

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาพฤติกรรมการเกิดโพลาริซ์ในสายไฟเบอร์

นางสาววิลาวัลย์ อนันตพวงค์
นางสาวศิริรัตน์ สุขงามเลิศ

๒พ.
๐๗/๑๗
๒๕๕๐

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **81617**
วัน,เดือน,ปี..... **19 ส.ย. 2551**

b. **119 33 ๖๖๕**
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Study Behavior of Polarization in Fiber Optics

Miss. Wilawan Anantanuphong

Miss. Sirirat Sukngamlert



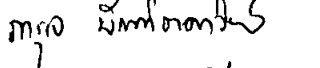

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of Requirement for the Degree of
Bachelor of Science
Department of Applied Physics
Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
Academic Year 2007

โครงการพิเศษเรื่อง	การศึกษาพฤติกรรมเกิดการเกิดโพลาริไซในสายไฟเบอร์
นักศึกษา	นางสาววิลาวัณย์ อนันตพวงศ์ นางสาวศิริรัตน์ สุขงามเลิศ
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง	
กรรมการ ศศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม	
กรรมการ อ.ภารุจ บัณฑิตาคาวิทย์	
กรรมการที่ปรึกษา รศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน	



(รองศาสตราจารย์วิชาญ เดชิตธีระ)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การศึกษาพฤติกรรมเกิดการเกิดโพลาไรซ์ในสายไฟเบอร์
นักศึกษา	นางสาววิลาวัลย์ อนันตพวงศ์ นางสาวศิริรัตน์ สุขงามเลิศ
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2550
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ปรีชา บุพาพิน

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาปรากฏการณ์ทางแสงในเส้นใยแก้วนำแสง โดยจะกล่าวถึงในรูปแบบ Ring resonator และอาศัยหลักทฤษฎีโพลาไรเซชัน ในที่นี้จะพิจารณาว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตามแบบของแมกซ์เวลล์ โดยที่รูปแบบการสั่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีความถี่เท่ากันแต่ จะทำมุมตั้งฉากกัน โดยมีตัวแปรทางคณิตศาสตร์ที่ใช้บรรยายการโพลาไรเซชันของแสงและตัวแปรที่จะใช้อธิบายอุปกรณ์ที่ทำให้แสงผ่านไปและเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะทางโพลาไรเซชัน อุปกรณ์ดังกล่าวนี้จะประกอบด้วยโพลาไรเซอร์เชิงเส้น และหน่วงตัวนำเฟส (Phase retardation) สุกท้ายได้วิเคราะห์การทำงานของเส้นใยแก้วนำแสงแบบไบโรสโคปไว้ที่นี้ด้วย

Special Project Title	Study Behavior of Polarization in Fiber Optic
Name	Miss. Wilawan Anantanuphong Miss. Sirirat Sukngamlert
Department	Applied Physics Faculty of Science
Program	Applied Physics
Academic Year	2007
Special Project Advisor	Asst.Prof. Preecha Yupapin

ABSTRACT

This project is Study Behavior of Polarization in Fiber Optic. Ring resonator and principle of Polarization has been described. In this place will consider that the light is the electro-magnet follows the model of Maxwell, shake magnetic field and the formats of electricity field have the same value but be perpendicular. The mathematics variable that uses narrates behavior of polarization behavior fiber optic and the equipment that makes the light changes and it was modification has been described. Possible applications of polarization in fiber optic principle established in this work are discussed.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ยุกพาพิน ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดสรรงบประมาณของภาควิชา เพื่อใช้ในงานวิจัย

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการ,แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสาทวิชาตั้งแต่การศึกษาระดับมัธยมศึกษาจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้ความอุปการะทุนการศึกษาเล่าเรียนและเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

นางสาววิลาวัลย์ อนันตพวงศ์

นางสาวศิริรัตน์ สุขงามเลิศ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตในการวิจัย	1
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เส้นใยแก้วนำแสง	4
2.1.1 โครงสร้างของใยแก้วนำแสง	4
2.1.2 การสูญเสียพลังงาน	6
2.1.3 มาตรฐานของเคเบิลใยแก้วนำแสง	8
2.1.4 ประเภทของใยแก้วนำแสง	8
2.1.4.1 Multimode Fiber Optic (MMF)	9
2.1.4.2 Singlemode Fiber Optic (SMF)	9
2.1.5 การเชื่อมต่อสายไฟเบอร์	10
2.1.5.1 การเชื่อมต่อเชิงกล (Mechanical Splice)	10
2.1.5.2 การเชื่อมต่อด้วยวิธีหลอมรวม (Fusion Splice)	10
2.1.5.3 หัวเชื่อมต่อ (Connectors)	11
2.1.5.3.1 หัวเชื่อมต่อแบบ ST	11
2.1.5.3.2 หัวเชื่อมต่อแบบ FC/PC	11
2.1.5.3.3 หัวเชื่อมต่อแบบ SC	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
2.1.5.3.4 หัวเชื่อมต่อแบบ SMF (Small Form Factor)	11
2.1.6 การทดสอบสายไฟเบอร์	12
2.1.7 ประโยชน์ของใยแก้วนำแสง	13
2.1.8 เคเบิลใยแก้วในไทย	14
2.1.9 อนาคตของใยแก้วนำแสง	15
2.1.10 ระบบตรวจจับด้วยเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber optic sensor)	15
2.1.10.1 หลักการตรวจจับด้วยใยแก้วนำแสงเบื้องต้น	17
2.2 แสงเลเซอร์	21
2.2.1 ความแตกต่างของแสงเลเซอร์กับแสงธรรมดา	22
2.2.2 เลเซอร์กับอุตสาหกรรม	23
2.2.3 เลเซอร์กับการสื่อสาร	24
2.3 โพลาริเซชัน	25
2.3.1 แสงโพลาไรซ์ชนิดเส้น (Linear polarized light)	26
2.3.2 โจนส์เวกเตอร์	28
2.3.3 โจนส์เมทริกซ์	35
2.3.4 สโตกส์เวกเตอร์	38
2.4 ออปติคอลลคัปเปอร์ (optical coupler)	42
2.4.1 โครงสร้างของออปติคอลลคัปเปอร์	42
2.5 Fiber isolators	45
2.6 Photodetector	46
2.7 Optical Gyroscope	47
2.8 Optical ring resonator	48
2.9 Fiber Polarization Controller	48
บทที่ 3 วิธีขั้นตอนดำเนินงานและวิจัย	
3.1 จุดประสงค์ในการดำเนินงานและวิจัย	52
3.2 อุปกรณ์	52
3.3 ขั้นตอนดำเนินงานและวิจัย	53
3.4 วิธีการทดลอง	54
บทที่ 4 ผลการจำลองวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมประยุกต์	

เอกสาร 4.1 ผลการทดลองไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน 55 ราคา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
4.1.1 ลักษณะรูปคลื่นที่ป้อนเข้าไปในโพรงสั่นพ้อง แบบวงแหวนใยแก้วนำแสง	55
4.1.2 การจำลองเอาต์พุตที่ปรากฏในโพรงสั่นพ้อง แบบวงแหวนใยแก้วนำแสง	56
4.1.3 การจำลองลักษณะเอาต์พุตที่แสดงผลทางoscilloscope	56
4.1.4 การประยุกต์ใช้งานจากผลปรากฏในโพรงสั่นพ้อง แบบวงแหวนใยแก้วนำแสง	58
4.1.4.1 การประยุกต์ใช้ในด้านกีฬา	58
4.1.4.2 การประยุกต์ใช้ในกล้องถ่ายภาพ	59
4.1.4.3 การประยุกต์โดยนำไปประดิษฐ์เข้ากับอุปกรณ์ต่างๆ	59
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลของงานวิจัย	62
5.2 ข้อเสนอแนะ	62
เอกสารอ้างอิง	63
ภาคผนวก	I

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 แสดงโจนส์เวกเตอร์แบบต่างๆ	34
2.2 สรุปลักษณะเมทริกซ์สำหรับโพลาริซชันชนิดต่างๆ	37
2.3 แสดงนอร์มอลไลซ์พารามิเตอร์สำหรับแสงโพลาริซชันหลายๆสถานะ	40
2.4 แสดงจำนวนพอร์ทของการต่อ	43
3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้คุณสมบัติของเซนเซอร์เปลี่ยนแปลง	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงความโค้งงอของเส้นใยแก้วนำแสง	2
รูปที่ 1.2 แสดงแผนภาพระบบการวัดสัญญาณเนื่องจากความโค้งงอขนาดเล็ก	2
รูปที่ 2.1 แสดงอุตสาหกรรมทางการสื่อสารด้วยระบบใยแก้วนำแสง	16
รูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพนวัตกรรมของอุปกรณ์ตรวจจับด้วยใยแก้วนำแสง	16
รูปที่ 2.3 แสดงนวัตกรรมของอุปกรณ์แผนวงจรรวมในปัจจุบัน	17
รูปที่ 2.4 แสดงหลักการวัดชนิด Intrinsic	18
รูปที่ 2.5 แสดงผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อทางเดินแสงในเส้นใยแก้ว	18
รูปที่ 2.6 แสดงการทำงานของเครื่องตรวจวัดความเข้มแสง ที่ใช้ในการวัดการสั่นสะเทือน	19
รูปที่ 2.7 แสดงการลดลงของสัญญาณที่เกิดการถ่ายเทบริเวณรอยต่อ (Cross coupling)	19
รูปที่ 2.8 แสดงการโค้งงอระดับเล็ก	20
รูปที่ 2.9 แสดงแผนภาพระบบการวัดสัญญาณเนื่องจากความโค้งงอขนาดเล็ก	20
รูปที่ 2.10 แสดงความแตกต่างของสัญญาณ	21
รูปที่ 2.11 แสดงเลเซอร์	22
รูปที่ 2.12 แสดงการสั่นของแสงธรรมชาติซึ่งมีสนามไฟฟ้า \vec{E} ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก \vec{H}	25
รูปที่ 2.13 แสดงแสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นซึ่งมีมุมที่เปลี่ยนไป	27
รูปที่ 2.14 แสดงสนามไฟฟ้าของแสงคพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีการวางตัวของสนามไฟฟ้าในแนวต่างๆกัน โดยทิศที่แสงเคลื่อนที่ไปทิศทาง +Z	29
รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะของรูปลิสซาจูส์สำหรับการสั่นในแนว x และ y ที่มีแอมพลิจูดไม่เท่ากันและมีความต่างเฟส $\Delta\phi = \phi_y - \phi_x$ ค่าต่างๆ	31
รูปที่ 2.16 แสดงโพลาไรซ์ชนิดวงรีในกรณี $\Delta\phi = \pi/2$	32
รูปที่ 2.17 (ก) แสดงโครงสร้างของออปติคอลคัปเปิลอร์ชนิด FBT	42
(ข) ภาคตัดขวางของออปติคอลคัปเปิลอร์ชนิด FBT	43
(ค) สัญลักษณ์ของ 2x2 ของออปติคอลคัปเปิลอร์ชนิด FBT	43
รูปที่ 2.18 หลักการพื้นฐาน Photodetector	46
รูปที่ 2.19 หลักการทำงาน Photodetector	46
รูปที่ 2.20 แสดง Optical Gyroscope	47
รูปที่ 2.21 แสดง ring resonator	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.22 แสดงรูปทรงของ POLARIZATION CONTROLLER	49
รูปที่ 2.23 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างการหน่วงความเร็วของแสงในแกนวงกลม แต่ละอันต่อค่าความยาวคลื่นในกรณีการขดเส้นใยแก้วนำแสง 1,3 และ 6 ขด ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของ Cladding 125 ไมโครเมตร	50
รูปที่ 2.24 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างการหน่วงความเร็วของแสงในแกนวงกลม แต่ละอันต่อค่าความยาวคลื่นในกรณีการขดเส้นใยแก้วนำแสง 1,3 และ 6 ขด ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของ Cladding 80 ไมโครเมตร	51
รูปที่ 3.1 แสดงการจัดวางเครื่องมือต่างๆที่ใช้ในการทดลอง	54
รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะรูปกราฟอินพุตจากการจำลอง	55
รูปที่ 4.2 แสดงเอาต์พุตที่ปรากฏในโปรแกรมป้องกันแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง จากการจำลองเปรียบเทียบกับอินพุต	56
รูปที่ 4.3 แสดงเอาต์พุตที่ปรากฏผลทาง oscilloscope	56
รูปที่ 4.4 แสดงเอาต์พุตที่ปรากฏในโปรแกรมป้องกันแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง จากการจำลองที่มีการเลื่อนเฟส	57
รูปที่ 4.5 แสดงเอาต์พุตที่ปรากฏผลทาง oscilloscope เมื่อทำการกำหนดค่าต่างๆเพื่อไม่ให้ เกิดปรากฏการณ์ kerr effect	57
รูปที่ 4.6 Full body gyroscope	58
รูปที่ 4.7 Power ball	58
รูปที่ 4.8 A gyroscope and shift lens help prevent image blur	59
รูปที่ 4.9 The Sony Cybershot is small in size, measuring approximately 3 1/2 x 2 1/8 x 3/4 inches	59
รูปที่ 4.10 Ken-Lab's KS6 Gyroscopic Stabilizer	60
รูปที่ 4.11 Adriel Heisey Flying with Gyro-Stabilized Camera	60
รูปที่ 4.12 Heart Island and Boldt Castle - Alexandria Bay, NY - Uncorrected Scan from a Provia 100/1000 slide, Pentax 67 90mm lens, Ken-lab KS6 Gyroscopic Stabilizer	60
รูปที่ 4.13 The LabWrench	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

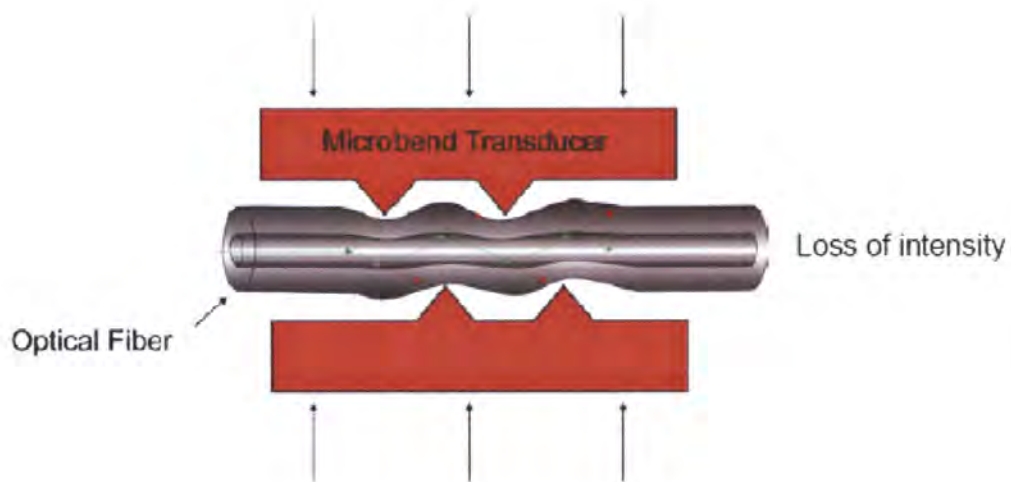
อุตสาหกรรมทางการสื่อสารด้วยระบบใยแก้วนำแสง และ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง ได้มีการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลามากกว่า 20 ปีที่ผ่านมา และได้มีการปฏิวัติระบบสื่อสารครั้งยิ่งใหญ่ที่โดยมาใช้ในการรับส่งข้อมูลผ่านทางเส้นใยแก้วนำแสง ที่มีประสิทธิภาพและจำนวนช่องของสัญญาณที่มากกว่า ในอีกด้านหนึ่งได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีของเส้นใยแก้วนำแสงให้มีความสามารถในการตรวจจับสิ่งต่างๆ ควบคู่ไปกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (Optoelectronic) และการตรวจจับในระบบสื่อสาร (Fiber optic communication) เทคโนโลยีการวัดด้วยใยแก้วนำแสง (Fiber optic sensor technology) ได้มีรูปแบบของการผลิตที่เป็นจำนวนมากจึงทำให้มีราคาถูก และสามารถตรวจจับได้หลากหลาย เช่น การวัดการขจัด, ความเร่ง, สนามแม่เหล็ก, เสียง, สนามไฟฟ้า, อุณหภูมิ, ความดัน, การสั่นสะเทือน, ตำแหน่งเชิงมุมและเชิงเส้น, ความเค้น, ความชื้น, ความหนืด, การวัดสมบัติทางเคมีและอื่นๆ โดยการวัดด้วยวิธีนี้ประสบความสำเร็จอย่างมากในเชิงการค้าเป็นเพราะว่าอุปกรณ์มีน้ำหนักเบาและมีขนาดที่เล็กอีกทั้งยังใช้พลังงานน้อยกว่าการวัดวิธีการอื่น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ทางแสงในเส้นใยแก้วนำแสงในรูปแบบ Ring resonator
2. เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้เส้นใยแก้วนำแสงในการตรวจวัดแบบ Ring resonator
3. วิเคราะห์การทำงานของเส้นใยแก้วนำแสงแบบ gyroscope

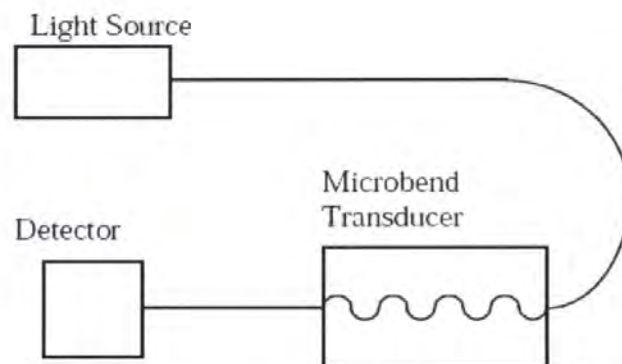
1.3 ขอบเขตการวิจัย

เมื่อใยแก้วนำแสงมีการผิดรูปหรือโค้งงอเนื่องจากสิ่งแวดล้อมจะทำให้เกิดการสูญเสียของสัญญาณเนื่องจากค่าของมุมวิกฤตภายในเส้นใยเปลี่ยนจนทำให้เกิดการสูญเสียเกิดการรั่วของสัญญาณมายัง Cladding เป็นผลให้ความเข้มของสัญญาณลดลงเนื่องจากความโค้งงอระดับเล็ก (Microbending) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 แสดงความโค้งงอของเส้นใยแก้วนำแสง

จากความโค้งงอขนาดเล็กนี้สามารถนำไปสร้างเป็นระบบตรวจวัด การสั่นสะเทือน ความดัน หรือ สิ่งอื่นๆ ได้ดังรูป โดยในส่วนของประกอบของตัวแปลงความโค้งงอขนาดเล็ก (Microbend transducer) สามารถใช้เป็นเส้นใยแก้วชนิดพิเศษที่มีความสามารถในการวัดค่าสูญเสียจากการโค้งงอได้ (Microbending loss)



รูปที่ 1.2 แสดงแผนภาพระบบการวัดสัญญาณเนื่องจากความโค้งงอขนาดเล็ก

การวัดความต่างกันของสัญญาณที่ขาออก(Output) ที่เปลี่ยนแปลงไปจากการกระทำของ สิ่งแวดล้อมต่างๆ อาจจะเปรียบเทียบจากแอมพลิจูดหรือ การเหลื่อมกันของสัญญาณ (ความต่างเฟส) สามารถนำไปวัดในวิธีการวัดการแทรกสอดที่ใช้ความต่างเฟสของสัญญาณอ้างอิง กับ สัญญาณที่ผ่าน เอกสารตัวอย่างที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.ศึกษาขั้นตอนการทำงานตลอดจนปัญหาและอุปสรรคในความสามารถของ fiber optic ว่ามีความสามารถในการตรวจวัดแบบ Ring resonator
- 2.สำรวจงานวิจัย ทฤษฎี และหน่วยที่เกี่ยวข้องกับความสามารถของ fiber optic ในการรับรู้สัญญาณ
- 3.เก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องและจำเป็นที่ต้องใช้ในการเกิดสัญญาณ
- 4.ออกแบบการทดลองจากทฤษฎีข้างต้น รวมถึงการจัดเก็บฐานข้อมูลและนำเข้าข้อมูลการเกิดสัญญาณ
- 5.ทดสอบใช้เครื่องมือและปรับปรุง
- 6.ใช้งานจริง
- 7.วิเคราะห์ผลที่ได้
- 8.สรุปผลที่ได้จากงานวิจัยและเสนอแนะ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลการเกิดโพลาริซในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง
- 2.เพื่อนำไปประยุกต์และปรับปรุงระบบเซนเซอร์ต่างๆต่อไป

บทที่ 3

วิธีขั้นตอนดำเนินงานและวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงการศึกษาปรากฏการณ์ทางแสงในเส้นใยแก้วนำแสงรูปแบบ Ring resonator และในการศึกษานี้ได้แบ่งเป็น 3 ส่วน ในส่วนที่หนึ่ง กล่าวถึงจุดประสงค์ในการดำเนินงานและวิจัย ในส่วนที่สองกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานและวิจัย และส่วนที่สามกล่าวถึงขั้นตอนดำเนินงานและวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 จุดประสงค์ในการดำเนินงานและวิจัย

1. เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ทางแสงในเส้นใยแก้วนำแสงในรูปแบบ Ring resonator
2. เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้เส้นใยแก้วนำแสงในการตรวจวัดแบบ Ring resonator
3. วิเคราะห์การทำงานของเส้นใยแก้วนำแสงแบบ gyroscope

3.2 อุปกรณ์

1. เครื่อง Laser Diode + Driver (ชนิด Current Control)	1	เครื่อง
2. เส้นใยแก้วนำแสง ขาว 2000 เมตร	1	เส้น
3. Fiber coupler	1	ตัว
4. Isolator	1	ตัว
5. Polarize Controller (PC)	1	ตัว
6. Polarize Beam Splitter (PBS)	1	เครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนดำเนินงานและวิจัย

ค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้คุณสมบัติของเซนเซอร์เปลี่ยนแปลง

