

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาฟตอนในเส้นใยแก้วนำแสง



นายพิทย อนรรักษ์ภราดร
นายนันท์วิทย์ พลับจั่น
นายศพนธ์ จรัสสุรีย์ฉาย

21/11
พ.ศ. 2549

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **62284**

วัน,เดือน,ปี..... - 8 ส.ค. 2549

b..... 11616878

i.....

โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A study of photon in fiber optics

Mr.Pitaya Anurakpradorn

Mr.Nantawit Plubjan

Mr.Yossapon Jarussureechay

A Special Project Submitted in partial Fulfillment of the Requirement for
the Degree of Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Lardkrabang

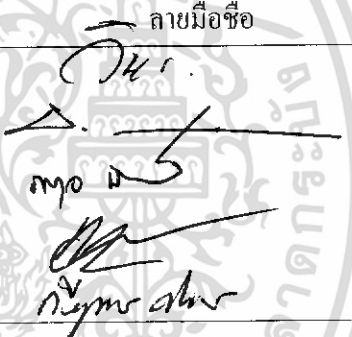
Academic Year. 2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การศึกษาฟิสิกส์ในเส้นใยแก้วนำแสง

นักศึกษา นายนันทวิทย์ พลับจั่น
นายพิทย อนุรักษภราดร
นายศพนธ์ จรัสสุริย์ฉาย
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อ.กীরบุทธิ์ ศรีนวลจันทร์

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	รศ.วิชาญ เตชิตธีระ	
กรรมการ	อาจารย์ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง	
กรรมการ	อาจารย์ภารุจ บัณฑิตธาตวิทย์	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์กীরบุทธิ์ ศรีนวลจันทร์	

(รองศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ)

หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาโฟตอนในเส้นใยแก้วนำแสง

นักศึกษา นายนันทวิทย์ พลับจั่น
นายพิทย อนุรักษภราคร
นายบศพนธ์ จรัสสุริย์ฉาย

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา 2548
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อ.เกียรติ์ ศรีนวลจันทร์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาและทดลองคุณสมบัติของโฟตอนผ่านสายเคเบิลใยแก้วนำแสง โดยอาศัยทฤษฎีทางอนุภาคเข้ามาช่วยในการอธิบาย ซึ่งแสงที่ใช้ในการทดลองเป็นแสงที่โพลาริซ์ส่งผ่านสัญญาณเข้ามาในเส้นใยแก้วนำแสง จากนั้นจะถูกแยกสัญญาณออก สัญญาณทางแสงที่ได้นี้จะถูกทำการตรวจวัดขนาดของสัญญาณ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับเฟสและสถานะทางโพลาริซ์ ผลที่ได้นี้จะสามารถบอกได้ถึงคุณสมบัติของโฟตอนได้

