันที่ 6 ธันวาคม 2510 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษา  
วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยรามคำแหง ปีการศึกษา 2536 เข้ารับการศึกษาต่อใน  
ในระดับปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า  
คุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2538 มีงานวิจัยที่สนใจเกี่ยวกับเส้นใยแก้วนำแสง

ปี พ.ศ. 2537 เข้ารับราชการในตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 3 สังกัดภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยา  
ศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จนถึงปัจจุบัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้