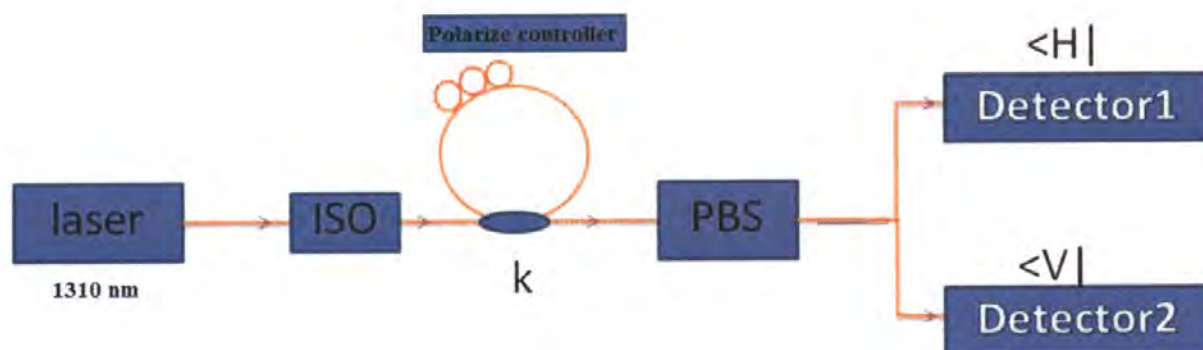
ตารางที่ 3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้คุณสมบัติของเซนเซอร์เปลี่ยนแปลง

Parameter	Value
Attenuation of the optical fiber, α (dB/km)	0.331
Wavelength of light, λ (nm)	1310
Refractive index of the single-mode fiber, n	1.467
Propagation constant, β (($_m$) ⁻¹)	7.036
Coupling coefficient of the fiber coupler 1, $k1$ (%)	94.8
Cavity length of fiber ring, L (m)	2000
Transmission coefficient of the ring excluding the fiber linear loss, ζ (dB)	0.517
Excess loss of coupler, η (dB)	0.1
Vacuum velocity of light, $c0$ (m/s)	3×10^8
Fizeau drag first-order correction factor	0.544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดลอง

1. จัดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.1 และทำการจัดวางเส้นใยแก้วนำแสง



รูปที่ 3.1 แสดงการจัดวางเครื่องมือต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

2. วัดค่าที่ได้จากการต่อเส้นใยแก้วนำแสงในแบบอนุกรมและแบบขนานที่มีความยาว 2000 เมตร
3. ยิงแสง Laser ความยาวคลื่น 1310 นาโนเมตร
4. ศึกษากราฟที่บันทึกได้จากการทดลอง
5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 เส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Optic)

สายสัญญาณที่ใช้กับเครือข่ายคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันมี 2 ประเภท โดยแบ่งตามชนิดของตัวนำที่ใช้ประเภทแรกคือ แบบที่ใช้โลหะเป็นตัวนำสัญญาณ (Conductive Metal) เช่น สายคู่เกลียวบิด (Twisted Pairs) และสายโคแอกซ์ (Coaxial Cable) ซึ่งปัญหาของสายที่ตัวนำเป็น โลหะนั้นก็คือ สัญญาณที่วิ่งอยู่ในสายนั้นอาจจะถูกรบกวนได้โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแหล่งต่างๆ เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ที่ผลิตสนามแม่เหล็ก หรือแม้กระทั่งปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า เป็นต้น และการเดินสายเป็นระยะทางไกลมากๆ เช่น ระหว่างประเทศจะมีการสูญเสียของสัญญาณเกิดขึ้น จึงต้องใช้อุปกรณ์สำหรับทวนสัญญาณคิดเป็นจำนวนมาก เพราะฉะนั้นจึงมีการคิดค้นและพัฒนาสายสัญญาณแบบใหม่ ซึ่งใช้ตัวนำซึ่งไม่ได้เป็น โลหะขึ้นมาก็คือ สายใยแก้วนำแสง (Fiber Optic) ซึ่งใช้สัญญาณแสงในการส่งแทนสัญญาณไฟฟ้า ทำให้การส่งสัญญาณไม่ถูกรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่างๆ ทั้งยังคงทนต่อสภาพแวดล้อมอีกด้วยและตัวกลางที่ใช้สำหรับการส่งสัญญาณแสงก็คือ ใยแก้วซึ่งมีขนาดเล็กและบางทำให้ประหยัดพื้นที่ไปได้มาก สามารถส่งสัญญาณไปได้ไกลโดยมีการสูญเสียของสัญญาณน้อย ทั้งยังให้อัตราข้อมูล (Bandwidth) ที่สูงกว่าสายแบบโลหะหลายเท่าตัว

2.1.1 โครงสร้างของใยแก้วนำแสง

ใยแก้วนำแสงมีโครงสร้าง ที่ประกอบไปด้วยส่วนในที่ เรียกว่าแกน หรือ Core เป็นส่วนที่แสงเดินทางผ่าน และส่วนนอกที่หุ้มแกนอยู่เรียกว่า Cladding ทำ ด้วยแก้วชนิดที่ เรียกว่าแก้ว Silica ซึ่งเป็นสารที่ไม่ เป็นตัวนำไฟฟ้า (Di-electric) Core และ Cladding จะเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ของใยแก้วนำแสง เพราะตัว Core ใช้กักกันแสงให้เดินทางผ่านตัวมันไป โดยจะไม่ให้ กระจัดกระจายออกมาข้างนอก นอกจากนั้น ยังมีตัวป้องกัน คือ Coating (ตัว Coating อาจทำจากซิลิโคนหรือวัสดุ อื่น ๆ ก็ได้) มีตัว Buffer ป้องกันการกระแทก ยังมีวง แหวนโลหะเพื่อทนต่อการดึงและมี Polyurethane ซึ่งมีลักษณะ เหมือนกับเคเบิลทั่ว ๆ ไป คือ มีสีดำหุ้มอยู่เพื่อป้องกัน การกระแทกจากภายนอก เคเบิลใยแก้วนั้น ทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากใยแก้วซิลิกา คอนที่บริสุทธิ์มาก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ประมาณ 0.1-0.15 มม ทำหน้าที่ เป็นท่อนำคลื่นให้กับคลื่นแสง ด้วยหลักการสะท้อนแสง ใน ขอบเขตของใยแก้วนั้น

แกน (Core)

เป็นส่วนตรงกลางของเส้นใยแก้วนำแสง และเป็นส่วนนำแสง โดยดัชนีหักเหของแสงส่วนนี้ ต้องต้องมากกว่าส่วนของแคลคล้ำแสงที่ผ่านไป ในแกนจะถูกขังหรือเคลื่อนที่ไปตามแกนของเส้นใยแก้วนำแสงด้วยกระบวนการสะท้อนกลับหมดภายใน

ส่วนห่อหุ้ม (Cladding)

เป็นส่วนที่ห่อหุ้มส่วนของแกนเอาไว้ โดยส่วนนี้จะมีดัชนีหักเหต่ำกว่าส่วนของแกน เพื่อให้แสงที่เดินทางภายในแกนสะท้อนอยู่ภายในแกนตามกฎของการสะท้อนด้วยการสะท้อนกลับหมด โดยใช้หลักของมุมวิกฤติ

ส่วนป้องกัน (Coating/Buffer)

เป็นชั้นที่ต่อจากแคลคเป็นทีกันแสงจากภายนอกเข้าเส้นใยแก้วนำแสงและยังใช้ประโยชน์เมื่อมีการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง โครงสร้างอาจจะประกอบไปด้วยชั้นของพลาสติกหลายๆ ชั้น นอกจากนั้นส่วนป้องกันยังทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันจากแรงกระทำภายนอกอีกแล้ว ตัวอย่างของค่าดัชนีหักเห เช่น แกนมีค่า ดัชนีหักเหประมาณ 1.48 ส่วนของแคลคและส่วนป้องกันซึ่งทำหน้าที่ป้องกันแสงจากแกนออกไปภายนอกและป้องกันแสงภายนอกกระทบ จะมีค่าดัชนีหักเหเป็น 1.46 และ 1.52 ตามลำดับ

คลื่นแสงและไฟเบอร์ออฟติก

สายไฟเบอร์ออฟติกทำจากใยแก้วขนาดเล็กซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ แกน หรือคอร์ (core) และถูกห่อหุ้มด้วยแคลคดิง (Cladding) แสงที่เป็นตัวนำสัญญาณจะถูกส่งเข้าไปในคอร์ เนื่องจากส่วนคอร์และแคลคดิงมีค่าดัชนีหักเหไม่เท่ากัน ทำให้แสง กระทบผิวของแคลคดิงแล้ว สะท้อนกลับหมด (Total Reflection) ทำให้แสงเดินทางเฉพาะส่วนที่เป็นคอร์ไปจนถึงปลายทาง การ

เคลื่อนที่ของแสงไปตามกฎการส่งสัญญาณของแสง (Principle of the transmission) ซึ่งสรุปคร่าวๆ การคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วของแสง(Velocity)

ความเร็วของแสงที่เดินทางในใยแก้วนั้นจะถูกกำหนดโดยค่าดัชนีหักเหแสง (Refractive Index) ของคอร์ใยแก้ว ค่าดัชนีหักเหแสง (n) เป็นค่าที่ไม่มีหน่วยและเป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วของแสงในสุญญากาศต่อความเร็วของแสงในวัตถุนั้น

$$n = v/c \quad (2.1)$$

โดย n: ค่าดัชนีหักเหแสงของวัตถุ (Refractive Index)

c: ความเร็วแสงในสุญญากาศ (3×10^8 m/s)

v : ความเร็วของแสงในวัตถุ

โดยทั่วไปค่าของ n จะอยู่ที่ประมาณ 1.45-1.55 แสงที่ส่องเข้าไปในใยแก้วด้วยมุมตกกระทบที่ต่างกันจะไม่เดินทางแนวเดียวกัน แสงที่ส่องตรงไปยังศูนย์กลางของใยแก้ว จะเดินทางเกือบจะเป็นเส้นตรง ส่วนแสงที่ส่องด้วยมุมตกกระทบที่ใหญ่ หรือส่องไปยังเปลือกนอกของคอร์ จะเดินทางตามแนวที่ยาวกว่าจากต้นสายไปปลายสาย ดังนั้นจึงเดินทางค่อนข้างช้ากว่าที่แสงเดินทางในใยแก้วจะเรียกว่า 'โหมด (mode)' เมื่อแสงเดินทางในไฟเบอร์จะเกิดการสูญเสียพลังงาน(Attenuation)

2.1.2 การสูญเสียพลังงาน Attenuation

การสูญเสียพลังงาน (Attenuation) ของแสงในสายไฟเบอร์เกิดจากหลายสาเหตุ ดังนี้

Light Absorption

การดูดกลืนแสงจะหมายถึงการที่แสงเปลี่ยนพลังงานไปเป็นความร้อน การดูดกลืนนี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสายไฟเบอร์ ซึ่งแบ่งออกได้จาก 2 สาเหตุ คือ อินทรินสิก (Intrinsic) คือเกิดจากเนื้อสารที่ใช้ทำสายไฟเบอร์ และเอ็กสทรินสิก (Extrinsic) ซึ่งเกิดจากความไม่บริสุทธิ์ของสายไฟเบอร์ เช่น มีโมเลกุล OH ซึ่งจะมีผลมากที่ความยาวคลื่นแสงประมาณ 1240 nm และ 1390 nm การสูญเสียที่เกิดจากเอ็กสทรินสิกจะมีค่าน้อยมากสำหรับสายไฟเบอร์ที่ใช้ในปัจจุบัน

Rayleigh Scattering

การแตกกระจายของแสงก็มีผลต่อการสูญเสียพลังงานของแสงเช่นกันการแตกกระจายของแสงเกิดจากการที่โฟตอนของแสงวิ่งชนโมเลกุลของของสายไฟเบอร์ทำให้แสงแตกกระจายไปทุกทิศทางซึ่งบางส่วนอาจจะเดินทางออกนอกคอร์ของไฟเบอร์ หรือมีบางส่วนที่สะท้อนกลับ

Bending Loss

เกิดจากการที่สายไฟเบอร์โค้งงอทำให้แสงบางส่วนหลุดออกจากส่วนคอร์ของใยแก้ว ตัวอย่างเช่น สายแบบซิงเกิลโหมดอาจโค้งงอได้โดยรัศมีไม่เกิน 10 cm ถ้าการโค้งงอมากกว่านี้การสูญเสียสัญญาณจะเพิ่มขึ้นเป็นค่าทวีคูณรัศมีการโค้งงอของสายไฟเบอร์จะขึ้นอยู่กับการออกแบบสายไฟเบอร์และความยาวคลื่นแสงที่ใช้

ค่าสูญเสียสัญญาณ (Attenuation) สำหรับความยาวคลื่นแสงที่ใช้ จะคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณแสงที่ส่งเข้าใยแก้วกับกำลังสัญญาณแสงที่ได้รับที่ปลายสาย ซึ่งค่านี้จะแสดงในหน่วยเดซิเบล (Decibel หรือ dB) การวัดค่าสูญเสียนั้นจะต้องรวมเอาค่าสูญเสียจากทุกๆ สาเหตุเข้าด้วยกัน

จากข้างบนที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียสัญญาณกับความยาวคลื่นแสงที่ใช้ ดังนั้นระบบการสื่อสาร โทรคมนาคมจะใช้แสงที่มีความยาวคลื่นที่ทำให้ค่าสูญเสียต่ำดังแสดงในกราฟข้างบนซึ่งจะมีช่วงความยาวคลื่นคือ

- 820 - 880 nm (Short Haul)
- 1285 - 1330 nm (Medium Haul)
- 1525 - 1575 nm (Long Haul)

อีกสาเหตุหนึ่งที่มีผลต่อการส่งสัญญาณคือ การแยกกระจาย (Dispersion) ซึ่งจะมีผลทำให้แบนด์วิธของช่องสัญญาณลดลง การแยกกระจายจะมีหลายประเภท ประเภทหลักๆ มีดังนี้

Modal Dispersion

เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นถูกส่งเข้าไปในใยแก้วนำแสงพลังงานของแสงจะไม่ถูกส่งไปถึงสายทั้งหมด เนื่องจากแสงที่ส่งเข้าไปจะเดินทางในใยแก้วหลายแนว หรือหลายโหมด (Mode) ซึ่งแสงไม่รวมกันใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ละโหมคจะแบ่งพลังงานกัน บางโหมคอาจเดินทางโดยใช้เวลามากกว่าโหมคอื่น ทำให้พลังงานของแสงที่ปลายสายลดลง

Chromatic Dispersion

แสงที่ส่องเข้าไปในสายจะประกอบด้วยสเปกตรัมเล็ก ๆ ของความยาวคลื่นแสง ด้วยเหตุนี้แสงจึงเดินทางด้วยความเร็วที่ต่างกัน เนื่องจากความเร็วของแสงขึ้นอยู่กับดัชนีหักเหความยาวคลื่นก็เช่นกัน

การแบ่งประเภทของสายไฟเบอร์นั้นจะใช้โมเดลดิสเพอร์ชันเป็นเกณฑ์คือสายไฟเบอร์ประเภทที่โมเดลดิสเพอร์ชันมีผล (มัลติโหมค) และสายไฟเบอร์ประเภทที่ไม่แสดงโมเดลดิสเพอร์ชัน (ซิงเกิลโหมค)

- สายไฟเบอร์แบบมัลติโหมคจะมีขนาดคอร์ใหญ่กว่ามาก (ประมาณ 50-100 ไมครอน) ซึ่งอนุญาตให้แสงหลายโหมคผ่านได้
- สายไฟเบอร์แบบซิงเกิลโหมคมีขนาดประมาณ 5-10 ไมครอน อนุญาตให้แสงโหมคเดียว (1310 nm หรือ 1550nm) ผ่านได้เท่านั้นซึ่งทำให้การแตกกระจายของสัญญาณลดลงได้มาก

2.1.3 มาตรฐานของเคเบิลใยแก้วนำแสง

ในปี 2528 Bellcore ได้พัฒนามาตรฐานระบบที่มีชื่อว่า SONET (Synchronous Optical Network ทำให้การสื่อสารข้อมูล ในเครือข่ายดิจิทัลที่ใช้เคเบิล ใยแก้วนำแสง เป็นสื่อรับ-ส่งข้อมูล มีความยืดหยุ่นและถูก ต้องนำ เชื่อถือมากยิ่งขึ้นทั้งในด้านของประสิทธิภาพ ของ การสื่อสารข้อมูล ทำให้สามารถลดจำนวนสายเคเบิล ที่เคย มีจำนวนหลาย ๆ สาย ให้เหลือเพียงสายเส้นเดียวได้ โดย ที่ทาง คณะกรรมการ ที่ปรึกษาด้านโทรศัพท์และโทรเลข ระหว่างประเทศ (CCITT) ได้ประยุกต์และ กำหนดให้ SONET เป็นมาตรฐานสากล แบบหนึ่ง โดยที่มีการส่งผ่านข้อมูลด้วยความเร็ว 155 เมกะบิต ต่อวินาที และเรียกมาตรฐานนี้ว่า Synchronous Transport Module หรือ STM-1 ทั้งนี้ยังสามารถนำ STM-1 ไปใช้ร่วมกับอุปกรณ์ ระดับสูง ที่ใช้โครงสร้างการสื่อสาร แบบสองทางด้วยสัญญาณดิจิทัล เพื่อให้ความเร็วในการ ส่งข้อมูลสูงขึ้นเป็น 622 เมกะบิต ต่อวินาที (STM-4) และ 2.5 กิกะบิตต่อวินาที (STM-16) ได้ด้วย ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันทั่วโลกแต่อย่างไรก็ตาม SONET ก็เป็นการกำหนดมาตรฐาน

เฉพาะจากภาคส่งเท่านั้น ทำให้เกิดความจำเป็นที่ จะต้อง มีการหามาตรการเพื่อกำหนดมาตรฐาน ของ เอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับ เคเบิลใยแก้วในภาครัฐด้วย และท้ายสุดก็ได้มีการกำหนดมาตรฐาน ของความเร็วในการส่งข้อมูลคอมพิวเตอร์ ผ่านเคเบิลใยแก้ว ที่เรียกว่า FDDI (Fiber Distributed Data Interface) ได้ถูกกำหนดขึ้นมาที่ความเร็ว 100 เมกะบิตต่อวินาที

2.1.4 ประเภทของใยแก้วนำแสง

ภายในใยแก้วนำแสงนั้นจำนวนลำแสงที่เดินทางหรือเกิดขึ้นจะเป็นตัวบอกโหมดของแสงที่เดินทางภายในเส้นใยแก้วนำแสงนั้นกล่าวคือ ถ้ามีแนวลำแสงอยู่แนวเดียวเรียกว่า เส้นใยแก้วนำแสง โหมดเดียว (Singlemode Fiber) แต่ถ้าภายในเส้นใยแก้วนำแสงนั้นมีแนวลำแสงอยู่จำนวนหลายลำแสง เรียกว่าเส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมด (Multimode Fiber) นอกจากการแบ่งชนิดใยแก้วนำแสงตาม ลักษณะของโหมดแล้วยังมีวิธีอื่นที่แบ่ง โดยวัสดุที่ทำเช่นเส้นใยที่ทำจากแก้วพลาสติกหรือโพลีเมอร์

2.1.4.1 Multimode Fiber Optic (MMF)

สายไฟเบอร์แบบมัลติโหมด (Multimode Fiber Optic หรือ MMF) เป็นสายไฟเบอร์ที่นิยมใช้งานในระบบ LAN มากที่สุด โครงสร้างภายในของเส้นใยแก้วนำแสง จะประกอบด้วยแกนและเคลด ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมด ประเภทที่นิยมกันมากที่สุดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนที่ 62.8 ไมครอน (1 micron = 10⁻⁶m = mm) และส่วนที่เป็น เคลดมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 125 ไมครอน ซึ่งส่วนใหญ่จะเรียกสายไฟเบอร์ประเภทนี้สั้นๆ เป็น 62.5/125 MMF ส่วนสายไฟเบอร์ขนาดอื่นที่นิยมรองลงมาคือ 50/125 MMF

ขนาดของแกนของสายมัลติโหมดจะมีขนาดใหญ่กว่าสายแบบซิงเกิลโหมด สายไฟเบอร์แบบมัลติโหมดนี้ยังแบ่งย่อยได้อีกตามลักษณะของดัชนีหักเหของส่วนที่แกนและเคลด เช่น ใยแก้วนำแสงชนิดดัชนีชั้นบันได (Step Index) และดัชนีรูปมน (Graded Index) เป็นต้น

เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนของเส้นใยแก้วนำแสงหลายโมนั้นมีขนาดใหญ่ ดังนั้นแสงที่ตกกระทบที่ปลายส่งของเส้นใยแก้วนำแสงมีมุมตกกระทบที่ต่างกันหลายค่า จากหลักการสะท้อนกลับหมดของแสงที่เกิดขึ้นภายในส่วนของแกนทำให้มีแนวลำแสงที่เกิดขึ้นหลายแนว ซึ่งแนวการเดินทางของแสงจะนิยมเรียกว่า โหมด ดังนั้นคำว่า "มัลติโหมด (Multimode)" จึงหมายถึงสายใยแก้วที่อนุญาตให้แสงเดินทางผ่านหลายแนวนั่นเอง

2.1.4.2 Singlemode Fiber Optic (SMF)

สายไฟเบอร์ออฟติกแบบซิงเกิลโหมด (Singlemode Fiber Optic หรือ SMF) มีเส้นใยแก้วส่วน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกนขนาดเล็กกว่าสายมัลติโหมด โดยจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนประมาณ 8-10 ไมครอน และส่วนที่เป็นเคลดประมาณ 125 ไมครอนสายแบบนี้จะอนุญาตให้แสงเดินทางเพียงแนวเดียว ซึ่งเป็นที่มาของคำว่า ซิงเกิล โหมด (Single mode) ข้อดีของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวคือ แสงจะไม่เกิดการแตกกระจาย (Modal Dispersion) ซึ่งเกิดขึ้นกับเส้นใยแสงชนิดหลายโหมด ดังนั้นจึงทำให้การรับสัญญาณที่ปลายสายดีกว่า ทำให้ส่งสัญญาณได้ไกลกว่า

2.1.5 การเชื่อมต่อสายไฟเบอร์

การส่งสัญญาณแสงไปในสายใยแก้วนำแสงจะต้องทำการแปลงสัญญาณไฟฟ้าจากอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณให้เป็นสัญญาณแสงก่อนจึงจะสามารถส่งสัญญาณผ่านไปในสายใยแก้วนำแสงได้ ระบบสื่อสารใยแก้วนำแสงโดยทั่วไปจะต้องมีการเชื่อมต่อในส่วนของใยแก้วนำแสงเสมอ โดยการเชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงนี้อาจมีการคลาดเคลื่อน ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณได้จากลักษณะต่างๆ ของใยแก้ว เช่น จากการที่ตำแหน่งของแกนวางไม่ตรงกันหรือการมีระยะห่างระหว่างแกน เป็นต้น จึงได้มีการคิดค้นวิธีการต่างๆ ที่นำมาใช้เชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงเพื่อให้มีการสูญเสียที่น้อยที่สุด