Special Project Title A study of photon in fiber optics

Name Mr.Nantawit Plubjan
Mr.Pitaya Anurakpradorn
Mr.Yossapon Jarussureechay

Department Applied Physics

Program Applied Physics

Academic Year 2005

Special Project Advisor Assoc.Prof.Dr.Precha Yupapin
Mr.Keerayoot Srinuanjan

ABSTRACT

In this project, studying and experiment of a properties of photon via fiber optic by using explanation of quantum theory. The polarized input inserts through fiber optic is splitted to two beams by beam splitter and detecting in magnitude so that comparing between phase and polarized states. The obtained results indicate that the properties of photon in fiber optics.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้ ในระยะเวลา 1 ปีที่ผ่านมาผู้จัดทำได้ประสบปัญหามากมาย เพื่อให้โครงการชิ้นนี้สำเร็จลุล่วง แต่ผู้จัดทำไม่เคยคิดย่อท้อ อาทิเช่น อุปกรณ์ที่สั่งซื้อไม่เป็นไปตามที่คาดคิด คือ เลเซอร์และตัวขับเคลื่อน ซึ่งจำเป็นต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศไม่ได้สั่งมาโดยไม่แจ้งให้ทางผู้จัดทำทราบก่อน ทำให้ไม่สามารถจัดทำโครงการชิ้นนี้ได้อย่างสมบูรณ์ นี่เป็นเพียงปัญหาส่วนหนึ่งที่เกิดขึ้น แต่ไม่ว่าปัญหาจะมากน้อยเพียงใดก็ตามผู้จัดทำก็สามารถผ่านพ้นมาได้ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นผู้จัดทำก็ได้รับความช่วยเหลือในด้านต่างๆอย่างมากมายจากบุคคลเหล่านี้ ซึ่งถ้าไม่ได้บุคคลเหล่านี้โครงการนี้ก็คงจะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้อย่างแน่นอน อันได้แก่

บิดาและมารดา

ซึ่งเป็นผู้ที่คอยให้กำลังใจ คอยห่วงใย และให้ความเข้าใจในเรื่องต่างๆเสมอมา ไม่ว่าจะเป็นเรื่องการกลับบ้านซึ่งแทบจะไม่ได้กลับเลย หรือเรื่องกำลังทรัพย์

รศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน

ผู้ให้แนวทางในการจัดทำโครงการชิ้นนี้ขึ้นมา ทั้งยังให้ความรู้ คำปรึกษาต่างๆและช่วยแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นให้ผ่านไปได้

อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษา และถามไถ่ความคืบหน้า

รุ่นพี่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ที่คอยให้คำปรึกษา และให้คำแนะนำเมื่อมีปัญหา

เพื่อนๆภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ขอบคุณที่คอยให้กำลังใจและความช่วยเหลือ ไม่ว่าจะเป็น อุปกรณ์ คอมพิวเตอร์ สถานที่ที่ใช้ทำโครงการ คำปรึกษา และความรู้ต่างๆ อธิบายให้ผู้จัดทำได้มีความเข้าใจยิ่งขึ้น

นายพิทย อนุรักษ์ภราดร

นายฉันทวิทย์ พลับจั่น

นายศพนธ์ จรัสสุริย์ฉาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการพิเศษ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 ธรรมชาติของแสง	3
2.2 คุณสมบัติพื้นฐานของแสง	4
2.2.1 การเป็นคลื่นของแสง	4
2.2.2 การเป็นอนุภาคของแสง	5
2.2.3 การกระเจิงของแสง(Scattering)	6
2.2.4 การหักเหและการสะท้อนของแสง	7
2.2.5 การแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสง	9
2.2.5.1 การแทรกสอดของแสง	9
2.2.5.2 การเลี้ยวเบนของแสง	11
2.2.6 โพลาริเซชัน (Polarization)	12
2.3 ควอนตัม (Quantum)	12
2.3.1 ปรากฏการณ์ทางควอนตัม	14
2.3.1.1 Coherent superposition	14
2.3.1.2 Entanglement	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4 เส้นใยนำแสง	16
2.4.1 ชนิดของเส้นใยนำแสง	20
2.4.1.1 การแบ่งชนิดตามสารไดอิเล็กทริกที่ใช้	21
2.4.1.2 การแบ่งตามจำนวนโหมดในการเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสง	21
2.4.1.3 การแบ่งตามลักษณะของดัชนีการหักเห	22
2.4.2 คุณลักษณะในการส่งสัญญาณของเส้นใยนำแสง	23
2.4.2.1 การลดทอนสัญญาณ	23
2.4.2.2 การสูญเสียสัญญาณในเส้นใยนำแสง	24
2.5 การตรวจจับสัญญาณทางควอนตัม	27
2.5.1 อุปกรณ์รับแสง	27
2.5.2 สารและโครงสร้างของอุปกรณ์รับแสง	29
2.5.2.1 สารที่ใช้สร้างอุปกรณ์รับแสง	29
2.5.2.2 โครงสร้างของอุปกรณ์รับแสง	29
2.5.3 อวาแลนซ์โฟโตไดโอด	30
2.5.4 คุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง	31
2.5.5 อุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง	33
บทที่ 3 ขอบเขตและวิธีการดำเนินงานวิจัย	35
3.1 การศึกษาข้อมูล	35
3.2 ขอบเขตและวิธีการดำเนินงานวิจัย	35
ขั้นตอนที่ 1 วิธีการเชื่อมต่อเส้นใยแก้ว	35
ขั้นตอนที่ 2 วิธีการทดสอบสายไฟเบอร์	36
ขั้นตอนที่ 3 การทดลองและการวิเคราะห์	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปราย	39
วิเคราะห์ผลการทดลอง	48
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	49
เอกสารอ้างอิง	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
ตารางที่ 2.1 การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสง	21
ตารางที่ 2.2 ลักษณะของดัชนีการหักเหและการเดินทางของแสง ในเส้นใยนำแสง	23