การเชื่อมต่อใยแก้วนำแสงมีหลายวิธี ซึ่งการที่จะเลือกใช้วิธีใดก็แล้วแต่ความเหมาะสมกับงานต่างๆ ที่ต้องการติดตั้งในระบบสื่อสาร หรือเครือข่ายสื่อสารดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1.5.1 การเชื่อมต่อเชิงกล (Mechanical Splice)

หลักการทั่วไปของการเชื่อมต่อเชิงกลก็คือ การวางเส้นใยแก้วนำแสงให้อยู่ในแนวแกนเดียวกัน โดยใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสม และพยายามทำให้ปลายทั้งสองของเส้นใยแก้วนำแสงอยู่ชิดกันมากที่สุด ซึ่งการออกแบบอุปกรณ์ต่างๆ ในการเชื่อมต่อนี้ จะช่วยลดการสูญเสียแสงเนื่องจากการติดตั้งจากการเบี่ยงเบนในแนวต่างๆ ลง ตัวอย่างเช่น การที่จะส่งผ่านสัญญาณแสงจากเส้นใยแก้วเส้นหนึ่งไปยังอีกเส้นหนึ่ง ให้มีการสูญเสียน้อยที่สุด ตรงรอยต่อระหว่างเส้นใยแก้วทั้งสอง อาจมีการใช้เจลเชื่อมต่อด้วย (Index Matching Gel) เป็นของเหลวใสที่มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกับค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วนำแสง การเชื่อมต่อวิธีนี้อาจทำให้เกิดการสูญเสียอยู่ในช่วง 0.1-0.5 dB

2.1.5.2 การเชื่อมต่อด้วยวิธีหลอมรวม (Fusion Splice)

การเชื่อมต่อด้วยวิธีการหลอมรวม เป็นวิธีการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงสองเส้นด้วยการใช้ความร้อนปลายเส้นใยแก้ว จากนั้นปลายเส้นใยแก้วก็จะถูกดันมาเชื่อมต่อกัน การเชื่อมต่อในลักษณะนี้เป็นการเชื่อมต่อแบบถาวร เส้นใยแก้วนำแสงที่เชื่อมต่อกันแล้วดูเหมือนว่าเป็นเส้นเดียวกัน การสูญเสียที่

เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยวิธีนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.01-0.2 dB ในขั้นตอนของการเชื่อมต่อ นั้น ความร้อนที่ทำให้ปลายเส้นใยแก้วนำแสงอ่อนตัวนั้น มาจากประกายไฟที่เกิดจากการอาร์ระหว่างข้อวิเล็กโหมค ในการหลอมรวม

สำหรับการเชื่อมต่อแบบหลอมรวมแบบเดิมนั้น การปรับตำแหน่งการวางตัวของเส้นใยแก้วนำแสง 2 เส้น อาศัยวิธีการปรับฐานรองด้วยการสังเกตผ่านกล้องขยาย แต่ในปัจจุบันมีการใช้วิธีการทางแสงมาช่วยในการจัดวางดังกล่าว ทั้งนี้เพื่อให้การดำเนินการเป็นไปอย่างอัตโนมัติ วิธีการนี้มีชื่อว่า "แอลไอดี (Light Injection and Detection, LID)" โดยอาศัยหลักการตรวจวัดปริมาณแสงที่ได้จากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่สองซึ่งส่งผ่านมาจากเส้นใยแก้วเส้นที่ I ถ้าพบว่าการวางตัวของเส้นใยแก้วทั้งสองอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมปริมาณแสงที่ตรวจวัดได้จะให้ค่ามากที่สุดพร้อมที่จะทำการหลอมรวม แสงที่ใช้ในการตรวจสอบมาจากการส่งผ่านแสงของแอลไอดี เข้าไปในบริเวณที่เส้นใยแก้วถูกทำให้โค้ง โดยท่อทรงกระบอกซึ่งมีรัศมีเล็ก (ประมาณ 2-3 มิลลิเมตร) และการตรวจวัดแสงก็อาศัยอุปกรณ์รับแสง ซึ่งวางชิดกับบริเวณที่ถูกทำให้โค้งของเส้นใยแก้วนำแสง วิธีการตรวจวัดแสงดังกล่าว อาศัยคุณสมบัติของใยแก้วนำแสงเกี่ยวกับการงอของเส้นใยแก้วที่ทำให้เกิดการสูญเสียขึ้น

2.1.5.3 หัวเชื่อมต่อ (Connectors)

นอกจากการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงเข้าด้วยกันตามวิธีการหลอมรวมดังที่กล่าวมาแล้ว การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงยังสามารถทำได้โดยใช้หัวเชื่อมต่ออีกด้วย การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงด้วยหัวเชื่อมต่อทำให้ผู้ใช้มีความสะดวก สามารถถอดเปลี่ยนได้ตามความจำเป็น ในปัจจุบันมีการผลิตหัวเชื่อมต่อสำหรับเส้นใยแก้วนำแสงออกมาหลายแบบ ซึ่งการเลือกใช้แบบใดก็ขึ้นอยู่กับสภาพการใช้งานเป็นหลัก โดยทั่วไปแล้วหัวเชื่อมต่อได้ถูกออกแบบมาเพื่อช่วยให้ปลายเส้นใยแก้วนำแสงอยู่ใกล้กันมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ นอกจากนี้หัวเชื่อมต่อยังต้องมีคุณสมบัติอื่นๆ อีก เช่น แข็งแรงทนทาน เมื่อใช้งานทำให้เกิดการสูญเสียของแสงต่ำและมีราคาถูก เป็นต้น ซึ่งในเอกสารนี้จะนำเสนอถึงวิธีการเชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงด้วยวิธีนี้

2.1.5.3.1 หัวเชื่อมต่อแบบ ST

หัวต่อแบบ ST นี้ได้รับการออกแบบโดยบริษัท AT&T ซึ่งเป็นหัวเชื่อมต่อที่นิยมมากที่สุดสำหรับสายไฟเบอร์แบบมัลติโหมค

2.1.5.3.2 หัวเชื่อมต่อแบบ FC/PC

เอกสารนี้เป็นเอกสารหัวเชื่อมต่อแบบ FC/PC จะมีลักษณะคล้ายๆ กับหัวเชื่อมต่อแบบ ST และเป็นหัวเชื่อมต่อที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคยเป็นที่นิยมใช้กับสายซิงเกิลโหมดมาก

2.1.5.3.3 หัวเชื่อมต่อแบบ SC

เป็นหัวเชื่อมต่อที่กำลังเป็นที่นิยมใช้กับสายไฟเบอร์ในปัจจุบัน

2.1.5.3.4 หัวเชื่อมต่อแบบ SMF (Small Form Factor)

เนื่องจากหัวเชื่อมต่อที่กล่าวมาข้างต้นเป็นหัวเชื่อมต่อที่มีขนาดใหญ่ทำให้เปลืองพื้นที่บนอุปกรณ์เครือข่าย เช่น สวิตช์ ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบหัวเชื่อมต่อใหม่ที่มีขนาดเล็ก เช่น หัวเชื่อมต่อแบบ MT-RJ ออกแบบโดยบริษัท AMP ซึ่งปัจจุบันเปลี่ยนชื่อเป็น Tyco เป็นหัวเชื่อมต่อประเภท Small Form Factor ที่ออกแบบให้มีขนาดเล็กและใช้งานได้ง่าย

2.1.6 การทดสอบสายไฟเบอร์

เมื่อติดตั้งสายไฟเบอร์เสร็จเรียบร้อยแล้วก่อนที่จะใช้งานสายไฟเบอร์นั้นจำเป็นต้องทำการทดสอบสายก่อน เพื่อให้แน่ใจได้ว่าสายไฟเบอร์นั้นได้รับส่งข้อมูลได้ตามต้องการ ซึ่งการทดสอบด้านต่างๆ มีดังนี้

- การทดสอบด้านเมคานิก (Mechanical Tests)
- การทดสอบด้านกายภาพ (Geometrical Tests)
- การทดสอบเกี่ยวกับคุณสมบัติของสาย (Optical Tests)
- การทดสอบเกี่ยวกับการรับส่งสัญญาณ (Transmission Tests)

สำหรับการทดสอบ 3 ประเภทแรก จะทดสอบแค่ครั้งเดียว เพราะค่าพารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในระหว่างการใช้งานก่อนที่จะมีการใช้งานสายไฟเบอร์นั้นต้องมีการตรวจวัดค่าคุณสมบัติต่างๆ ของสายก่อน ซึ่งการวัดค่าต่างๆ นี้จะถูกอธิบายใน FOTP (Fiber Optic Test Procedure) ซึ่งเป็นขั้นตอนการทดสอบที่เสนอโดยสมาคม EIA (Electronic Industries Association) และได้ถูกกำหนดใน ITU-T G650 หรือในเอกสาร EN 188 000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบสายไฟเบอร์

Mechanical	Geometrical	Optical	Transmission
Traction	Concentricity	Index Profile	Bandwidth
Torsion	Cylindricity	Numerical Aperture	Optical Power
Bending	Core Diameter	Spot Size	Optical Loss
Temperature	Cladding Diameter	Reflectometry	

การทดสอบการรับส่งข้อมูล

การทดสอบหลักๆ ของสายไฟเบอร์ที่ติดตั้งแล้ว เพื่อให้แน่ใจได้ว่าสายไฟเบอร์สามารถรับส่งข้อมูลได้ตามที่ความต้องการมีดังนี้

- การทดสอบการสูญเสียของสัญญาณของลิงค์ (End-to-End Optical Link Loss)
- อัตราการสูญเสียต่อหน่วยความยาว (Attenuation)
- การสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อแบบต่างๆ (Splice, Connectors)
- ความยาวของสายไฟเบอร์

การทดสอบแบบอื่นๆ เช่น แบนด์วิธ หรือการสูญเสียเนื่องจากการแตกกระจายของแสง (Modal Dispersion) การสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับของแสง

การสูญเสียของสัญญาณแสง (Optical Loss Budget)

ค่าการสูญเสียของสัญญาณแสงที่เดินทางผ่านสายไฟเบอร์ออฟติกนั้นจะมีข้อจำกัดอยู่ เพื่อให้การรับส่งข้อมูลเป็นไปได้อย่างถูกต้องซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับหลายอย่าง เช่น กำลังแสงที่ใช้ส่ง ความสามารถในการรับสัญญาณของตัวรับสัญญาณ การเชื่อมต่อสายสัญญาณไม่ว่าจะเป็นการสไปลซ์ หรือการใช้หัวเชื่อมต่อเพื่อให้สามารถคำนวณค่าสูญเสียของสายสัญญาณได้ ต่อไปนี้เป็นค่าสูญเสียที่นิยมใช้ในการคำนวณ

- 0.2 dB/km สำหรับสายซิงเกิลโหมดที่ความยาวคลื่น 1550 nm
- 0.35 dB/km สำหรับสายซิงเกิลโหมดที่ความยาวคลื่น 1310 nm
- 1.0 dB/km สำหรับสายมัลติโหมดที่มีความยาวคลื่น 1300 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทที่จำหน่ายสายไฟเบอร์มัลติโหมดที่มีความยาวคลื่น 850 nm อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 0.05 dB สำหรับการสไปลซ์แบบหลอมละลาย (Fusion Splice)
- 0.1 dB สำหรับการสไปลซ์เชิงกล (Mechanical Splice)
- 0.2-0.5 dB สำหรับการเชื่อมต่อโดยใช้หัวเชื่อมต่อ (Connector)
- 3.5 dB สำหรับการใช้ตัวแยกสัญญาณจาก 1 ไป 2 (Splitter)

หลังจากที่ทราบค่าโดยประมาณของการสูญเสียอันเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆ แล้ว ค่าสูญเสียของสัญญาณแสงของลิงก์ก็สามารถคำนวณได้

2.1.7 ประโยชน์ของใยแก้วนำแสง

1. การลดทอนสัญญาณในเคเบิลใยแก้ว มีค่าต่ำกว่าในสายเคเบิลธรรมดา ทำให้การติดตั้งระบบเคเบิลใยแก้ว เพื่อการสื่อสารเสถียรลงทุนต่ำกว่า เพราะในเคเบิล ธรรมดา ต้องมีสถานีทวนสัญญาณทุก ๆ 3-5 กิโลเมตร ส่วนใน กรณีของเคเบิลใย แก้วมีระยะห่างได้ถึง50กิโลเมตรทีเดียว
2. ช่องกว้างของแถบการส่งสัญญาณ แบนด์วิธของเคเบิลใยแก้วมีสูงกว่า ทำให้สามารถส่งสัญญาณข้อมูลได้มากกว่า
3. ขนาดของเคเบิลใยแก้วเล็กกว่าเคเบิลธรรมดา ถ้านำไปใช้ในงานบางอย่าง เช่น การวางเคเบิลใต้น้ำ ซึ่งเดิม ต้องใช้ เคเบิลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้วครึ่ง ที่ประกอบด้วยสาย ส่งสัญญาณจำนวน 320 เส้น แต่หากใช้เคเบิลใยแก้วแล้ว ก็จะมีเส้น ผ่านศูนย์กลางเพียงประมาณ 125 ไมครอน และใช้สายสัญญาณเพียง 5เส้นเท่านั้น และที่สำคัญ คือ มีน้ำหนักเบา สามารถติดตั้งบำรุงรักษา และซ่อมแซม ได้ง่ายอีกด้วย
4. เคเบิลใยแก้วช่วยตัดปัญหา เรื่องสัญญาณรบกวน อันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ได้โดยเด็ดขาด เพราะมีการ ใช้ สัญญาณแสงเป็นตัวนำข้อมูล ไม่มีสัญญาณไฟฟ้า เข้ามาเกี่ยวข้องทำให้การรับ-ส่งข้อมูล มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า

2.1.8 เคเบิลใยแก้วในไทย

สำหรับประเทศไทย เรื่องเคเบิลใยแก้วนำแสงที่ใช้ ในการเป็นทางด่วนข้อมูลนั้น ปัจจุบัน มีการเริ่มต้นบ้างแล้วการสื่อสารแห่งประเทศไทย (กสท.) และองค์การ โทรศัพท์ แห่งประเทศไทย (ทศท.) ในฐานะหน่วยงาน ของ รัฐที่ดูแลรับผิดชอบทางด้านการสื่อสารของชาติ ก็ มีแผนวางระบบเครือข่าย การสื่อสารความเร็วสูง เพื่อรองรับทางด่วนข้อมูล ใน 3 แผนหลัก คือ

1. เครือข่ายเคเบิลใยแก้วในส่วนกรุงเทพฯ และปริมณฑล

2. เครือข่ายเคเบิลใยแก้วในส่วนภูมิภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารตัวอย่าง สำหรับใช้ในการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งหากมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เครือข่ายเคเบิลใยแก้วระหว่างประเทศ

นอกจากนั้น การสื่อสารแห่งประเทศไทยยังได้เริ่ม นำเคเบิลใต้น้ำแบบแกนร่วม (Coaxial) ระบบอนาล็อกมาใช้ ในประเทศไทยมานานแล้ว แต่เนื่องจากเป็นเทคโนโลยี ที่มีขีด จำกัดในด้านของการเพิ่มจำนวนวงจร คือ มีช่องสัญญาณเพียง 480 ช่องเท่านั้น ทั้งยังมีความยุ่งยากในด้าน การบำรุง รักษา และความไม่แน่นอน เมื่อขนาดเครือข่ายใหญ่ขึ้น ช่อง สัญญาณจึงเต็ม กสท.จึงต้องแก้ปัญหาด้วยการแบ่งงานส่วน หนึ่ง ไปใช้ดาวเทียม

ในส่วนของโครงการ โทรศัพท์ 2 ล้านเลขหมายที่ บริษัทเทเลคอมเอเชีย คอปอเรชัน จำกัด ได้รับสัมปทาน จากองค์การ โทรศัพท์แห่งประเทศไทย ไปดำเนินการที่กำลังดำเนินการ วางเครือข่ายเคเบิลใยแก้วทั่ว กทม. ซึ่ง โครงการดังกล่าว ก่อให้ เกิดบริการเสริมต่าง ๆ อีกมากมาย ได้แก่ เคเบิลทีวี วีดีโอเท็กซ์ บริการชอปปิ้ง ผ่านทางโทรศัพท์ในระบบ Interactive TV

ในส่วนภูมิภาค องค์การ โทรศัพท์แห่งประเทศไทยได้ ร่วมกับการรถไฟแห่งประเทศไทย ได้จัดทำโครงการเคเบิลใยแก้วตามทางรถไฟทั่วประเทศ โดยมี บริษัท คอมลิ่ง จำกัด เป็นผู้ได้รับสัมปทานติดตั้ง ตลอดถึงการบำรุงรักษาระบบเครือข่ายนี้ มีจุดเชื่อมต่อ อยู่ที่สถานีรถไฟสำคัญ 152 สถานี เชื่อมไปยังชุมสายโทรศัพท์ ในเขตนครหลวงและต่างจังหวัด ทุกภาครวม 33 จังหวัด รวมระยะทางวางสายทั้งสิ้น 3,000 กิโลเมตร โดยมีสถานี รับ-ส่ง ข้อมูล 37 จุด และมีอุปกรณ์ทวนสัญญาณ 11 จุด นอกจากนี้ ยังมีโครงการติดตั้ง โทรศัพท์ส่วนภูมิภาค 1 ล้านเลขหมาย ที่ บริษัท TT&T ได้รับสัมปทานก็ติดตั้ง เครือข่ายชุมสาย ด้วย ระบบเคเบิลใยแก้วเช่นเดียวกัน

2.1.9 ขนาดของใยแก้วนำแสง

จากความก้าวหน้าทางด้าน เทคโนโลยีประกอบกับ ความต้องการที่มีเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ไม่ว่าจะในรูปแบบของเสียง ตัวเลขหรือแม้แต่การจัดประชุม จากระยะไกลก็มี ปริมาณมาก ขึ้นตลอดเวลา ทำให้ประมาณกันว่า ปริมาณการ สื่อสารทั่วโลก ที่ใช้อัตราต่อนาทีเป็นเกณฑ์ในการ วัดนั้น จะสูงขึ้นราวปีละ 15-20 เปอร์เซ็นต์ โดยในแต่ ละปีนั้น เฉพาะการสื่อสารข้อมูล ที่เป็นตัวเลขจะมี ปริมาณสูงขึ้นประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการสื่อสารทางเสียง มีอัตราเพิ่มขึ้นประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การสื่อสาร เพื่อส่งสัญญาณภาพจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเป็นเท่าตัว ทุกปี หากพิจารณาจาก ปริมาณการสื่อสารระดับนี้ เคเบิล ใยแก้วนำแสง จึงเป็นสื่อที่เหมาะสมที่สุดในการ ตอบสนอง ต่อความต้องการดังกล่าว ส่งผลให้

เอกสารค่า อุปกรณ์ สำหรับเคเบิลใยแก้ว ลดค่าลงเห็น ได้ชัดจากการ ที่ อุปกรณ์ที่ใช้เลเซอร์สายเคเบิลใยแก้ว ไม่ว่การณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมถึงอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ ความเร็วสูงอื่น ๆ มีแนวโน้มที่จะมีราคา ลดลงเกือบ 50-80 เปอร์เซ็นต์ ในอีก 10 ปีข้างหน้า และ พร้อม ๆ กับที่ราคาเริ่มลดลง ความต้องการผลิตภัณฑ์ ที่มีมาตรฐาน อุตสาหกรรมก็จะเริ่มเพิ่มขึ้นด้วย

2.1.10 ระบบตรวจจับด้วยเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber optic sensor)

อุตสาหกรรมทางการสื่อสารด้วยระบบใยแก้วนำแสง และ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง ได้มีการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลามากกว่า 20 ปีที่ผ่านมา และได้มีการปฏิวัติระบบสื่อสารครั้งยิ่งใหญ่ที่ได้มาใช้ในการรับส่งข้อมูลผ่านทางเส้นใยแก้วนำแสง ที่มีประสิทธิภาพและจำนวนช่องของสัญญาณที่มากกว่า

ในอีกด้านหนึ่งได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีของเส้นใยแก้วนำแสงให้มีความสามารถในการตรวจจับสิ่งต่างๆ ควบคู่ไปกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (Optoelectronic) และการตรวจจับในระบบสื่อสาร (Fiber optic communication) เทคโนโลยีการวัดด้วยใยแก้วนำแสง (Fiber optic sensor technology) ได้มีรูปแบบของการผลิตที่เป็นจำนวนมากจึงทำให้มีราคาถูกและสามารถตรวจจับได้หลากหลาย เช่น การวัดการขจัด, ความเร่ง, สนามแม่เหล็ก, เสียง, สนามไฟฟ้า, อุณหภูมิ, ความดัน, การสั่น, สะเทือน, ตำแหน่งเชิงมุมและเชิงเส้น, ความเค้น, ความชื้น, ความหนืด, การวัดสมบัติทางเคมีและอื่นๆ โดยการวัดด้วยวิธีนี้ประสบความสำเร็จอย่างมากในเชิงการค้าเป็นเพราะว่า อุปกรณ์มีน้ำหนักเบา และมีขนาดที่เล็กอีกทั้งยังใช้พลังงานน้อยกว่าการวัดวิธีการอื่น

THE FIBER OPTIC SENSOR FOR YOUR APPLICATION - TEMPERATURE - PRESSURE - STRAIN - DISPLACEMENT - FORCE - LOAD.

Opens provides one of the most innovative yet flexible fiber optic sensing solutions for industries. We acknowledged that each application has its own uniqueness and thus we strive to fully understand that which is best for your particular requirements.

Continuous innovation is the driving force of our business, but it is your feedback which is key to our product improvement.



Medical Energy Utilities Aerospace Defense Microwave Assisted Chemistry Other Applications Civil Engineering Food

รูปที่ 2.1 แสดงอุตสาหกรรมทางการสื่อสารด้วยระบบใยแก้วนำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ในปัจจุบันเทคโนโลยีแผงวงจรรวม (Integrated circuit) ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมาก โดยรวมเอาวงจรทางแสงที่ยุ่งยากและซับซ้อนรวมอยู่ในไอซีเพียงตัวเดียว จึงเป็นเหตุให้นักออกแบบอุปกรณ์ทางด้านตรวจจับด้วยไฟเบอร์ออปติก สร้างสรรค์ผลิตภัณฑ์ออกมาอย่างมากมาย และ มีความโดดเด่นอย่างมากในบรรดาการตรวจจับประเภทอื่นๆ

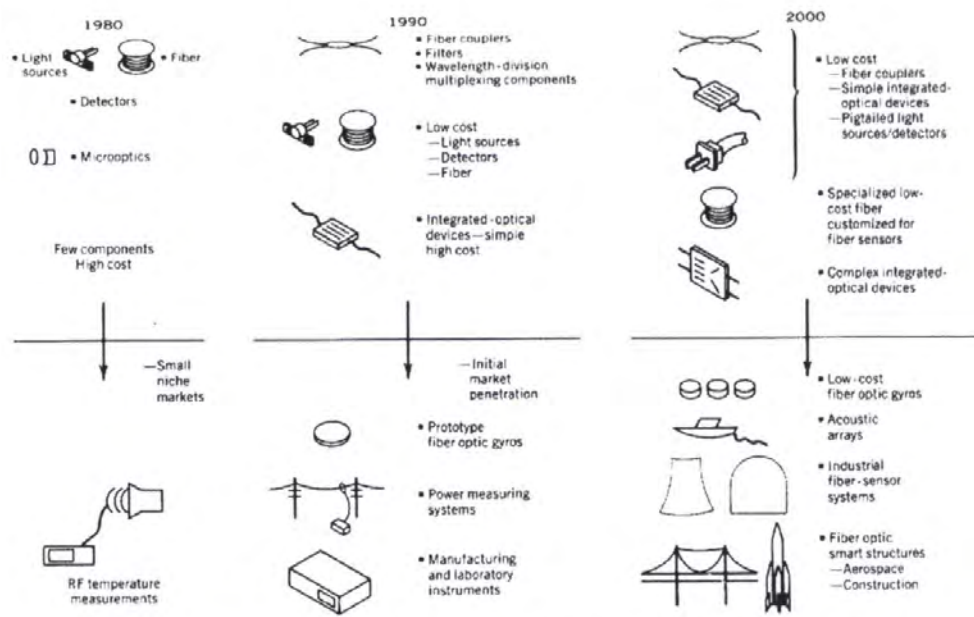
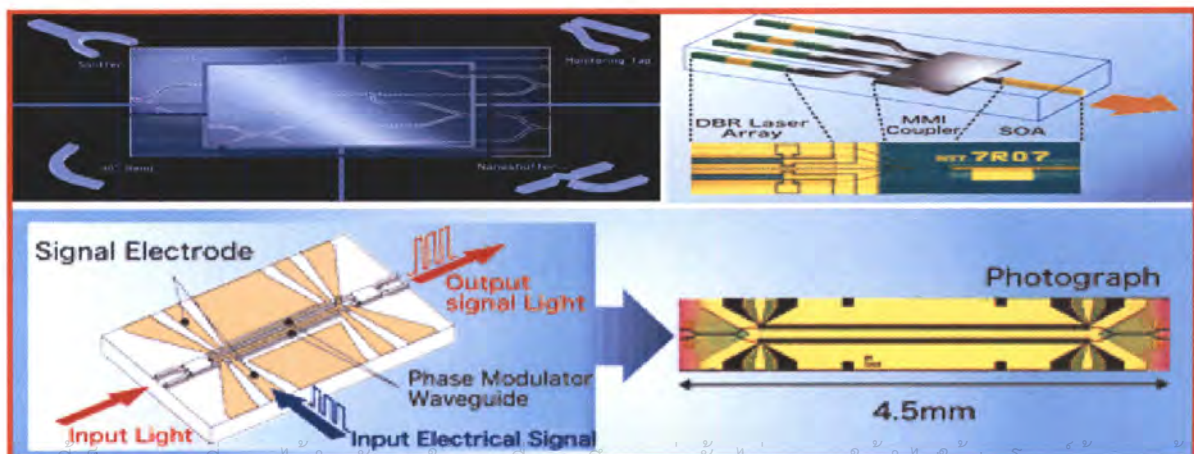


Figure 1.5. As the number of components increases and their cost drops, the options of the fiber optic sensor designer multiply.

รูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพนวัตกรรมของอุปกรณ์ตรวจจับด้วยใยแก้วนำแสง



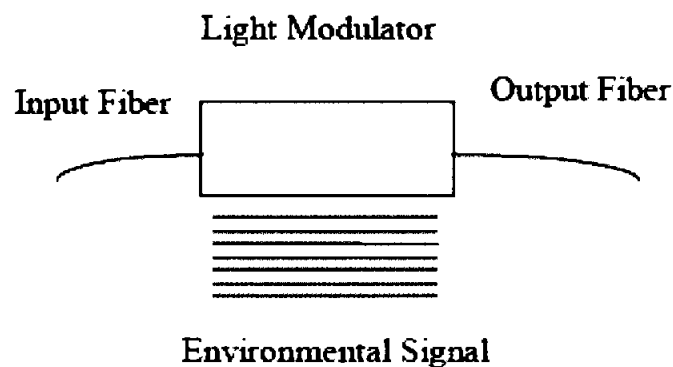
เอกสารถนเป็นเอกสารถนวงรีที่ได้จากการเชิงเส้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้ผู้ใช้กระโดดเนกการศึ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกรูปที่ 2.3 แสดงนวัตกรรมของอุปกรณ์แผ่นวงจรรวมในปัจจุบันที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของการตรวจจับด้วยเส้นใยนำแสง (Advantage of Fiber optic sensor)

- Non-electric (immune to electromagnetic and radio-frequency interference)
- withstand high temperature and harsh environments (corrosion)
- High shock survivability (explosion or extreme vibration)
- high accuracy and sensitivity
- light weight and small size
- high capacity and signal purity
- multiplexing capacity
- Can be easily interfaced with data communication systems
- Passive (all dielectric)
- Component costs driven by large commercial (Telecom & Optoelectronics market)
- Can be used in harsh environments where there is a risk of explosion and fragile environments like the human body
- Allows multiplexing of diverse information on a single fiber

2.1.10.1 หลักการตรวจจับด้วยใยแก้วนำแสงเบื้องต้น

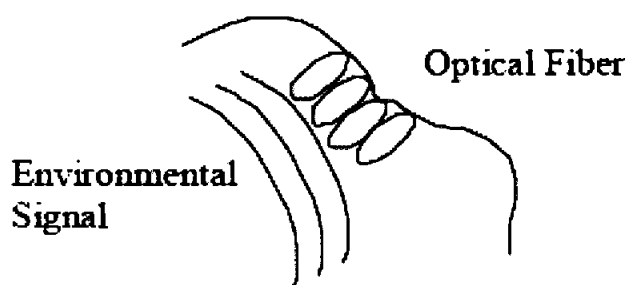
การตรวจวัดด้วยระบบใยแก้วนำแสง มักจะจำแนกระบบการวัดเป็นสองประเภท คือ Hybrid fiber optic sensors (Extrinsic) และ All fiber sensors (Intrinsic) (Udd, 1991a)



รูปที่ 2.4 แสดงหลักการวัดชนิด Intrinsic

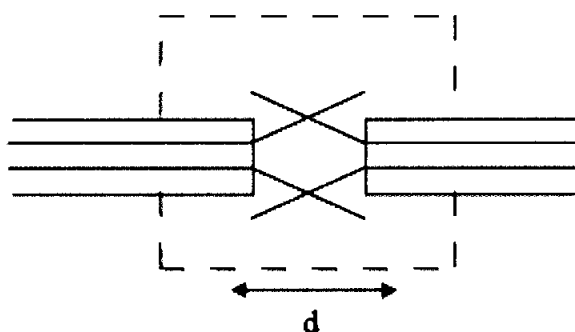
ในกรณีนี้จะมีบริเวณตรวจจับ (Black box) ที่มีแรงกระทำจากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่มีผลต่อ
 เอกสารทางเดินของแสงในเส้นใยแก้วนำแสงอาจจะมีผลในด้านของ ความเข้มแสง, เฟส, ความถี่, การโพลาไรซ์
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซชัน (Polarization), การจัดเรียงสเปกตรัม ฯลฯ สัญญาณของแสงที่ถูกกระทำจากแรงกดหรือการตรวจจับต่างๆ จะให้สัญญาณออกมาในรูปแบบของสัญญาณทางแสงเองหรือนำไปประมวลผลต่อเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.5 แสดงผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อทางเดินแสงในเส้นใยแก้ว

การตรวจจับชนิดที่ใช้งานบ่อยที่สุดเป็นแบบผสม (Hybrid type) เป็นพื้นฐานของการมอดูเลตหรือปรับเปลี่ยนความเข้มของสัญญาณ (Intensity modulation) เมื่อแสงออกจากเส้นใยแก้วเส้นแรก โดยจะทำมุมที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับดัชนีหักเหของแกนกลาง (Core) กับผนัง (Cladding) ของเส้นใยแก้ว แสงที่สามารถส่งผ่านมายังเส้นใยแก้วอันถัดมาจะขึ้นอยู่กับมุม (Acceptance angle) และระยะทางระหว่างเส้นใยแก้วทั้งสอง d เมื่อระยะทาง d เป็นระยะทางที่มอดูเลต อยู่ในเทอมของ การมอดูเลต ความเข้มแสงที่วัดได้

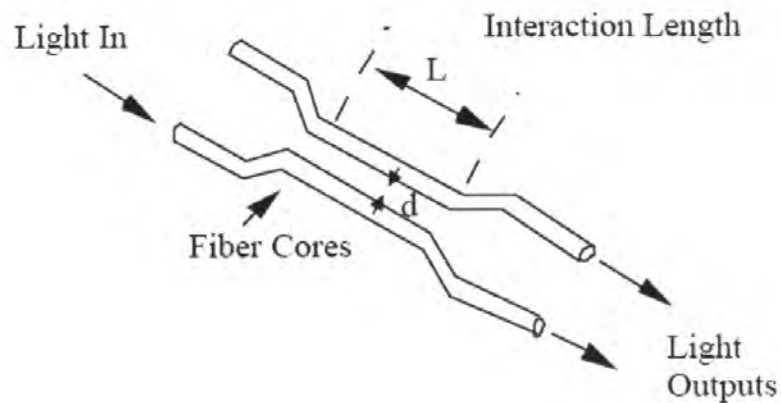


รูปที่ 2.6 แสดงการทำงานของ การตรวจวัดความเข้มแสง ที่ใช้ในการวัดการสั่นสะเทือน

การลดน้อยลงของแสงที่มีการแบ่ง (Coupling) ไปยังท่อใยแก้วนำแสงที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกัน ในระดับ 10 ไมโครเมตรใน single mode fiber ที่เกิดขึ้นในบริเวณกักกันทางเดินลำแสง ในช่วง fiber core

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

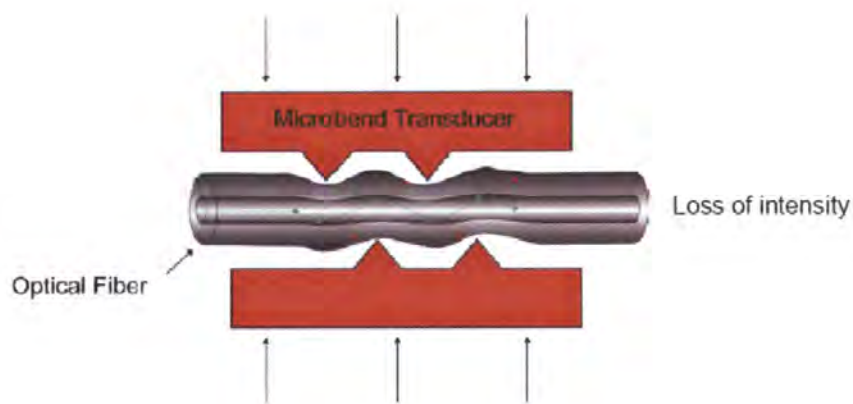
ซึ่งสามารถนำไปตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของระยะทางที่มีผลต่ออุณหภูมิ, ความดัน และ แรงกดทับ (Strain) ที่มีผลต่อบริเวณ Interaction zone



รูปที่ 2.7 แสดงการลดลงของสัญญาณที่เกิดการถ่ายเทบริเวณรอยต่อ (Cross coupling)

เมื่อใยแก้วนำแสงมีการผิดรูปหรือ โค้งงอเนื่องจากสิ่งแวดล้อม จะทำให้เกิดการสูญเสียของสัญญาณเนื่องจากค่าของมุมวิกฤตภายในเส้นใยเปลี่ยน จนทำให้เกิดการสูญเสียเกิดการรั่วของสัญญาณมายัง ชั้นเปลือกหุ้ม (Cladding) เป็นผลให้ความเข้มของสัญญาณลดลงเนื่องจาก

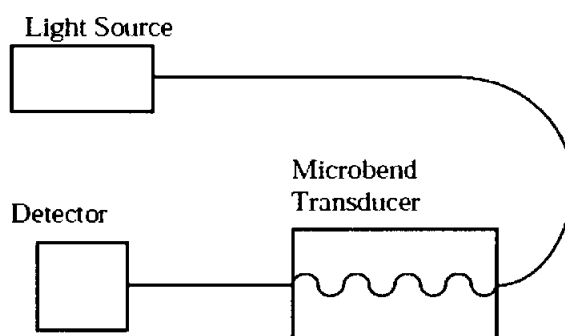
ความโค้งงอระดับเล็ก (Micro bending)



รูปที่ 2.8 แสดงการโค้งงอระดับเล็ก

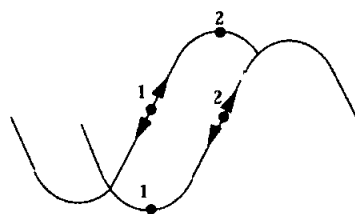
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความโค้งงอขนาดเล็กนี้สามารถนำไปสร้างเป็นระบบตรวจวัด การสั่นสะเทือน, ความดัน หรือ สิ่งอื่นๆ ได้ดังรูป โดยในส่วนของตัวแปลงความโค้งงอขนาดเล็ก (Microbend transducer) สามารถใช้เป็นเส้นใยแก้วชนิดพิเศษที่มีความสามารถในการวัดค่าสูญเสียจากการ โค้งงอได้ (Microbending loss)



รูปที่ 2.9 แสดงแผนภาพระบบการวัดสัญญาณเนื่องจากความโค้งงอขนาดเล็ก

การวัดความต่างกันของสัญญาณที่ขาออก(Output) ที่เปลี่ยนแปลงไปจากการกระทำของ สิ่งแวดล้อมต่างๆ อาจเปรียบเทียบจากแอมพลิจูดหรือ การเหลื่อมกันของสัญญาณ (ความต่างเฟส) สามารถนำไปวัดในวิธีการวัดการแทรกสอดที่ใช้ความต่างเฟสของสัญญาณอ้างอิง กับ สัญญาณที่ผ่านการตรวจจับ



รูปที่ 2.10 แสดงความแตกต่างของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 แสงเลเซอร์

เลเซอร์ คือ อาวุธที่จะทำลายอนาคตของมนุษยชาติ หรือว่าเป็นผลิตภัณฑ์แห่งเทคโนโลยียุคใหม่ที่ จะสร้างสรรค์ อนาคต คนเป็นจำนวนมากเริ่มมองเห็นเลเซอร์เป็นดังเช่นพลังงานนิวเคลียร์ การ เปรียบเทียบเลเซอร์กับพลังงาน นิวเคลียร์นับว่าเป็นการเปรียบเทียบที่มีส่วนถูกอยู่มากเพราะพลังงาน นิวเคลียร์มีทั้งคุณอนันต์และโทษมหันต์ เลเซอร์ก็เช่นเดียวกันมีทั้งคุณและโทษ สำหรับพลังงาน นิวเคลียร์เป็นที่น่าเสียดายว่ามนุษย์รู้จักพลังงานนิวเคลียร์ในรูปของการทำลายมาก่อน ที่จะเห็นงานอัน เป็นประโยชน์แก่การสร้างสรรค์ ดังนั้นมนุษย์จึงกลัวพลังงานนิวเคลียร์มาจนทุกวันนี้

เลเซอร์ หรือ Laser เป็นคำย่อเกิดจากนำเอาอักษรตัวแรกของ LIGHT AMPLIFICATION BY STIMULATED EMISSION OF RADIATION มาเรียงต่อกัน ความหมายของเลเซอร์ตามหลักวิชาการ คือ การขยายแสงโดยการปล่อยรังสีที่ถูกกระตุ้น แสงเลเซอร์เป็นแสงที่มีความถี่หรือความยาวคลื่นเดียว ซึ่งหมายความว่า มีสีเดียว และในการเคลื่อนที่ รังสีของแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจำนวนมาก ซึ่ง ประกอบเป็นลำแสงเลเซอร์นั้นจะเคลื่อนไปด้วยกันอย่างพร้อมเพรียงกัน โดยตลอดตามภาษาวิชาการเรา จะ กล่าวว่า แสงเลเซอร์เป็นแสงที่โมโนโครมาติก (MONOCHROMATIC) คือ มีสีเดียวและเป็นแสงที่โคฮีเรนต์ ทั้ง โดยตำแหน่งและเวลา (COHERENT BOTH IN SPACE AND TIME) คือ มีความพร้อมกัน โดยตลอด



รูปที่ 2.11 แสงเลเซอร์

เนื่องจากตามหลักวิทยาศาสตร์ยุคใหม่แสงมีสว่างมีคุณสมบัติเป็นไปทั้งคลื่นและอนุภาคความเป็นคลื่นของแสง เป็นที่คุ้นเคยรู้จักกันดีมาแล้วสำหรับความเป็นอนุภาคของแสง ก็หมายความว่าแสงก็มีตัวตน มีคุณสมบัติดังเช่น อนุภาคโดยทั่ว ๆ ไป กล่าวคืออนุภาคของแสงก็มีมวลและมีโมเมนตัม ยกเว้นเฉพาะเวลาที่แสงไม่เคลื่อนที่ที่จะไม่มีมวล โอนส์ไน์เป็นผู้ตั้งชื่อเรียกว่าโฟตอน ซึ่งก็แปลตรงตัวว่า อนุภาคของแสงนั่นเอง ดังนั้นในการอธิบายความพร้อมเพรียงของแสงเลเซอร์แทนที่จะอธิบายเป็นความพร้อมเพรียงของคลื่นแม่เหล็ก ไฟฟ้าของแสงเราสามารถจะอธิบายได้อีกอย่างหนึ่งว่าแสงเลเซอร์เป็นแสงซึ่งอนุภาคของแสงคือโฟตอนอันประกอบ กันเป็น ลำแสงเลเซอร์นั้นเคลื่อนที่ไปด้วยกันอย่างพร้อมเพรียงกัน โดยตลอด

2.2.1 ความแตกต่างของแสงเลเซอร์กับแสงธรรมดา

1) แสงเลเซอร์เป็นแสงที่มีความถี่เดียว และมีความพร้อมเพรียงกันในการเคลื่อนที่ ส่วนแสงธรรมดา

โดยทั่ว ๆ ไปดังเช่นแสงจากหลอดไฟฟ้าในบ้านเป็นแสงที่มีความถี่หลายความถี่ปะปนกันและไม่ โคฮี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเราใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เรนต์คือ ไม่ มีความพร้อมเพรียงกัน แสงธรรมดางจึงสูญเสียพลังงาน ไปเร็วกว่าแสงเลเซอร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) แสงเลเซอร์เป็นแสงที่มีการกระจายลำแสงน้อยคือ มีลำแสงเล็ก ไปได้ไกลมากสามารถเดินทางจากโลก ไปถึงดวงจันทร์ แล้วก็สะท้อนกลับมาถึงโลกอีก โดยที่ลำแสงเลเซอร์ก็ยังกระจายไม่มากนัก ส่วนแสงธรรมดา เช่น จากไฟฉายก็เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า มีการกระจายลำแสงกว้างจึงส่องไปได้ไม่ไกลนัก

3) แสงเลเซอร์มีความเข้มสูงกว่าแสงธรรมดามากสามารถเจาะทะลุแผ่นเหล็กได้

2.2.2 เลเซอร์กับอุตสาหกรรม

เลเซอร์มีประโยชน์อย่างมากมหาศาลสำหรับวงการอุตสาหกรรมงานที่แสงเลเซอร์เป็นประโยชน์มากที่สุดคือ งานเกี่ยวกับการตัด การเชื่อม การหลอม การเจาะและการตรวจสอบความแม่นยำของชิ้นส่วนผลิตผลอุตสาหกรรม

งานที่เลเซอร์กำลังมีบทบาทมากเป็นพิเศษในวงการอุตสาหกรรมคืองานที่ต้องใช้พลังงานหรือความร้อน แสงงาน ที่ต้องอาศัยความละเอียดอ่อนและงานที่ต้องการความรวดเร็ว ตัวอย่างของงานในวงการอุตสาหกรรมที่ต้องการ พลังงานมากและที่กำลังใช้เลเซอร์กันอยู่คืองานการตัด แผ่นเหล็ก หรือแผ่นโลหะหรือผลิตภัณฑ์บางชนิดเพื่อใช้เป็น ชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลเครื่องมือเครื่องใช้หรือยาน พาหนะ เช่น รถยนต์ และเรือขนาดใหญ่