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.0 (ก) การสร้างหน้าคลื่นใหม่ของคลื่นระนาบ	4
(ข) การสร้างหน้าคลื่นใหม่ของคลื่นแบบทรงกลม	
รูปที่ 2.1 วงจรแสดงการนำกระแสออกมาจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก	5
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความถี่ของแสงในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก กระแสไฟฟ้าจะเริ่มไหลเมื่อความถี่ของแสงสูงกว่าค่าๆหนึ่ง	6
รูปที่ 2.3 การหักเหเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นไม่เท่ากัน	7
รูปที่ 2.4 การหักเหและการสะท้อนของแสงที่พรมแดนระหว่างวัตถุ 2 ชนิด ในรูปนี้ $n_1 > n_2$	8
รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนเฟสของแสงในการผ่านตัวกลางต่างๆ	9
รูปที่ 2.6 แสดงลวดลายการแทรกสอด	9
รูปที่ 2.7 แสดงการแทรกสอดของแสง	10
รูปที่ 2.8 แสดงการแทรกสอดของแสง แถบมืด และ แถบสว่าง	11
รูปที่ 2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของแสง	11
รูปที่ 2.10 แสดงการแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสง	12
รูปที่ 2.11 สภาพการเคลื่อนที่แบบควอนตัม	13
รูปที่ 2.12 แสดง single particle ปรากฏตัวได้สองตำแหน่งในเวลาเดียวกัน	15
รูปที่ 2.16 การเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสง	16
รูปที่ 2.17 มุมสูงสุดในการป้อนแสง	19
รูปที่ 2.18 การเชื่อมต่อแหล่งกำเนิดแสงกับเส้นใยแก้วนำแสงผ่านเลนส์	19
รูปที่ 2.21 การกระจัดกระจายแสงแบบเรย์เลย์	25
รูปที่ 2.19 การสูญเสียแสงที่เกิดจากการโค้งงอเส้นใยนำแสง	26