ตัวอย่างของงาน ประเภทละเอียดอ่อนและต้องการความรวดเร็ว คือ งานประเภทที่เกี่ยวข้องกับสิ่งเล็ก ๆ เช่นงานเชื่อมวงจรไฟฟ้า เล็ก ๆ ระดับไมโครอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากแสงเลเซอร์จะถูกทำให้เล็กแคไหนก็ได้ ดังนั้นแสงเลเซอร์จึงกำลังมีบทบาทสำคัญในเรื่องของ ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ อย่างมาก เช่นการเชื่อมต่อชิ้นส่วนของทรานซิสเตอร์ในการทำแผ่น ไอซีและแผ่นไมโคร-โปรเซสเซอร์สำหรับคอมพิวเตอร์ทรานซิสเตอร์ในปัจจุบันมีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีขนาดเหลือเพียงแค่หัวเข็มหมุดหรือเล็กกว่า เสียอีก ดังนั้นเส้นลวดที่จะต่อเข้าเป็นขาของทรานซิสเตอร์จึงต้องเล็กมากเช่นมีขนาดศูนย์กลางเพียงหนึ่ง มิลลิเมตรเท่านั้น และโดยอาศัยแสงเลเซอร์คนทำทรานซิสเตอร์ก็สามารถจะเชื่อมต่อลวดเล็ก ๆ นั้นเข้ากับตัว ทรานซิสเตอร์ ได้อย่างง่ายดายและอย่างรวดเร็ว คือใช้เวลาเพียงหนึ่งส่วนล้านของวินาทีเท่านั้นที่เล็กยิ่งกว่าทรานซิสเตอร์โดยทั่วๆ ไปอีกคือแผ่น ไอซีแสงเลเซอร์ก็กำลังมีบทบาทสำคัญในการผลิตแผ่น ไอซีบรรจุวงจรไฟฟ้าจำนวนมากผิกับแผ่น ไอซีที่ผลิตด้วยอุปกรณ์ทั่ว ๆ

ไป สำหรับแผ่นไมโครโปรเซสเซอร์ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กคือ ไมโคร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอมพิวเตอร์ นั้น ก็คือแผ่นซิลิกอนเช่นเดียวกับไอซีต่างๆไปแต่ไมโครโปรเซสเซอร์มีวงจรไฟฟ้าที่สลับซับซ้อนยิ่งกว่า ไอซีเพราะ ไมโครโปรเซสเซอร์หนึ่ง ๆ จะมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์บรรจุอยู่ด้วย และแสงเลเซอร์ที่กำลังมีบทบาทสำคัญช่วยในการผลิตและการพัฒนา ไมโครโปรเซสเซอร์ใหม่ ๆ ขึ้นมาอยู่ตลอดเวลา

2.2.3 เลเซอร์กับการสื่อสาร

แสงเลเซอร์เป็นแสงสว่างซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความถี่มากกว่าคลื่นวิทยุอย่างมากและมีความสามารถในการส่งข่าวสารข้อมูลได้มากกว่าคลื่นวิทยุ คลื่นวิทยุสามารถจะใช้ในการส่งข่าวสารเป็นจำนวนร้อย ๆ หรือจำนวนพันช่วงพร้อม ๆ กัน แสงเลเซอร์สามารถใช้ในการส่งข่าวสารได้เป็นจำนวนหลายแสนช่วงพร้อมกัน ขณะนี้นักวิทยาศาสตร์กำลังทดลองส่งรายการโทรทัศน์แสงเลเซอร์อยู่และกำลังประสบความสำเร็จกับความก้าวหน้า ด้วยดี

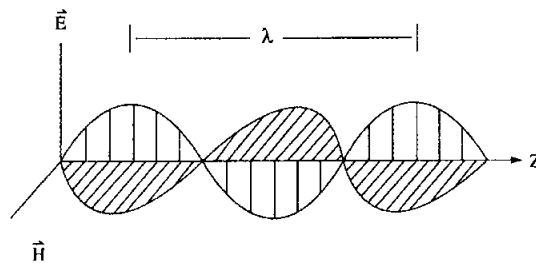
อย่างไรก็ดี การใช้แสงเลเซอร์ในการสื่อสารระดับผิวโลกและระหว่างในอวกาศกับผิวโลกก็มีปัญหาเพราะว่า แสงเลเซอร์ถูกบรรยากาศและเมฆดูดกลืนและรบกวนได้ง่าย ๆ วิธีแก้ไขในเรื่องนี้ คือการใช้แสงเลเซอร์ ส่งไปตาม ท่อหรือใยนำแสง แต่ในอวกาศแสงเลเซอร์มีศักยภาพในการสื่อสารสูงอย่างยิ่งเพราะไม่มีบรรยากาศรบกวนและเป็นที่ คาดกันว่าในอนาคตข้างหน้า แสงเลเซอร์จะเป็นสิ่งที่มีบทบาทสำคัญที่สุดในเรื่องสื่อสารเช่นการสื่อสารระหว่าง ดาวเทียมสื่อสาร การสื่อสารระหว่างยานอวกาศการสื่อสารระหว่างสถานีอวกาศรอบโลกกับมนุษย์ที่ไปตั้งถิ่นฐาน บนดวงจันทร์ สำหรับเรื่องของโทรศัพท์ เนื่องจากแสงเลเซอร์มีความถี่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับคลื่นวิทยุและมีความ พร้อมเพรียงตลอดการเคลื่อนที่ แสงเลเซอร์จึงใช้แทนสายโทรศัพท์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับสายโทรศัพท์ธรรมดาถ้าแสงเลเซอร์หนึ่งลำแสงสามารถจะทำหน้าที่เป็นสื่อให้คน จำนวน 600 คู่สนทนากันได้พร้อม ๆ กัน

ถ้าเทคนิคของการบรรจุข่าวสารข้อมูลลงในลำแสงเลเซอร์ได้รับการพัฒนาถึงขั้นสุดขีดแล้ว แสงเลเซอร์ เพียงหนึ่งลำแสงก็เพียงพอที่จะเป็นสื่อการสนทนาระหว่างคนทั้ง โลกพร้อม ๆ กันทีเดียวแต่ในแง่ของความเป็นไปได้จริง ๆ ซึ่งจะเกิดขึ้นในอนาคตเร็วนี้ คือ ใยลำแสงเลเซอร์จำนวนหนึ่งที่ใส่เข้าไปในสายเคเบิลมีเส้น ศูนย์กลางเพียง 1/4 นิ้ว จำทำหน้าที่แทนสายโทรศัพท์ไว้หลายพันสาย เป็นที่คาดกันว่าในอนาคตที่ไม่ไกลนัก เมืองใหญ่ๆ ของโลกส่วนใหญ่จะใช้ระบบสายโทรศัพท์แสงเลเซอร์ ที่ฝั่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ใต้ดินแทนสายโทรศัพท์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

2.3 โพลาริเซชัน

ในที่นี้จะพิจารณาว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามแบบของแมกซ์เวลล์ โดยที่รูปแบบการสั่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีความถี่เท่ากันแต่จะพหุคูณตั้งฉากกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 แสดงการสั่นของแสงธรรมชาติ ซึ่งมีสนามไฟฟ้า \vec{E} ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก \vec{H}

พิจารณาแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 2.13 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\vec{E}(z, t) = E_{ox} \sin[2\pi vt - (2\pi z / \lambda) + \phi_0] \quad (2.2)$$

เมื่อแสงเคลื่อนที่ในทิศทางตามแกน z และเป็นโพลาริเซชันเชิงเส้นมีทิศทางของสนามไฟฟ้าตามแกน x เมื่อ v เป็นความถี่ของคลื่นแสง λ เป็นความยาวคลื่น E_{ox} เป็นแอมพลิจูดสูงสุด และ ϕ_0 เป็นค่าที่ของเฟส โดยมีความถี่เชิงมุมที่ได้คือ $\omega = 2\pi v$ และมีเลขคลื่น (wave number) คือ $k = 2\pi / \lambda$ แล้วสมการ (2.2) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\vec{E}(z, t) = E_{ox} \sin[\omega t - kz + \phi_0] \quad (2.3)$$

โดยที่สนามแม่เหล็กของแสงจะสั่นเหมือนกับสนามไฟฟ้าแต่เวกเตอร์สนามแม่เหล็ก \vec{H} จะพหุคูณตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าในทิศทางตามแนวแกน y ซึ่งสนามแม่เหล็กมีค่าเป็น

$$\vec{H}(z, t) = H_{oy} \sin[\omega t - kz + \phi_0] \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากหลักการพื้นฐานของแสงธรรมชาตินี้ จะพิจารณาส่วนที่เกี่ยวข้องกับการโพลาไรเซชันของแสง ซึ่งในการจำแนกชนิดของโพลาไรเซชันจะพิจารณาความสัมพันธ์ทางเฟส(ϕ_0) ของทิศทาง x และ y และเปรียบเทียบขนาดระหว่าง E_x และ E_y ซึ่งสามารถจำแนกชนิดของโพลาไรเซชันได้ดังนี้คือ แสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้น(linear polarized light)แสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลม(circularly polarized light)และแสงโพลาไรซ์ชนิดวงรี(elliptically polarized light)

2.3.1 แสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้น (Linear polarized light)

ในที่นี้จะพิจารณาว่าแสงเป็นส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าเท่านั้น เนื่องจากโพลาไรเซชันเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเฉพาะคลื่นความขวางเท่านั้น ดังนั้นจากการที่แสงเคลื่อนที่ตามแกน z จะสามารถแสดงแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีทิศทางตามแกน x ได้โดย

$$\bar{E}_x = E_{ox} \sin[\omega t - kz + \phi_0] \hat{i} \quad (2.5)$$

เมื่อ \hat{j} เป็นแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า และ \hat{i} เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยตามแนวแกน x และในทำนองเดียวกันแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นในทิศทางตามแกน y สามารถเขียนได้โดย

$$\bar{E}_y = E_{oy} \sin[\omega t - kz + \phi_0] \hat{j} \quad (2.6)$$

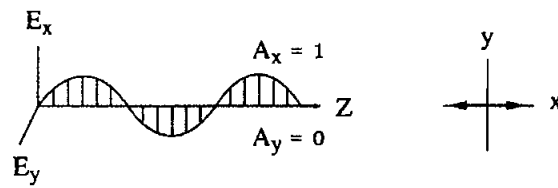
เมื่อ \hat{j} เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยตามแกน y สนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นสามารถกระทำในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่และสามารถแสดงในรูปของผลรวมของเวกเตอร์ \bar{E}_x และ \bar{E}_y ได้เป็น

$$\begin{aligned} \bar{E} &= \bar{E}_x + \bar{E}_y \\ &= \{E_{ox} \hat{i} + E_{oy} \hat{j}\} \sin[\omega t - kz + \phi_0] \end{aligned} \quad (2.7)$$

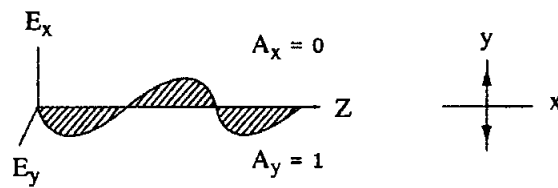
แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นซึ่งมีโพลาไรเซชันทำมุมใดๆกับทิศทางในระนาบ xy สามารถแสดงได้โดยส่วนประกอบทั้งสองตามแกน x และ y ตามลำดับดังรูปที่ 2.14 ซึ่งความสัมพันธ์ของขนาดส่วนประกอบทั้งสองจะเป็นตัวกำหนดการทำมุมกับแกนโพลาไรเซชัน

(ลักษณะคลื่น)

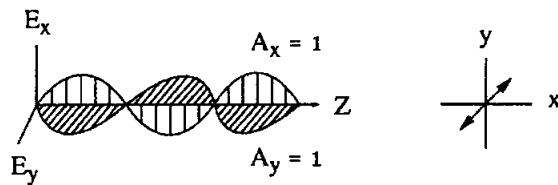
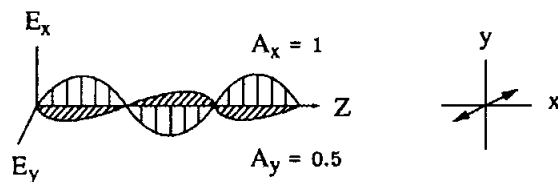
(ลักษณะโพลาไรเซชัน)



(ก) ตามแกน x



(ข) ตามแกน y

(ค) ทำมุม 45° กับแกน x

รูปที่ 2.13 แสดงแสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นซึ่งมีมุมที่เปลี่ยนไป

อย่างไรก็ตามในส่วนประกอบทั้งสองจะต้องมีค่าความถี่เชิงมุม ω เหมือนกันและมีค่าเฟส ϕ_0 เหมือนกันหรือต่างกันเท่ากับ π ตอนต่อไปจะพิจารณาผลของความแตกต่างกันของเฟสจากส่วนประกอบทั้งสองในกรณีอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 โจนส์เวกเตอร์

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

$$\bar{E}_x = A_x \sin[kz - \omega t + \Phi_0] \hat{i} \quad (2.8)$$

$$\bar{E}_y = A_y \sin[kz - \omega t + \Phi_0] \hat{j} \quad (2.9)$$

(กรณีนี้ใช้ A_x และ A_y แทน E_{ox} และ E_{oy} จากที่ผ่านมา)เมื่อแสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นทำมุมในทิศทางเฉพาะนั้น การรวมกันของส่วนประกอบทั้งสอง(สมมติให้เฟสเหมือนกัน) คือ

$$\bar{E} = \bar{E}_x + \bar{E}_y = A_x \sin[kz - \omega t + \phi_x] \hat{i} + A_y \sin[kz - \omega t + \phi_y] \hat{j} \quad (2.10)$$

กรณีทั่วไปของแสงโพลาไรซ์ชนิดวงรีนั้นเฟสขององค์ประกอบ x และ y จะไม่เหมือนกัน ดังนั้นที่เฟสให้เฉพาะ คือ ϕ_x และ ϕ_y ตามลำดับจะได้

$$\bar{E} = A_x \sin[kz - \omega t + \Phi_x] \hat{i} + A_y \sin[kz - \omega t + \Phi_y] \hat{j} \quad (2.11)$$

เวกเตอร์สนามไฟฟ้าในเวลาใดๆที่ได้จากจุดบนแกน x เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์สมการ (2.11)จะเขียนในรูปจำนวนเชิงซ้อนได้ดังนี้

$$\bar{E} = A_x e^{i(kz - \omega t + \Phi_x)} \hat{i} + A_y e^{i(kz - \omega t + \Phi_y)} \hat{j} \quad (2.12)$$

โดยสมการ(2.12) สามารถเขียนให้เท่ากันในเครื่องหมายคอดลัมน์เวกเตอร์ได้

$$\bar{E} = \begin{vmatrix} \bar{E}_x \\ \bar{E}_y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_x e^{i(kz - \omega t + \Phi_x)} \\ A_y e^{i(kz - \omega t + \Phi_y)} \end{vmatrix} \quad (2.13)$$

แยกตัวประกอบออกมาจะได้

$$\bar{E} = e^{i(kz - \omega t)} \begin{vmatrix} A_x e^{i\Phi_x} \\ A_y e^{i\Phi_y} \end{vmatrix} \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

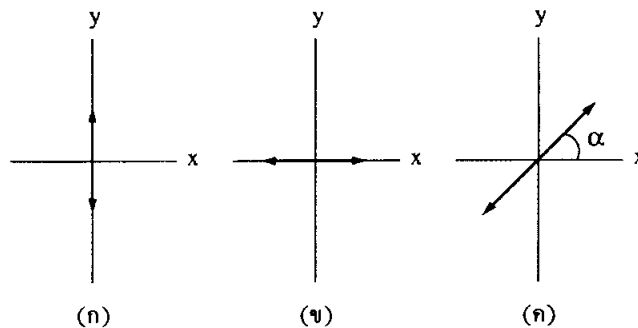
เมื่อเราตัดทอนของเวลาออกไปเวกเตอร์ในสมการ(2.14) คือโจนส์เวกเตอร์ (หรือ Maxwell Column) ในการคำนวณหาค่าความเข้มของแสงที่ใช้ในการทดลองนั้น โจนส์เวกเตอร์จะมีประโยชน์มากสำหรับการหาความเข้มแสง กรณีนี้ความเข้มแสง I หาได้จาก

$$I = e^{-i\omega t} e^{i\omega t} \left| A_x e^{-i\Phi_x} A_y e^{-i\Phi_y} \right| \left| \begin{matrix} A_x e^{i\Phi_x} \\ A_y e^{i\Phi_y} \end{matrix} \right| \quad (2.15)$$

ซึ่งเท่ากับ

$$I = A_x^2 + A_y^2 \quad (2.16)$$

พิจารณารูปแบบของ โจนส์เวกเตอร์ ที่ใช้แทนสถานะของโพลาไรเซชันเชิงเส้น วงกลม วงรี โดยพิจารณาประกอบกับรูปที่ 2.14 รูปนี้แสงเคลื่อนที่ในทิศ +z (ทิศทางพุ่งออกจากกระดาษ) ในรูป (ก) เป็นการแสดงโพลาไรซ์เชิงเส้นในแนวตั้ง ในกรณีนี้จะไม่มีการแผ่รังสีในแนวแกน x หรือ $E_{ox}=0$ และแอมพลิจูดในแนวแกน y มีค่า A หรือ $E_{oy}=A$



รูปที่ 2.14 แสดงสนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีการวางตัวของสนามไฟฟ้าในแนวต่างๆกัน โดยทิศที่แสงเคลื่อนที่ไปทิศทาง +z

เพื่อความสะดวกกำหนดให้ $\phi_y = 0$ จะได้โจนส์เวกเตอร์สำหรับแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นในแนวตั้งเป็น

$$\bar{E} = \begin{vmatrix} 0 \\ A \end{vmatrix} = A \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (2.17)$$

เราอาจกำหนดให้ A มีค่าเป็น 1 และได้โจนส์เวกเตอร์สำหรับแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นในแนวตั้งเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{E} = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (2.18)$$

เวกเตอร์ที่ได้นี้ก็คือรูปแบบนอร์มอลไลซ์(Normalized) ของเวกเตอร์เดิมนั้นเองสำหรับเวกเตอร์ $\begin{vmatrix} a \\ b \end{vmatrix}$ ใดๆ จะเขียนในรูปแบบของนอร์มอลไลซ์ได้ก็ต่อเมื่อ $|a|^2 + |b|^2 = 1$ หรืออาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งคือ นอร์มอลไลซ์เวกเตอร์หรือเวกเตอร์ที่มีขนาดเท่ากับ 1 ในรูปที่ 2.14 นั้น $E_{oy} = 0$ และ $E_{ox} = A$ ถ้าให้ $\Phi_x = 0$ จะได้ โจนส์เวกเตอร์สำหรับแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวนอนเป็น

$$\bar{E} = \begin{vmatrix} A \\ 0 \end{vmatrix} = A \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix} \quad (2.19)$$

ในกรณีสนามไฟฟ้านั้น สนามไฟฟ้าจะมียอดประกอบทางแกน x และ y อยู่ด้วยกันซึ่งแนวการสั่นของสนามไฟฟ้านี้สามารถเปลี่ยนไปอยู่ในแนวตั้งหรือแนวนอนซึ่งได้ค่าของ $\alpha = \pi/2$ หรือ 0 ตามลำดับ โดยองค์ประกอบทั้งสองของแสงในกรณีนี้จะต้องมีเฟสที่ตรงกันหรือมีความต่างเฟสเป็น $\pm \pi$ โดยอาจกำหนดเพื่อความสะดวก ให้ ϕ_x และ ϕ_y มีค่าเป็น 0 และถ้าให้สนามไฟฟ้ามีแอมพลิจูดเป็น A จะได้องค์ประกอบในแนวแกน x และ y มีค่าดังนี้

$$E_{ox} = A \cos \alpha \quad \text{และ} \quad E_{oy} = A \sin \alpha \quad (2.20)$$

ดังนั้น โจนส์เวกเตอร์สำหรับแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่สนามไฟฟ้าสั่นในแนวที่ทำมุม α กับแนวราบคือ

$$\bar{E} = \begin{vmatrix} A \cos \alpha \\ A \sin \alpha \end{vmatrix} = A \begin{vmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{vmatrix} \quad (2.21)$$

สำหรับนอร์มอลไลซ์ของโจนส์เวกเตอร์ในกรณีนี้ค่า $A = 1$

ในการพิจารณาการสั่นของสนามไฟฟ้าว่าประกอบด้วยการสั่นในแนวแกน x และ y ดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ซึ่งมีหลักการเดียวกับการหารูปลิสซาชูส์(Lissajous Figures)นั่นเอง รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะของรูปลิสซาชูส์สำหรับในกรณี E_{ox} กับ E_{oy} ซึ่งมีค่าความต่างเฟส $\Delta\phi = \phi_y - \phi_x$ ค่าต่างๆกัน และ E_{ox} ไม่เท่ากับ E_{oy} ในบางกรณีการกวาดของสนามไฟฟ้าอาจมีลักษณะเหมือนกัน แต่ต่างกันที่ทิศทางการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กวาด เช่น กรณีของ $\Delta\phi$ เป็น $\pi/2$ กับ $3\pi/2$ เป็นต้น สำหรับกรณี $\Delta\phi = \pi/2$ กับ $3\pi/2$ นั้นถ้า E_{ox} เท่ากับ E_{oy} จะได้รูปวงกลมแทนรูปวงรี

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

รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะของรูปลิตซาชูส์สำหรับการสั่นในแนว x และ y ที่มีแอมพลิจูดไม่เท่ากันและมี ความต่างเฟส $\Delta\phi = \phi_y - \phi_x$ ค่าต่างๆ

สำหรับการหา Jones เวกเตอร์ ที่แสดงสถานะโพลาไรซ์ชนิดวงกลมนั้น สามารถสรุปได้ว่าในกรณี สนามไฟฟ้าในแนว x และ y มีการสั่นด้วยแอมพลิจูดเท่ากัน $E_{ox} = E_{oy} = A$ และมีเฟสต่างกัน $\pi/2$ โดยสนามไฟฟ้าในแกน x นำสนามไฟฟ้าในแกน y เป็น $\phi_y - \phi_x = \pi/2$ จะได้สนามไฟฟ้ารวมกวาด เป็นแนวของวงกลม การกวาดของสนามไฟฟ้าเช่นนี้จะได้แสงโพลาไรซ์วงกลมแบบตามขวา ซึ่ง สามารถนำข้อมูลนี้ไปเขียน Jones เวกเตอร์ได้เป็น

$$\bar{E} = \begin{vmatrix} E_{ox} e^{i\phi_x} \\ E_{oy} e^{i\phi_y} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Ae^0 \\ Ae^{i\pi/2} \end{vmatrix} = A \begin{vmatrix} 1 \\ i \end{vmatrix} \quad (2.22)$$

เนื่องจาก $1^2 + (i)^2 = 2$ ดังนั้นรูปแบบนอร์มอลไลซ์ของ Jones เวกเตอร์สำหรับแสงโพลาไรซ์ชนิด วงกลมแบบตามขวา คือ