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.20 การสูญเสียแสงที่เกิดจากการต่อเส้นใยนำแสง	27
รูปที่ 2.22 ดีพลีชั่น โชน	28
รูปที่ 2.23 ความยาวคลื่นในการรับแสงของอุปกรณ์รับแสงแต่ละชนิด	29
รูปที่ 2.24 หลักการทำงานการรับแสงและระดับพลังงานของ ฟินโฟโตไดโอด	30
รูปที่ 2.25 หลักการทำงานการรับแสงและระดับพลังงานของ อะวาแลนซ์โฟโตไดโอด	31
รูปที่ 3.1 แสดง Diagram การทดสอบสายไฟเบอร์	37
รูปที่ 3.2 หลักการพื้นฐานของการส่งรับสัญญาณทางใยแก้วนำแสง	37
รูปที่ 3.3 แสดงถึง Diagram ของ การ โคลนนิ่งเชิงควอนตัม วิธีการแรก	38
รูปที่ 3.4 แสดง Diagram ของการ โคลนนิ่งเชิงควอนตัม วิธีการที่ 2	38
รูปที่ 4.1 แสดงถึง โคอะแกรม ของการทดลอง	39
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Optical Intensity กับ Polarized Angle ของ Coupler (50/50) ด้านInput	40
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Optical Intensity กับ Polarized Angle ของ Coupler (50/50) ด้านOutput	41
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Optical Intensity กับ Polarized Angle ของ Coupler (60/40) ด้าน60%	42
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Optical Intensity กับ Polarized Angle ของ Coupler (60/40) ด้าน40%	43
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Optical Intensity กับ Polarized Angle ของ Coupler (70/30) ด้าน70%	44
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Optical Intensity กับ Polarized Angle ของ Coupler (70/30) ด้าน30%	45
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Optical Intensity กับ Polarized Angle ของ Coupler (80/20) ด้าน80%	46
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Optical Intensity กับ Polarized Angle ของ Coupler (80/20) ด้าน20%	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และเทคโนโลยีทางการสื่อสารได้มีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว เพื่อตอบสนองความต้องการที่ไม่สิ้นสุดของมนุษย์ ซึ่ง การสื่อสารในปัจจุบันมีความสำคัญ หรืออาจเรียกได้ว่าเป็น ปัจจัยที่ 5 ของการดำรงชีพในปัจจุบันก็ว่าได้ ซึ่งจากการได้เข้ามามีบทบาทในวงการอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมาก จึงทำให้เราทราบว่าสัญญาณต่างๆที่ใช้ในงานการสื่อสาร หรือ การรับส่งข้อมูล และรวมไปถึงการนำเทคนิคเหล่านี้มาทำประโยชน์เพื่อตนเอง ทั้งด้านประโยชน์ส่วนตัวหรือประโยชน์แก่ผู้อื่น จึงควรทราบถึงวิธีการและ การดำเนินการของการสื่อสารในรูปแบบต่างๆ ซึ่งแสงหรือโฟตอน ในปัจจุบันได้ถูกนำมาใช้เกี่ยวข้องกับการส่งสัญญาณในระบบการสื่อสารเป็นอย่างมาก

ซึ่งในการศึกษาคุณสมบัติของโฟตอนนั้น การโคลนนิ่งสัญญาณก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะแสดงถึงคุณสมบัติความเป็นแอนแทงเกิลของโฟตอนได้ สัญญาณที่ได้ควรมีค่าผิดพลาดน้อย จึงจำเป็นต้องทราบถึงหลักการทํางาน ทราบถึงวิธีการดำเนินการของการรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งต้องอาศัยทฤษฎีต่างๆที่ใช้ในการ โคลนนิ่งสัญญาณ โดยทฤษฎีทางควอนตัมนั้นการโคลนนิ่ง 1 โฟตอนนั้น ไม่อาจทำได้ แต่อาจจะโคลนนิ่งได้ก็ต่อเมื่อมีลักษณะเป็น wave package คือเป็นมัดคลื่นโฟตอนหรือสัญญาณเป็นกลุ่ม แล้วจึงส่วนน้อยออกมา ในโครงการนี้จะทำการศึกษาถึงหลักการทดสอบและทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของสัญญาณที่ได้ ซึ่งผลที่ได้จะเป็นตัวบ่งบอกได้ว่าสามารถทำการ โคลนนิ่งสัญญาณมัดคลื่นโฟตอนได้หรือไม่

1.2 วัตถุประสงค์

- 2.1 สามารถนำเอาคุณสมบัติเฉพาะตัวของแสงมาประยุกต์ใช้ในการคักสัญญาณที่ต้องการทราบ มาใช้งานได้
- 2.2 นำความรู้ในด้านเส้นใยแก้วนำแสง , ทฤษฎีทางแสง มาใช้และแสดงผลออกมาได้อย่างแม่นยำ
- 2.3 เพื่อศึกษาและทดลองวิธีการ โคลนนิ่งสัญญาณ โดยวิธีการดึงสัญญาณส่วนที่น้อยๆ ที่เกิดจากการส่งสัญญาณ มาเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ และคัดลอกสัญญาณขึ้นมาได้