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 \\ i \end{vmatrix} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกันถ้า E_y นำ E_x อยู่ $\pi/2$ และ $E_{ox} = E_{oy}$ เราจะได้สนามไฟฟ้ารวมเป็นวงกลมตามซ้าย และมีโหนดเวกเตอร์ที่หาได้จากสมการ 2.22 โดยแทน $\pi/2$ ด้วย $-\pi/2$ ซึ่งได้ผลเป็น

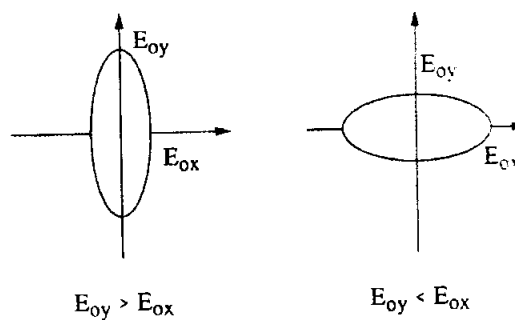
$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ -i & -i \end{vmatrix} \quad (2.24)$$

ถ้าพิจารณากรณีที่สนามไฟฟ้าในแนวแกน x และ y ยังคงมีเฟสต่างกัน $\pi/2$ เช่นเดิม แต่แอมพลิจูดต่างกันเป็น $E_{ox} = A$ และ $E_{oy} = B$ เราจะได้จากสมการ (2.22) ว่า

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

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

การกวาดนี้จะให้ผลเป็นวงรีดังแสดงในรูปที่ 2.15 สำหรับกรณีที่ $\Delta\phi = \pi/2$ หรือ $3\pi/2$ วงรีที่ได้จะมีแกนหลักอยู่ตามแกน x หรือ y จะขึ้นอยู่กับว่า E_{ox} มากกว่าหรือน้อยกว่า E_{oy} ดังรูปที่ 2.16 นอกจากนี้การกวาดจะเป็นแบบตามซ้ายหรือตามขวา ซึ่งจะขึ้นกับ E_x นำ E_y กล่าวคือ



รูปที่ 2.16 แสดงโพลาริซชันนิควงรีในกรณี $\Delta\phi = \pi/2$

ถ้า E_x นำ E_y จะได้การกวาดเป็นแบบตามขวา และ E_y นำ E_x จะได้การกวาดเป็นแบบตามซ้าย จากการพิจารณาสามารถสรุปได้ว่า โหนดเวกเตอร์ที่มีองค์ประกอบทั้งสองไม่เท่ากัน โดยตัวหนึ่งเป็นเลขจินตภาพนั้นจะแทนแสงโพลาริซชันนิควงรีและนอร์มัลไลซ์เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}} \left| \frac{A}{\pm iB} \right| \quad (2.25)$$

ในกรณีแสงโพลาไรซ์ชนิดวงรีที่มีแกนหลักทำมุมกับแนวแกน x หรือ y นั้นจะเกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าในแนวแกน x และ y มีเฟสต่างกันเป็นค่าที่ไม่ใช่ $m\pi$ และ $(m + \frac{1}{2})\pi$ โดยที่ m มีค่า 0,1,2,3,... เมื่อพิจารณากรณีที่ E_x นำ E_y ด้วยค่า $\phi_y - \phi_x = \varepsilon$ โดยกำหนดให้ $\phi_x = 0$ $\phi_y = \varepsilon$ และ $E_{ox} = AE_{oy} = b$ จะได้ Jones vector เป็น

$$\bar{E} = \begin{pmatrix} E_{ox} e^{i\phi_x} \\ E_{oy} e^{i\phi_y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \\ b e^{i\varepsilon} \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

เมื่อใช้สูตรของออยเลอร์ (Euler's Formula) จะได้

$$b e^{i\varepsilon} = b(\cos \varepsilon + i \sin \varepsilon) = B + iC \quad (2.27)$$

ดังนั้น

$$\bar{E} = \begin{pmatrix} A \\ B + iC \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

และนอร์มัลไลซ์ของ \bar{E} จะมีค่าเป็น

$$\frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \left| \frac{A}{B + iC} \right| \quad (2.29)$$

ซึ่งสมการ(2.29) จะใช้ได้กับทุกกรณีข้างต้นทั้งหมด








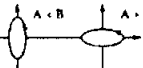
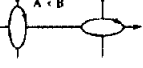


อย่างไรก็ตาม Jones vector จะใช้แทนเฉพาะแสงโพลาไรซ์เท่านั้น เราไม่มี Jones vector แทนแสงที่ไม่เป็นโพลาไรซ์ ประโยชน์ของ Jones vector อันหนึ่งที่เราเห็นได้ชัดก็คือใช้แสดงการรวมคลื่นแสงที่มีโพลาไรเซชันชนิดต่างๆ เช่น แสดงการรวมแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมแบบตามซ้ายและตามขวาที่มีแอมพลิจูดเท่ากันจะได้

$$\left| \frac{1}{+i} \right| + \left| \frac{1}{-i} \right| = \left| \frac{1+i}{1-i} \right| = 2 \left| \frac{1}{0} \right| \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงว่าผลลัพธ์จะเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีสนามไฟฟ้าในแนวราบและมีแอมพลิจูดเป็น 2 ใน ตารางที่ 2.1 เป็นการแสดง Jones vectors ของแสงโพลาไรซ์ชนิดต่างๆ

ตารางที่ 2.1 แสดง Jones vectors แบบต่างๆ

<p>Linear Polarization ($\Delta\phi = m\pi$)</p>	<p>General :</p>  <p>Vertical :</p>  <p>Horizontal :</p>  <p>+ $\pi/4$:</p>  <p>- $\pi/4$:</p> 	<p>Jone Vectors</p> $\vec{E} = \begin{vmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{vmatrix}$ $\vec{E} = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix}$ $\vec{E} = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix}$ $\vec{E} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix}$ $\vec{E} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 \\ -1 \end{vmatrix}$
<p>Circular Polarization ($\Delta\phi = \frac{\pi}{2}$)</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 ($\Delta\phi = (m + \frac{1}{2}) \pi$)</p> $\left\{ \Delta\phi \neq \begin{vmatrix} m\pi \\ (m + \frac{1}{2}) \pi \end{vmatrix} \right\}$	<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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 โจนส์เมทริกซ์

เป็นตัวแทนเชิงคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดโพลาไรเซชัน ซึ่งมีอุปกรณ์ทางแสงอยู่หลายชนิดที่ทำให้แสงผ่านไปและเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะทางโพลาไรเซชัน อุปกรณ์ดังกล่าวนี้จะประกอบด้วยโพลาไรเซอร์เชิงเส้น และหน่วยตัวนำเฟส(Phase retardation)

ในที่นี้สามารถแสดงได้ว่าเมทริกซ์ของโพลาไรเซอร์เชิงเส้นที่มีแกนส่งผ่านทำมุม θ ใดๆกับแกนระนาบอ้างอิงมีค่าเป็น

$$M = \begin{vmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{vmatrix} \quad (2.31)$$

ในกรณีของตัวนำเฟสนั้นต้องการหาเมทริกซ์ที่ทำให้มีการเปลี่ยนสนามไฟฟ้าเดิม $E_{ox} e^{i\Phi_x}$ ให้เป็น $E_{ox} e^{i(\Phi_x + \epsilon_x)}$ และให้ $E_{oy} e^{i\Phi_y}$ เป็น $E_{oy} e^{i(\Phi_y + \epsilon_y)}$ ซึ่งเขียนเป็นเมทริกซ์ได้

$$\begin{vmatrix} E_o e^{i(\Phi_x + \epsilon_x)} \\ E_o e^{i(\Phi_y + \epsilon_y)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} e^{i\epsilon_x} & 0 \\ 0 & e^{i\epsilon_y} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} E_o e^{i\Phi_x} \\ E_o e^{i\Phi_y} \end{vmatrix} \quad (2.32)$$

ดังนั้นสามารถใช้เมทริกซ์แทนตัวนำเฟสได้เป็น

$$M = \begin{vmatrix} e^{i\epsilon_x} & 0 \\ 0 & e^{i\epsilon_y} \end{vmatrix} \quad (2.33)$$

ในที่นี้ ϵ_x และ ϵ_y หมายถึงเฟสของสนามไฟฟ้าในแนว x และ y ที่เพิ่มขึ้นเมื่อแสงผ่านตัวนำเฟส ϵ_x และ ϵ_y อาจมีค่าเป็นลบก็ได้ สำหรับกรณีของผลึกหน่วงเฟสชนิดหนึ่งในสี่ช่วงคลื่น(Quarter-Wave Plate: QWP) จะมีการหน่วงเฟสเป็น

$$|\Delta\epsilon| = |\epsilon_y - \epsilon_x| = \frac{\pi}{2} \quad (2.34)$$

ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

$$\epsilon_y - \epsilon_x = \frac{\pi}{2} \text{ (Fast axis (FA) อยู่ในแนวตั้ง)}$$

และ $\epsilon_x - \epsilon_y = \frac{\pi}{2}$ (Fast axis (FA) อยู่ในแนวราบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะกิจของหน่วยงาน ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในลักษณะแรกคือ FA อยู่ในแนวตั้ง ซึ่งอาจให้ $\varepsilon_x = -\pi/4$ และ $\varepsilon_y = \pi/4$ หรือค่าอื่นๆได้อีก ดังนั้น โจนส์เมทริกซ์ก็จะมีค่าไม่ตายตัว อาจมีได้มากมายขึ้นกับการกำหนดค่า ε_x และ ε_y อย่างไรก็ตามการกำหนดให้ $\varepsilon_x = -\pi/4$ และ $\varepsilon_y = \pi/4$ ทำให้ได้โจนส์เมทริกซ์สำหรับตัวหน่วงเฟสที่มีรูปแบบเหมาะสมกับการนำไปใช้งานต่างๆคือ

$$M = \begin{vmatrix} e^{i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/4} \end{vmatrix} = e^{i\pi/4} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{vmatrix} \quad (2.35)$$

ในทำนองเดียวกัน QWP ที่มี $\varepsilon_x > \varepsilon_y$ หรือ FA อยู่ในแนวราบ ถ้าให้ $\varepsilon_x = \pi/4$ และ $\varepsilon_y = -\pi/4$ จะได้โจนส์เมทริกซ์เป็น

$$M = e^{i\pi/4} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{vmatrix} \quad (2.36)$$

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

$$M = \begin{vmatrix} e^{-i\pi/2} & 0 \\ 0 & e^{i\pi/2} \end{vmatrix} = e^{-i\pi/2} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} \quad (2.37)$$

สำหรับ HWP ที่มี FA อยู่ในแนวตั้ง

$$M = \begin{vmatrix} e^{i\pi/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/2} \end{vmatrix} = e^{i\pi/2} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} \quad (2.38)$$

สำหรับ HWP ที่มี FA อยู่ในแนวราบ

สังเกตได้ว่าอวกส์ประกอบเมทริกซ์ของ HWP ทั้งสองเหมือนกัน จะต่างกันที่ตัวคูณข้างหน้าเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่ E_x มีเฟสนำ E_y อยู่ π จะเหมือนกับที่ E_x มีเฟสตาม E_y อยู่ π นั่นเอง ดังนั้นตัวคูณข้างหน้าจะบอกให้ทราบถึงผลการเปลี่ยนเฟสทุกองค์ประกอบอย่างเท่าๆกัน

โจนส์เมทริกซ์ที่กล่าวมานี้เป็นประโยชน์มากในการพิจารณาผลของโพลาไรเซอ์ต่อแสง ตลอดจนสามารถใช้ศึกษาการทำให้เกิดแสงโพลาไรซ์ชนิดต่างๆด้วยอุปกรณ์เหล่านี้ให้ง่ายขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 สรุป Jones เมทริกซ์สำหรับโพลาไรซ์ชนิดต่างๆ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 สโตกส์เวกเตอร์

จะมีความคล้ายคลึงกับโจนส์เวกเตอร์ในการแทนสถานะโพลาไรซ์และอุปกรณ์ทางแสงด้วยเมทริกซ์ แต่ความแตกต่างระหว่างเวกเตอร์ทั้งสองเห็นได้ชัดเจนจากขนาดของเมทริกซ์ที่ใช้ ในขณะที่โจนส์เวกเตอร์แทนสถานะโพลาไรซ์ของแสงด้วยเมทริกซ์ขนาด 2×1 โดยสมาชิกแต่ละตัวอยู่ในรูปของสนามไฟฟ้าซึ่งประกอบไปด้วยแอมพลิจูดและเฟสของโจนส์เวกเตอร์ โดยในแต่ละแนวแกนหลักสโตกส์เวกเตอร์แทนสถานะโพลาไรซ์ของแสงด้วยเมทริกซ์ขนาด 4×1 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 ดังนั้นจะเห็นว่าสโตกส์พารามิเตอร์นั้นเหมาะสมและสะดวกรวดเร็วในกรณีที่ต้องการทราบลักษณะเอาต์พุตที่ได้จากระบบการมอดูเลตที่กำลังศึกษา เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่นำมาใช้แสดงสถานะโพลาไรซ์ของแสง สามารถวัดได้โดยตรง ซึ่งในส่วนของการทำงานได้มีการนำมาใช้เสนอผลการศึกษาลักษณะเอาต์พุต โดยใช้สโตกส์พารามิเตอร์ด้วย โดยทั่วไปสโตกส์พารามิเตอร์สามารถเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ในแนวตั้งได้ดังนี้

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

โดยที่แต่ละพารามิเตอร์มีนิยาม ดังนี้

$$S_0 \text{ คือ } I_0 + I_{90}$$

พารามิเตอร์นี้หมายถึงความเข้มรวมของแสงโพลาไรซ์ ที่ทำการวิเคราะห์

$$S_1 \text{ คือ } I_0 - I_{90}$$

พารามิเตอร์นี้บอกถึงผลต่างระหว่างความเข้มของแสงโพลาไรซ์ที่ทำการวิเคราะห์เมื่อทำการวัดที่มุม 0 และ 90 องศาเทียบกับแกนอ้างอิง ในกรณีผลต่างมีค่ามากกว่าศูนย์แสดงว่าแสงโพลาไรซ์ดังกล่าวมี

แนวโน้มเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีแกนหลักขนานกับแกนอ้างอิง กรณีผลต่างมีค่าน้อยกว่าศูนย์

แสดงว่าแสงโพลาไรซ์ดังกล่าวมีแนวโน้มเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีแกนหลักตั้งฉากกับแกนอ้างอิง ไม่ว้ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_2 \text{ คือ } I_{45} - I_{-45}$$

พารามิเตอร์นี้บอกถึงผลต่างระหว่างความเข้มของแสงโพลาไรซ์ที่ทำการวิเคราะห์เมื่อทำการวัดที่มุม -45 และ 45 องศาเทียบกับแกนอ้างอิง ซึ่งในกรณีที่ผลต่างมีค่ามากกว่าศูนย์แสดงว่าแสงโพลาไรซ์ดังกล่าวมีแนวโน้มเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีแกนหลักทำมุม 45 องศากับแกนอ้างอิง กรณีที่ผลต่างมีค่าน้อยกว่าศูนย์ก็แสดงว่าแสงโพลาไรซ์มีแนวโน้มที่จะเป็นแสงโพลาไรซ์ที่มีแกนหลักทำมุม -45 องศา กับแกนอ้างอิง

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

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

สโตกส์เวกเตอร์นี้สามารถแทนได้ทั้งแสงที่เป็นแสงโพลาไรซ์และแสงที่ไม่เป็นโพลาไรซ์ หรือโพลาไรซ์บางส่วน เพราะว่าแสงที่ไม่เป็นโพลาไรซ์สามารถแสดงเป็นเวกเตอร์สนามไฟฟ้าได้ที่เวลาใดๆ ดังนั้นคาบเวลาของโพลาไรเซชันทั้งหมดสามารถแสดงเป็นค่าเฉลี่ยออกมาเหมือนกับแสงที่ไม่เป็นแสงโพลาไรซ์ซึ่งค่าสโตกส์เวกเตอร์จะแสดงเป็นค่าเฉลี่ยของส่วนประกอบในรูปของเวกเตอร์ดังนี้

$$S_0 = \langle I \rangle = \langle E_{ox}^2 + E_{oy}^2 \rangle$$

$$S_1 = \langle I_0 - I_{90} \rangle = \langle E_{ox}^2 - E_{oy}^2 \rangle \quad (2.40)$$

$$S_2 = \langle I_{45} - I_{-45} \rangle = \langle 2E_{ox}E_{oy} + \cos \Delta \rangle$$

$$S_3 = \langle I_{RCP} - I_{LCP} \rangle = \langle 2E_{ox}E_{oy} + \sin \Delta \rangle$$

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

$S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 = 1$ เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์งานวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ทำให้สโตกส์เวกเตอร์เป็นนอร์มอลไลซ์นั้นจะหาได้จากการทำให้ความเข้มของแสงรวมทั้งหมดเป็นหนึ่ง ($S_0=1$) ซึ่งทำได้โดยการนำค่าความเข้มของแสงรวมทั้งหมดไปหาค่าความเข้มแสงที่ S_2 และ S_3 ค่าที่ได้ออกมาจะเป็นนอร์มอลไลซ์ที่แสดงสถานะของโพลาไรซ์ต่างๆดังแสดงในตารางที่ 2.3

ข้อดีของสโตกส์เวกเตอร์คือ สามารถวัดได้ง่ายเนื่องจากใช้ความเข้มของแสง ซึ่งต่างจากโจนส์เวกเตอร์ซึ่งแสดงเป็นสนามไฟฟ้าซึ่งยากในการวัดค่า และในงานวิจัยนี้ยังได้ใช้สโตกส์เวกเตอร์มาทำการตรวจสอบและวัดค่าความเป็นโพลาไรซ์ของแสงด้วยดังจะกล่าวถึงต่อไป

ตารางที่ 2.3 แสดงนอร์มอลไลซ์พารามิเตอร์สำหรับแสงโพลาไรซ์หลายๆสถานะ

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	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$

นอกจากการนำสโตกส์พารามิเตอร์มาเขียนให้อยู่ในลักษณะของเมทริกซ์แนวตั้ง เพื่อที่จะใช้เปรียบเทียบกับนอร์มอลไลซ์ของสโตกส์พารามิเตอร์มาตรฐานและตัดสินใจว่าแสงที่กำลังตรวจสอบเป็นเอกสาแสงโพลาไรซ์หรือไม่และมีสถานะเป็นเช่นไร ผู้ทำการทดสอบยังสามารถนำสโตกส์พารามิเตอร์ไปคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาปริมาณที่สามารถใช้บ่งชี้ถึงคุณภาพและลักษณะของแสงโพลาไรซ์ที่กำลังถูกตรวจสอบโดยปริมาณทั้งสอง(เขียนในเทอมของสโตกส์พารามิเตอร์)ประกอบด้วย

1) ค่าความเป็นโพลาไรซ์ของแสง (Degree of Polarization: DOP)

$$DOP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \times 100 \% \quad (2.41)$$

โดยปริมาณนี้จะบอกถึงความเป็นโพลาไรซ์ของแสงกล่าวคือ ในการคำนวณได้ว่า DOP ของแสงที่กำลังตรวจสอบมีค่า 100% แสดงว่าแสงดังกล่าวเป็นแสงโพลาไรซ์อย่างสมบูรณ์ และยังถ้าจำนวนเปอร์เซ็นต์น้อยลงเท่าไรนั้นความเป็นโพลาไรซ์แสงก็จะน้อยลงเท่านั้น อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการสร้างแสงโพลาไรซ์ที่มี DOP เท่ากับ 100% เป็นไปได้ยากมาก ทั้งนี้เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของอุปกรณ์ทางแสงที่เกี่ยวข้อง เช่น อุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับมุมอุปกรณ์ทางแสงไม่ละเอียดพอเนื่องจากปรับค่าได้เป็นมิลลิเมตรเท่านั้น ดังนั้นค่า DOP ที่คาดหวังจึงเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับ 100% มากที่สุด

2) ค่าเอลลิปติกซิตี (Ellipticity: e)

$$e = \tan \left(\frac{1}{2} \left\{ \sin^{-1} \left[\frac{S_3}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}} \right] \right\} \right) \quad (2.42)$$

โดยทั่วไปเอลลิปติกซิตี(e) คือ อัตราส่วนระหว่างผลต่างของแกนสั้น(minor axis) แกนยาว(major axis) ของรูปวงรี ซึ่งในมิตินี้สามารถนำมาใช้เป็นอีกปริมาณหนึ่งเพื่อบ่งบอกลักษณะความเป็นโพลาไรซ์ของแสงให้ชัดเจนยิ่งขึ้น กล่าวคือ โดยทั่วไปสถานะโพลาไรซ์ของแสงสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ โพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้น โพลาไรซ์ชนิดวงกลม และโพลาไรซ์ชนิดวงรี ในกรณีที่แสงกำลังถูกตรวจวัดเป็นแสงโพลาไรซ์สถานะใดก็ตามดังที่กล่าวข้างต้น ค่า DOP ที่คำนวณได้ก็จะมีค่าใกล้ 100% ซึ่งสำหรับในงานวิจัยการวัดค่านี้เพียงค่าเดียวยังไม่เพียงพอที่จะตัดสินลักษณะของแสงโพลาไรซ์ทั้งสามชนิดต่างก็มีโอกาสให้ DOP เท่าๆกันออกมา ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้เห็นถึงความแตกต่างของสถานะโพลาไรซ์ของแสงที่ได้รับจึงจำเป็นต้องใช้ค่าเอลลิปติกซิตี เนื่องจากโพลาไรซ์แต่ละแบบจะมีค่าเอลลิปติกซิตีที่แตกต่างกัน เช่น แสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นจะมีเอลลิปติกซิตีเป็นศูนย์ในขณะที่แสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมจะมีเอลลิปติกซิตีเป็นหนึ่งและแสงโพลาไรซ์ชนิดวงรีจะมีเอลลิปติกซิตีอยู่ระหว่างศูนย์กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
หนึ่ง

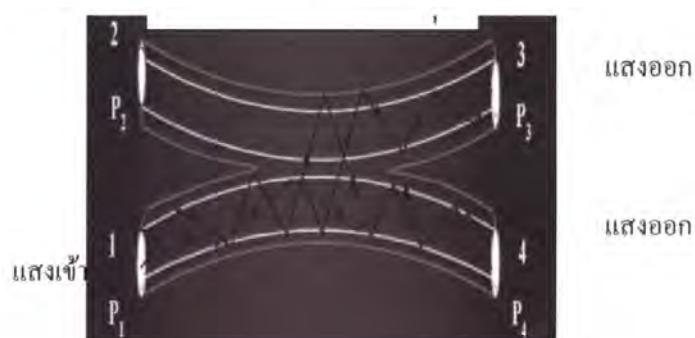
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ออปติคอลลัมเพลอร์ (Optical coupler)

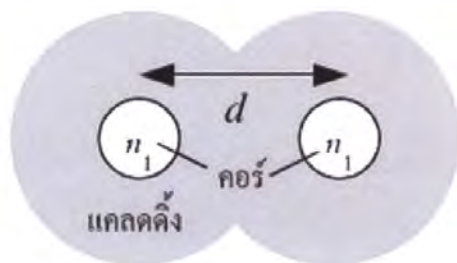
ออปติคอลลัมเพลอร์ (Optical coupler) อุปกรณ์ที่เป็นหัวใจสำคัญของระบบโครงข่ายเส้นใยแก้ว ทำหน้าที่เป็นทางแยกหรือผ่านเพื่อนำข้อมูลไปยังจุดต่างๆ ในโครงข่าย

2.4.1 โครงสร้างของออปติคอลลัมเพลอร์

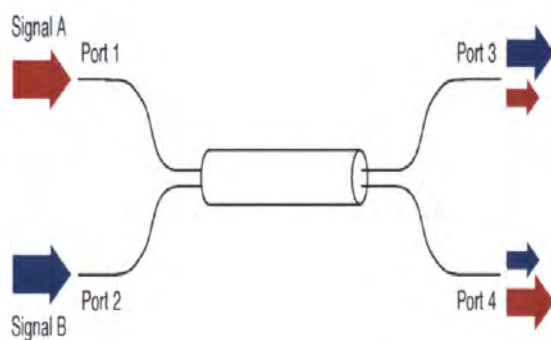
ออปติคอลลัมเพลอร์ คือ ตัวเชื่อมต่อของเส้นใยแก้วนำแสงเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แยกสัญญาณแสงจากเส้นใยแก้วเส้นหนึ่งออกไปเป็นหลายทางในเส้นใยแก้วเส้นอื่น หรือทำหน้าที่รวมสัญญาณแสงจากเส้นใยแก้วหลายเส้น ให้เดินทางรวมกันไปในเส้นใยแก้วที่กำหนดทางด้านขาออก วิธีการที่นิยมในการสร้างออปติคอลลัมเพลอร์ คือ การเชื่อมต่อแกนคอร์ (core) 2 คอร์ติดกันตามยาวหรือเรียกวิธีการนี้ว่า Fused biconical taper ซึ่งบางครั้งจะเรียกออปติคอลลัมเพลอร์ชนิดนี้ว่า FBT ซึ่งโครงสร้างพื้นฐานและสัญลักษณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 โดยทั่วไป ออปติคอลลัมเพลอร์จะอาศัยเทคนิคการกระจายพลังงานของสนามอีแวนเนสเซนส์ (Evanescent field) ในโหมดพื้นฐาน (Fundamental mode) ของแสงที่เดินทางภายในเส้นใยแก้วควบคู่กับการส่งผ่านพลังงานในลักษณะของการสะท้อนของโหมดที่สูงกว่า (High order mode) เมื่อเส้นใยแก้วเปลือยอย่างน้อยสองเส้นถูกจัด โครงสร้างให้ระยะห่างของคอร์อยู่ใกล้กันและส่วนของเคลดคิงเป็นเนื้อเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.17(ก) สมมติให้แสงเดินทางเข้าไปยังพอร์ต 1 ในรูป แสงส่วนหนึ่งจะถูกคัปปลิง (Coupling) หรือการส่งผ่านพลังงานความเข้มแสงไปยังเส้นใยแก้วอีกเส้นหนึ่งที่พอร์ต 4 โดยที่พลังงานส่วนที่เหลือจะคงไว้ที่เส้นใยแก้วเดิมออกไปยังพอร์ต 3 ในขณะที่เดียวกันจะมีแสงส่วนน้อยส่งออกไปยังพอร์ต 2 เนื่องมาจากการกระเจิงและการสะท้อนกลับของแสง (Back scattering) ค่าการคัปปลิงหรือการส่งผ่านพลังงานความเข้มแสงจะขึ้นอยู่กักระยะห่างระหว่างคอร์ d และความยาวในช่วงที่คอร์ขนานใกล้กัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 2.17 (ก) แสดงโครงสร้างของออปติคอลลัมเพลอร์ชนิด FBT ที่มีการนำไปใช้



(ข) ภาพตัดขวางของออปติคอลลักซ์เพลอร์ชนิด FBT



(ค) สัญลักษณ์ของ 2x2 ของออปติคอลลักซ์เพลอร์ชนิด FBT

ตารางที่ 2.4 แสดงจำนวน Port ของการต่อ

One Port Signal Tapping

Coupling Ratio	Input Signal		Output Signal			
	Port	Power	Port	Power	Port	Power
50/50	1	10dBm	3	6.2dBm	4	6.2dBm
90/10	1	10dBm	3	-2.7dBm	4	9.2dBm
99/1	1	10dBm	3	-11.6dBm	4	9.6dBm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Two Port Signal Mixing

Coupling Ratio	Input Signal				Output Signal			
	Port	Power	Port	Power	Port	Power	Port	Power
50/50	1	5dBm	2	8dBm	3	Sig A: 1.8dBm Sig B: 4.2dBm	4	Sig A: 1.8dBm Sig B: 4.2dBm
99/1	1	5dBm	2	8dBm	3	Sig A: -16.6dBm Sig B: 7.6dBm	4	Sig A: 4.6dBm Sig B: -13.6dBm

ออปติคอลลับเพลอร์จัดเป็นอุปกรณ์ประเภทพาสซีฟ (Passive device) ที่เคลื่อนย้ายกำลังงานแสงจากเส้นใยแก้วเส้นหนึ่งไปสู่เส้นใยแก้วอีกเส้นหนึ่งซึ่งจะต้องมีการสูญเสียของสัญญาณเกิดขึ้นภายในตัวมันเองดังนั้น ค่าความสูญเสียทั้งหมด (Excess loss) สามารถที่อธิบายในรูปของอัตราส่วนกำลังงานของอินพุตพอร์ตต่อกำลังของ เอาท์พุตพอร์ตซึ่งมีค่าดังนี้

$$\text{Excess loss (2x2 คับเพลอร์)} = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_3 + P_4} \text{ (dB)} \quad (2.43)$$

ค่าความสูญเสียที่แทรกเข้ามา (Insertion loss) โดยทั่วไปจะอธิบายเป็นการสูญเสียในลักษณะของพอร์ตต่อพอร์ต ซึ่งมีค่าดังนี้

$$\text{Insertion loss (พอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 3)} = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_3} \text{ (dB)} \quad (2.44)$$

ค่าความสูญเสียที่เกิดจากการไขว้แทรก (Crosstalk) ที่พอร์ต 2 ต่อ กำลังงานของอินพุตพอร์ต 1 ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\text{Crosstalk (2x2 คับเพลอร์)} = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} \text{ (dB)} \quad (2.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และอัตราส่วนของการแยกกำลังงานแสงที่เอาต์พุทพอร์ต (Splitting ratio) จะวัดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการหารกำลังงานแสงที่เอาต์พุทพอร์ตซึ่งมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Splitting ratio} &= \left[\frac{P_3}{P_3 + P_4} \right] \times 100\% \quad (\text{dB}) \\ &= 1 - \left[\frac{P_4}{P_3 + P_4} \right] \times 100\% \end{aligned} \quad (2.46)$$

จากพารามิเตอร์การสูญเสียของออปติคคอลลัมเพลอร์นั้นจะเห็นว่า ออปติคคอลลัมเพลอร์จะมีการสูญเสียของสัญญาณแสงที่เดินทางผ่านตัวมันเองอยู่ ซึ่งเมื่อนำไปใช้งานในระบบโครงข่ายจะต้องคำนึงถึงค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ด้วย

2.5 Fiber isolators

Fiber isolators คืออุปกรณ์ทางแสงที่ทำให้การส่งผ่านแสงในเส้นใยแก้วนำแสงเป็นไปในทิศทางเดียว โดยทั่วไปแล้วจะถูกใช้เพื่อป้องกัน feedback ที่ไม่ต้องการให้เข้าสู่ optical oscillator หรือป้องกันแหล่งจ่ายแสงจากแสงสะท้อนและสัญญาณที่ซึ่งอาจทำให้เกิดความไม่เสถียรหรือความเสียหายต่อเครื่องมือ โดยจะยอมให้แสงเดินทางไปในทิศทางเดียวด้วยค่าสูญเสีย (loss) ที่น้อยที่สุด Fiber isolators สามารถใช้ได้กับแสงที่เป็นรูปแบบรูปแบบ polarization-dependent และ polarization-independent สำหรับค่าความยาวคลื่น 780 ถึง 1550 นาโนเมตร ค่ากำลังของแหล่งจ่ายที่ใช้กับค่าความยาวคลื่นเป็นสองสิ่งที่สำคัญต่อการออกแบบ isolators

Isolators ที่มีกำลังต่ำหรือมีกำลังสูงสุด 300 มิลลิวัตต์ และใช้กับความยาวคลื่นมากกว่า 1060 นาโนเมตร จะใช้ Bismuth Iron Garnet (BIG) rotator ซึ่งเป็นรูปเป็นร่างและราคาถูก ส่วน Isolators ที่มีกำลังต่ำและค่าความยาวคลื่นต่ำจะใช้ bulk rotators ซึ่งมีค่าคงที่ Verdet ต่ำกว่า BIG rotator และต้องใช้แม่เหล็กขนาดใหญ่และจะยิ่งทำให้แพงมากขึ้น

Isolators ที่มีกำลังสูงหรือที่มีกำลังสูงมากกว่า 2 วัตต์ จะใช้ crystal polarizer ชนิดที่สามารถดัดกลืนได้ ซึ่งก็คือ crystal Faraday rotators ในทิศทางแสงที่กลับมาตรงกันข้ามของ isolator การใช้ polarizer เข้ามาเพื่อการดัดกลืนแสงที่สะท้อนกลับมานั้นจึงทำให้สัญญาณแสงไม่ไหลย้อนไปทางเดิม การใช้ crystal นั้นจึงต้องมีขนาดใหญ่และแม่เหล็กที่มีกำลังมากเพื่อประสิทธิภาพของ isolators

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Isolator ชนิด polarization-independent จะประกอบอยู่กับเส้นใยแก้วชนิด single mode และ isolator ชนิด polarization-dependent จะประกอบอยู่กับเส้นใยชนิด PM

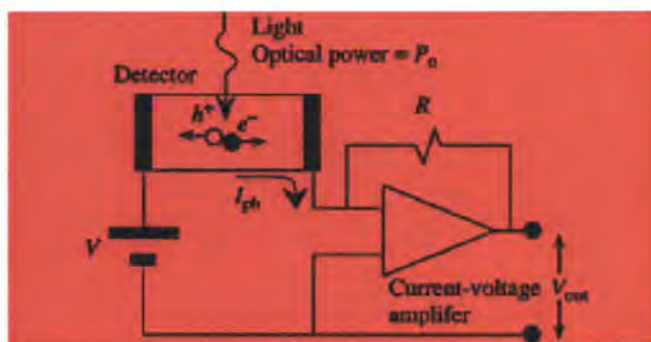
ใน Isolator ที่มีกำลังสูงนั้นจะประกอบไปด้วยเส้นใยแก้วนำแสงชนิดพิเศษจึงทำให้ลดความเสี่ยงในการเสียหายของส่วนประกอบ ดังนั้นจึงสามารถใช้กับกำลังสูงๆ ได้

สำหรับแหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 1064 นาโนเมตร เราจะใช้ Isolators ที่มีกำลังสูง ที่ซึ่งถูกใช้ใน free-space isolator และรวมถึงการ coupling เพื่อให้ Isolator ที่มีกำลังสูงนั้นสามารถใช้งานได้ดีขึ้น

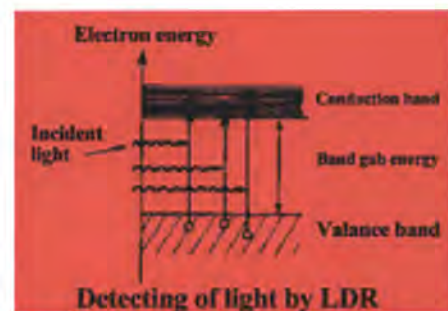
2.6 Photodetector

Photodetector อุปกรณ์การวัดปริมาณความเข้มแสง เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้าได้โดยการดูดกลืนพลังงานของโฟตอนไปใช้ในการกระตุ้นให้สารหรือวัสดุมีการปลดปล่อยพาหะอิสระทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้น

หลักการพื้นฐาน Photodetector เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนสัญญาณแสงที่ตกกระทบตัวเครื่องให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้า เช่น ศักย์หรือกระแส Photodetector หลากๆชนิดจะทำการแปลงสัญญาณนี้โดยการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลอิสระ (electron-hole pairs) ขึ้นจากการดูดกลืนโฟตอน อิเล็กตรอนอิสระนี้จะเกิดขึ้นในแถบการนำและโฮลอิสระจะเกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์ พาหะอิสระเหล่านี้จะเกิดการเคลื่อนในอุปกรณ์วัดจนสร้างสนามไฟฟ้าและทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.18 หลักการพื้นฐาน Photodetector



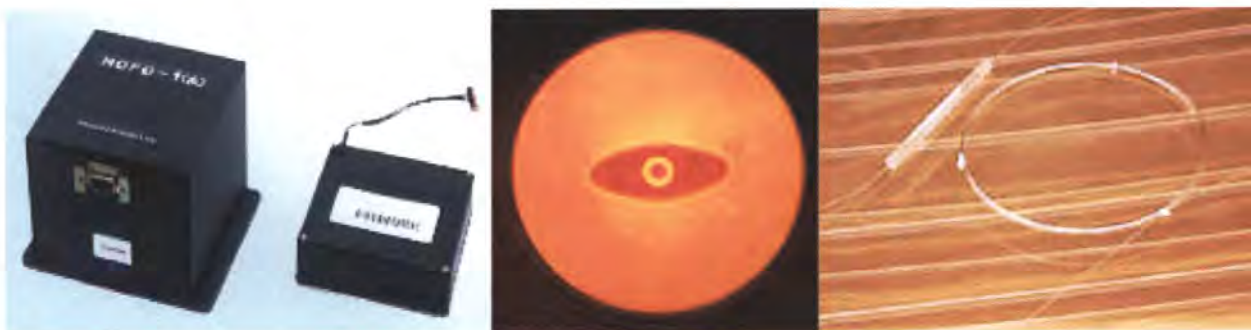
รูปที่ 2.19 หลักการทำงาน Photodetector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 Optical Gyroscope

Optical Gyroscope มีหลักการพื้นฐานจากปรากฏการณ์ Sagnac โดย fiber optical gyroscope ทั้งหมดจะเป็นอุปกรณ์ชนิด solid-state ที่ซึ่งแสดงถึงความน่าเชื่อถือและทนทานตลอดจนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ราคาถูกลง

Optical Gyroscope จะประกอบไปด้วยขดเส้นใยแก้วนำแสงพันอยู่รอบๆแกน ซึ่งแสงจะเดินทางไปในทิศตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา แล้วแต่ลำแสงที่เข้ามาในขด ตัวปรับเฟสจามีไว้สำหรับปรับเฟสและปรับเฟสเป็นค่าความถี่ระหว่างทิศตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา ส่วน detector จะมีไว้สำหรับการรวมกันของลำแสงในทิศตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาและแสดงค่าความเข้มแสงออกทาง output ของ detector จากพิจารณาความถี่หลายรอบจะทำให้ทราบถึงอัตราการประยุกต์ใช้ gyroscope ที่เหมาะสม วิธีดำเนินการของอุปกรณ์พวกนี้จะรวมถึงการเปลี่ยนค่าแอนนาลอกเป็นดิจิทัลสำหรับการรับค่าแอนนาลอกจาก detector ,การเก็บรวบรวมข้อมูลสำหรับการศึกษาสัญญาณจาก output ของตัวแปลง ไปเป็นค่าของเวลาที่ใช้ทดลองและเวลาในช่วงการพิจารณาค่าความถี่ ,วิธีการสำหรับความถี่ที่เป็นแบบซิงโครนัสแอนนาลอกเป็นดิจิทัลและการเก็บข้อมูลค่าความถี่ของอุปกรณ์ และคำนวณอัตราเฟสตลอดจนแอมพลิจูดของจุดๆหนึ่งด้วย



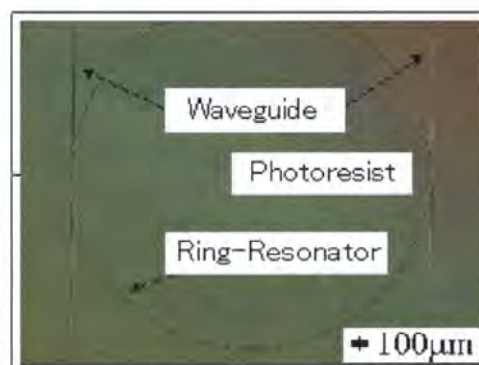
รูปที่ 2.20 แสดง Optical Gyroscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 Optical ring resonator

Optical ring resonator จะประกอบไปด้วยตัวนำคลื่นใน close loop ที่มีมากกว่าหนึ่ง bus เมื่อลำแสงที่มีความยาวคลื่นที่เหมาะสมนั้นรวมจับคู่กันใน loop โดยคลื่นแสงที่ input ลำแสงนี้มาจากใน ความเข้มที่เกิดขึ้นเหนือ multiple round-trip เนื่องด้วย constructive interference (คลื่นรบกวน) ลำแสงนี้ สามารถตรวจจับได้โดยเครื่องตรวจวัดคลื่น ถ้ามีค่าความยาวคลื่นบางค่าใน loop ตัว ring resonator นี้จะมีหน้าที่เป็นตัวกรอง

การประยุกต์ใช้นั้นจะนำไปใช้ใน Optical switching ทุกชนิด, Electro optical switching, การปรับเปลี่ยนความยาวคลื่น, การกรองเหล่านี้จะแสดงให้เห็นได้โดยการใช้ ring resonator



รูปที่ 2.21 แสดง ring resonator

2.9 FIBER POLARIZATION CONTROLLER

POLARIZATION CONTROLLER จะใช้เพื่อเหนี่ยวนำ birefringence ให้เกิด wave plate 3 ส่วนเพื่อเป็นการแปลง polarization ในเส้นใยแก้วนำแสง single mode โดยเส้นใยแก้วนำแสง single mode นี้จะถูกขดเป็น 3 ขดตามแกนวงกลม 3 แกน ซึ่งจะทำให้เกิด wave plates ส่วนย่อย 3 ส่วน จำนวนของ birefringence ที่ถูกเหนี่ยวนำในเส้นใยแก้วนำแสงจะเป็นบทบาทของเส้นผ่านศูนย์กลางของ cladding, เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนทั้งสามซึ่งเป็นค่าตายตัว, จำนวนการขดเส้นใยแก้วนำแสงภายใน แกนแต่ละแกนและค่าความยาวคลื่นของแสง การเปลี่ยนมุมของเส้นใยแก้วนำแสงอย่างรวดเร็วโดยการ หมุนแกนวงกลมด้วยมือจะเป็นการเปลี่ยนเวกเตอร์ของแสง polarize

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

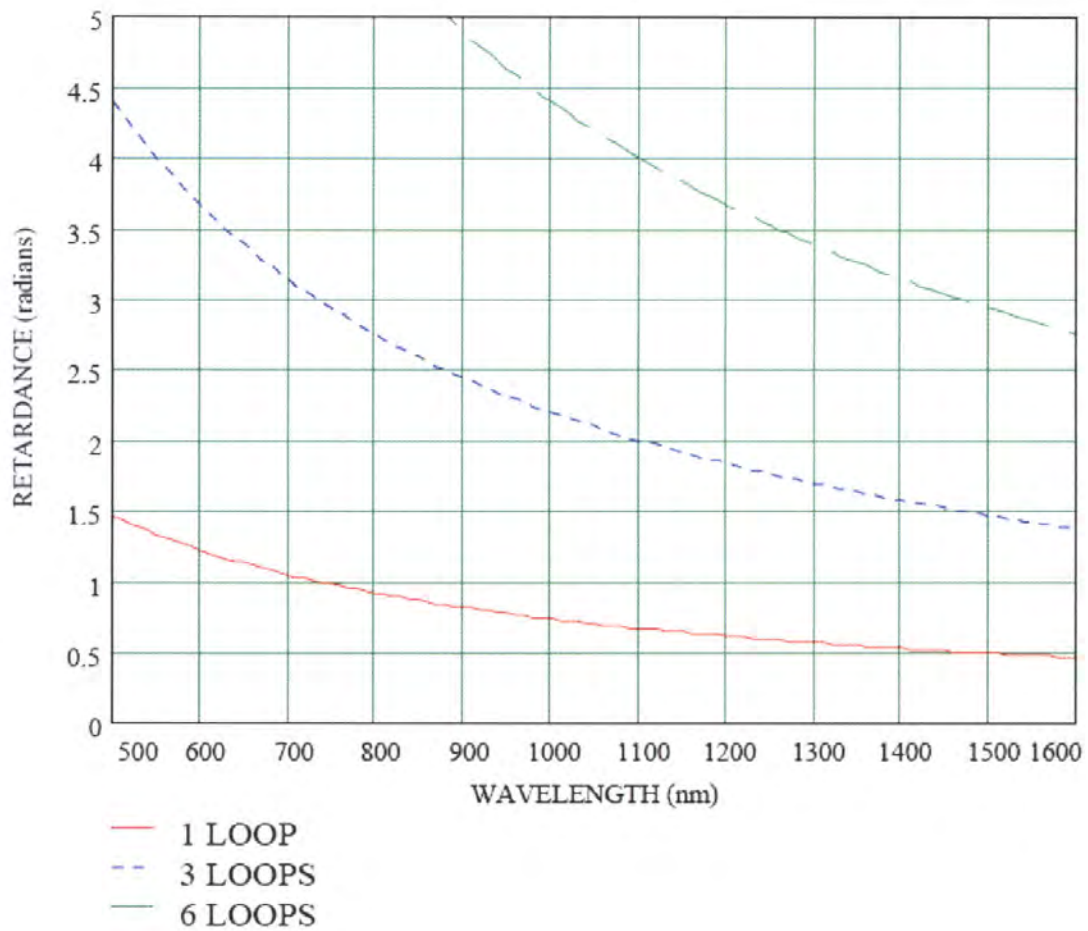


รูปที่ 2.22 แสดงรูปทรงของ POLARIZATION CONTROLLER

ถ้าเราต้องการจะเปลี่ยนรูป Input ของแสง polarize ไปสู่แสง polarize ที่ output การรวมกันขององศาแกนหมุนทั้ง 3 จะเป็นการออกแบบโครงสร้างของการ polarize โดยวงกลมวงแรกซึ่งคือ quarter wave plate จะเป็นตัวเปลี่ยนค่าแสง polarize ทาง input เป็นแสง polarize เชิงเส้นและแกนวงกลมอันสุดท้ายจะเป็นตัวเปลี่ยนเชิงเส้นเป็น polarize ธรรมดาอีกครั้ง ดังนั้นการปรับมุมของแกนวงกลมแต่ละอันจะเป็นตัวเปลี่ยนแปลงค่าแสง polarize ทาง output ภายใต้อายุความยาวคลื่นของแสงที่ 500 ถึง 1600 นาโนเมตร

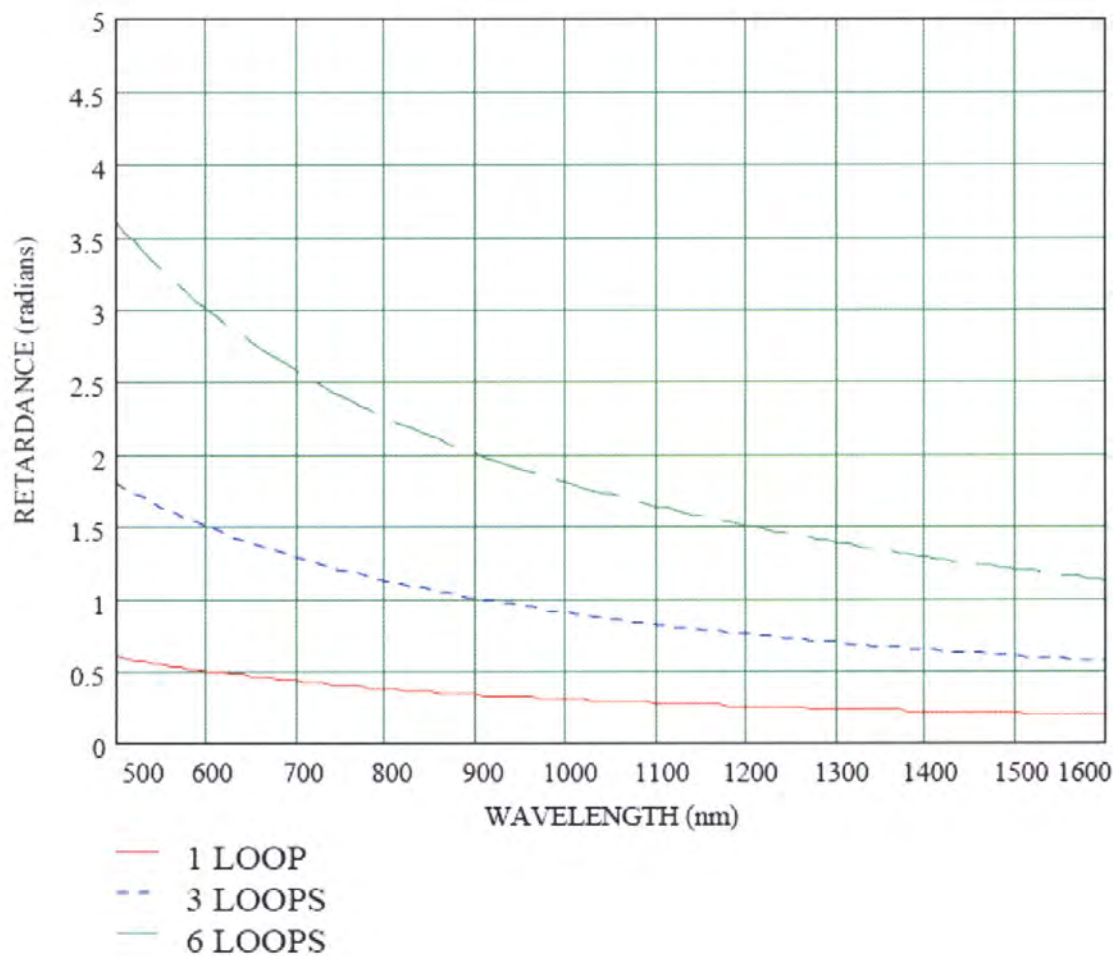
การพล็อตกราฟการหน่วงความเร็วของแสงในแกนวงกลมแต่ละอันต่อค่าความยาวคลื่นจะแสดงดังรูปที่ 2.29 สำหรับค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของ cladding 125 ไมโครเมตร โดยจะแสดงผลของการขดเส้นใยแก้วนำแสง 1,3 และ 6 ขด ค่าตัวแปร d_1 คือค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของ cladding และ λ_1 คือค่าความยาวคลื่น ในเส้นใยแก้วนำแสงที่เสียบผ่านศูนย์กลาง core เท่ากับ 80 ไมโครเมตร การหน่วงความเร็วของแสงในแกนวงกลมแต่ละอันต่อค่าความยาวคลื่นจะแสดงดังรูปที่ 2.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างการหน่วงความเร็วของแสงในแกนวงกลมแต่ละอันต่อค่าความยาวคลื่นในกรณีการขดเส้นใยแก้วนำแสง 1,3 และ 6 ขด
 ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของ Cladding 125 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างการหน่วงความเร็วของแสงในแกนวงกลมแต่ละอันต่อค่าความยาวคลื่นในกรณีการขดเส้นใยแก้วนำแสง 1,3 และ 6 ขด
ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของ Cladding 80 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการจำลองวิเคราะห์ที่ใช้โปรแกรมประยุกต์

4.1 ผลการทดลอง

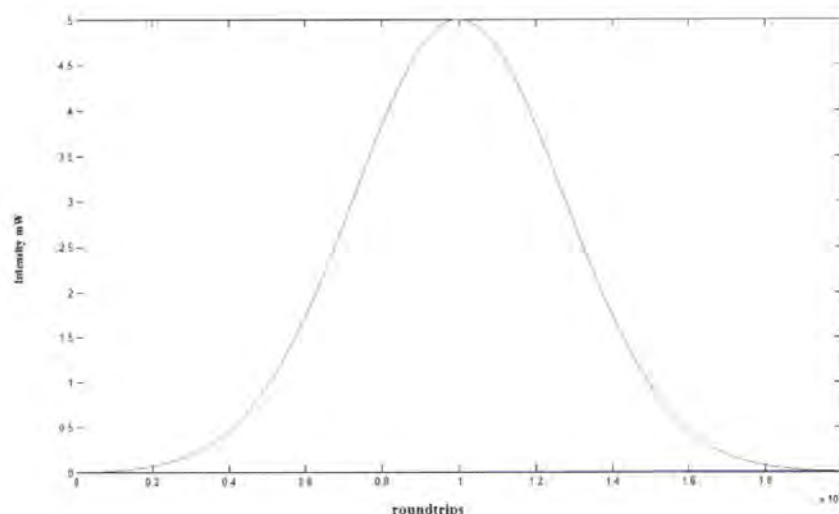
ในการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะของคลื่นแสงที่เกิดการ โพลาริซายในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงในสถานะต่างๆเพื่อทราบถึงความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยจะพิจารณาถึงเหตุการณ์ต่อไปนี้

- 4.1.1 ลักษณะรูปคลื่นที่ป้อนเข้าไปในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง
- 4.1.2 ลักษณะเอาต์พุตที่ปรากฏในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง
- 4.1.3 ลักษณะเอาต์พุตที่แสดงผลทาง oscilloscope

ผลการทดลองและการจำลอง โดยใช้โปรแกรม MATLAB

4.1.1 ลักษณะรูปคลื่นที่ป้อนเข้าไปในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง

เมื่อพิจารณาโดยความยาวคลื่น 1310 nm โดยที่ $n_0=1.453$, $n_2=2.2 \times 10^{-15}$ (InGaAsP/InP)

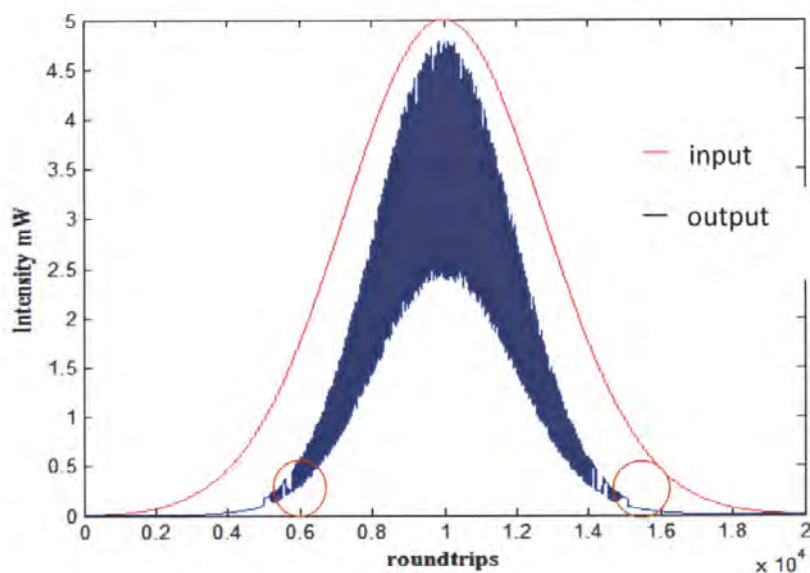


รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะรูปกราฟอินพุตจากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การจำลองเอาต์พุตที่ปรากฏในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง

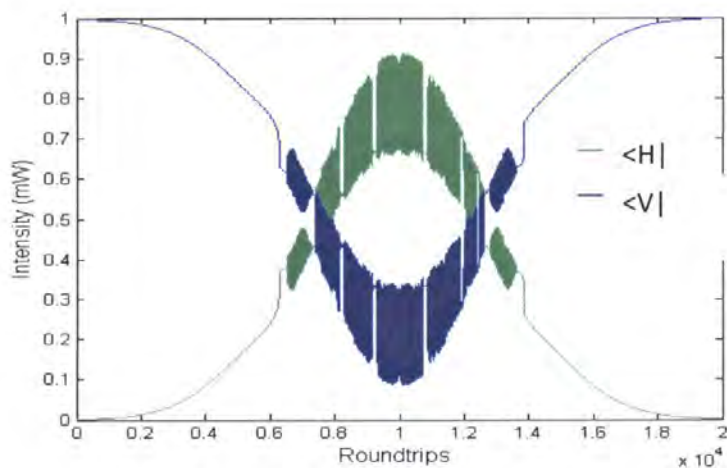
เมื่อพิจารณาโดยความยาวคลื่น 1310 nm โดยที่ $n_0=1.453$, $n_2=2.2 \times 10^{-15}$ (InGaAsP/InP)



รูปที่ 4.2 แสดงเอาต์พุตที่ปรากฏในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงจากการจำลองเปรียบเทียบกับอินพุต

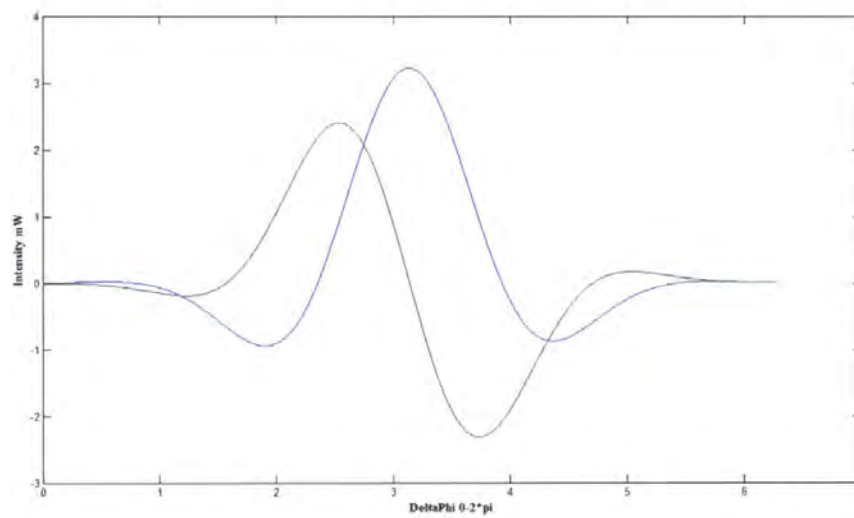
4.1.3 การจำลองลักษณะเอาต์พุตที่แสดงผลทาง oscilloscope

เมื่อพิจารณาโดยความยาวคลื่น 1310 nm โดยที่ $n_0=1.453$, $n_2=2.2 \times 10^{-15}$ (InGaAsP/InP)

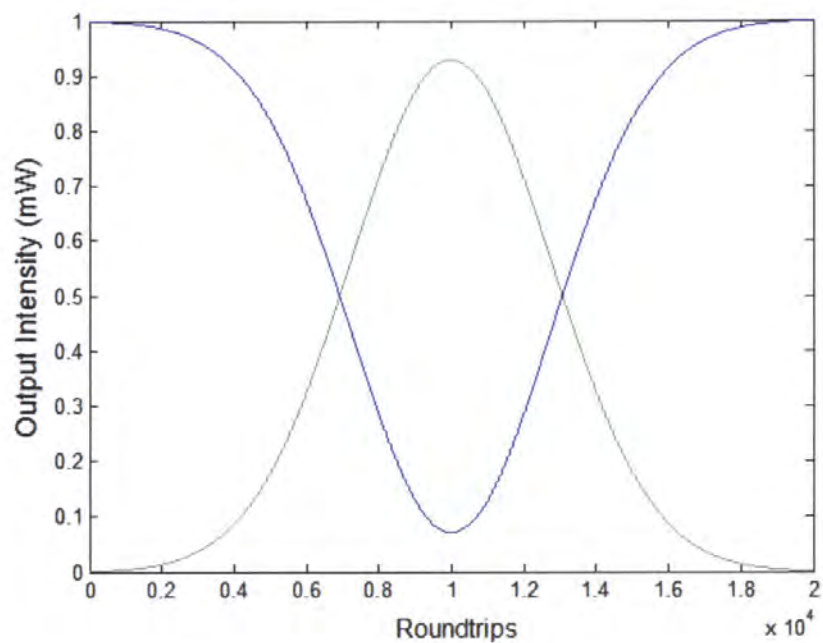


รูปที่ 4.3 แสดงเอาต์พุตที่ปรากฏผลทาง oscilloscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงเอาต์พุตที่ปรากฏใน โพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงจากการจำลองที่มีการ
เลื่อนเฟส



รูปที่ 4.5 แสดงเอาต์พุตที่เกิดปรากฏการณ์ kerr effect

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 การประยุกต์ใช้งานจากผลปรากฏในโครงข่ายฟองแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง

4.1.4.1 การประยุกต์ใช้ในด้านกีฬา

นำมาทำ VR gyroscopes



รูปที่ 4.6 Full body gyroscope

นำมาทำเครื่องเล่น Power ball

ซึ่งเป็นเทคโนโลยีล่าสุดทางด้านกีฬาโดยเป็นเครื่องออกกำลังกายแขนช่วยในการพักผ่อนคลาย

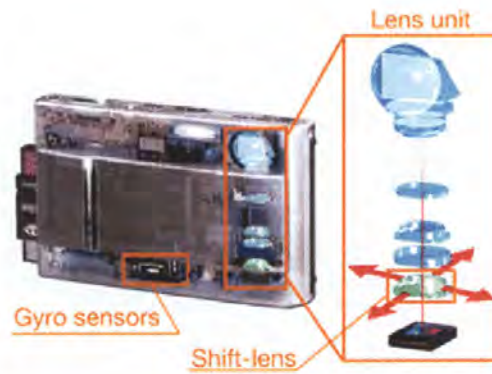


รูปที่ 4.7 Power ball

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4.2 การประยุกต์ใช้ในกล้องถ่ายรูป

เพื่อช่วยให้ภาพที่ได้ไม่มีการเบลอ ภาพถ่ายมีความคมชัดขึ้น



รูปที่ 4.8 A gyroscope and shift lens help prevent image blur.



รูปที่ 4.9 The Sony Cybershot is small in size, measuring approximately 3 1/2 x 2 1/8 x 3/4 inches.

4.1.4.3 การประยุกต์โดยนำไปประดิษฐ์เข้ากับอุปกรณ์ต่างๆ

Gyro Stabilizer

เป็นอุปกรณ์ใช้ถ่ายภาพ ประกอบไปด้วย gyroscope 2 อัน ที่ตั้งฉากกัน ซึ่งอุปกรณ์ตัวนี้นำไปติดตั้งเข้ากับเครื่องบินทำให้ได้ภาพถ่ายที่คมชัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 Ken-Lab's KS6 Gyroscopic Stabilizer



รูปที่ 4.10 Adriel Heisey Flying with Gyro-Stabilized Camera



รูปที่ 4.11 Heart Island and Boldt Castle - Alexandria Bay, NY - Uncorrected Scan from a Provia

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 100/1000 slide, Pentax 67 90mm lens, Ken-lab KS6 Gyroscopic Stabilizer ยี่ห้อชานการค้ำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปประยุกต์เป็นเครื่องตรวจวัดที่ชื่อ The LabWrench

ซึ่งสามารถวัดค่ามุม ค่าทอร์ก ในจุดที่ต้องการได้โดยไม่ต้องมีแขนวัดมุมที่ยื่นออกมา



รูปที่ 4.11 The LabWrench

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1สรุปผลของงานวิจัย

จากการศึกษาพฤติกรรมการเกิด โพลาริเซชันในสายไฟเบอร์โดยการประยุกต์ใช้เป็น หลักการของ Gyroscope sensor และใช้หลักการของความต่างเฟสของ $\langle H \rangle$ กับ $\langle V \rangle$ เมื่อผ่าน Polarize Beam Splitter (PBS) ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถที่จะออกแบบเป็นการวัด Gyroscope Fiber Ring Resonator หรือ Gyroscope Micro Ring Resonator ได้

ในงานวิจัยฉบับนี้เป็นการประยุกต์ใช้หลักการของ Gyroscope 2 มิติ ซึ่งสามารถพัฒนาให้เป็น Gyroscope 3 มิติได้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวตรวจวัดในระบบการขับเคลื่อนรถยนต์ต่างๆ เช่น เครื่องบินโดยสาร เครื่องบินรบ รถยนต์ ดาวเทียม กระสวยอวกาศและเล่นในงานก่อสร้าง เป็นต้น ด้วย การใช้หลักการของ Gyroscope sensor จึงทำให้สามารถปรับระบบการขับเคลื่อนที่ในแนวแกน x แนวแกน y และแนวแกน z ให้เกิดความสมมาตรได้ในขณะที่กำลังเกิดการเสียสมดุล

จากการศึกษาปรากฏการณ์ทางแสงในเส้นใยแก้วนำแสงในรูปแบบของ Ring resonator จะเกิด ปรากฏการณ์ อันเนื่องมาจากผลกระทบที่เกิดจากวัสดุศาสตร์ที่ใช้ผลิตสายไฟเบอร์ คือ Kerr effect ได้แก่ chaos , Bifurcation , Bistability การประยุกต์ใช้งาน Ring resonatorในรูปแบบต่างๆ สามารถ นำไปประยุกต์ใช้งานเป็น sensor , Filter , Attenuator , Amplifier , Switching

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในทางปฏิบัติใช้เป็น Fiber ring resonator ที่มีขนาดใหญ่ซึ่งเราสามารถนำหลักการของ Gyroscope sensor มาประยุกต์ใช้เป็น Gyroscope micro ring resonator ได้โดยมีขนาดเล็กกว่า Gyroscope fiber ring resonator เพื่อสะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้งานในอนาคตได้ง่ายขึ้น

เอกสารอ้างอิง

ผศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน **เครือข่ายใยแก้วนำแสง** ส่วนตำราสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรม
สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี 19-106 (1998)

อภิรักษ์ มัณยานนท์ **การสื่อสารเส้นใยแสง** คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 107-139 (2002)

John Dakin ,Brian Culshaw **Optical Fiber Sensors Principles and components Volume One**
2270-273 38-48 (1988)

John Dakin ,Brian Culshaw **Optical Fiber Sensors Principles and components Volume Two**
2729-738 (1988)

http://203.172.179.78/pro_stu/Fiber%20On%20Web/Pra_%20Fiber%20Optic.ppt----ประวัติ
ความเป็นมาของเส้นใยแก้วนำแสง

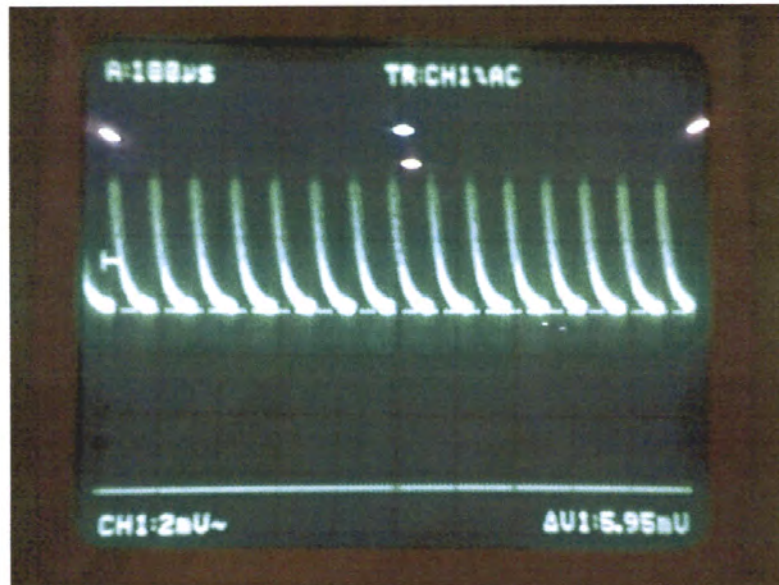
http://dk.coe.psu.ac.th/assign/gyro/intro_gyro1.htm---- ใยโรสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง



แสดงลักษณะรูปกราฟอินพุตจากการทดลอง



แสดงเอาต์พุตที่ปรากฏในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงจากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์การทดลอง



รูปแสดงการจัดวางอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้