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ขอบเขตการศึกษาของโครงการนี้สามารถแบ่งออกเป็นส่วนๆ ได้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.1 ส่วนทฤษฎี จะเป็นการศึกษา ทฤษฎีทางด้านแสง และการส่งสัญญาณภายในเส้นใยแก้วนำแสง และเรียนรู้วิธีการตั้งสัญญาณส่วนที่น้อยๆ กิดและตั้งสมมุติฐานของสัญญาณที่ควรจะได้ตาม ทฤษฎีนำมาประยุกต์ใช้งาน ซึ่งในแต่ละส่วนของทฤษฎีนี้ก็จะทำให้เห็นถึงความสำคัญของตัวแปรแต่ละตัวที่มีผลต่อสัญญาณ จากปัจจัยทั้งภายนอกและภายใน
- 3.2 ส่วนของการทดลอง เราได้ใช้การตั้งสมมุติฐานของการ โคลนนิ่งสัญญาณขึ้นมา ดังนั้นทดลอง เพื่อหาค่าว่าเป็นไปตามทฤษฎีหรือไม่ ถ้าเป็นไปตามแล้ว เป็นแบบใด และคุณสมบัติของสัญญาณที่ได้นั้นเหมือนกันหรือไม่
- 3.3 ส่วนของผลและการสรุป จะเป็นส่วนที่รวบรวมผลการทดลองและข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการ สร้างเครื่องทดสอบ เพื่อนำมาสรุปผลกับโครงการพิเศษชิ้นนี้

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินงาน

กิจกรรม	มิย.-สค.48	กย.-คค.48	พย.-ธค.48	มค.-กพ.49	มีค.-เมย.49
1. ศึกษาทฤษฎี	←→				
2. คิดตั้งเครื่องมือ		←→			
3. ทดสอบเครื่องมือ ในห้องวิจัยและทดลอง			←→		
4. สรุปผลการทดลอง และเขียนรายงาน				←→	

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 5.1 ความรู้เกี่ยวกับการเชื่อมต่อสัญญาณทางแสง
- 5.2 ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของสัญญาณแสงโพลาริซได้
- 5.3 สามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้กับงานด้านสื่อสารทางแสงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

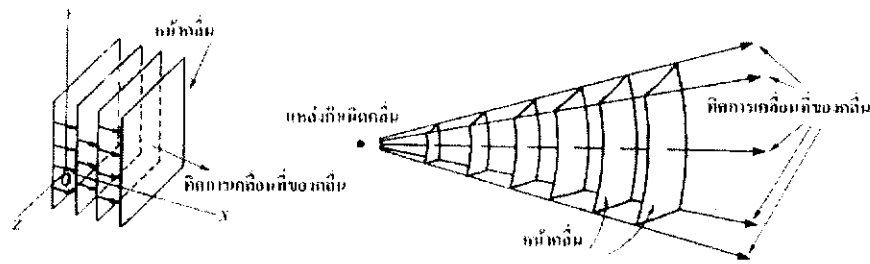
2.1 ธรรมชาติของแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประเภทหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ผ่านสุญญากาศด้วยความเร็วเท่ากับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่นคือ 3×10^8 เมตร/วินาที และมีสมบัติเหมือนกับคลื่นตามขวางทั่วไปคือมีการสะท้อน (reflection) การหักเห (refraction) การเลี้ยวเบน (diffraction) การแทรกสอด (interference) และโพลาไรเซชัน (polarization)

ในความคิดของนักวิทยาศาสตร์ปัจจุบันเชื่อว่าแสงมีสมบัติเป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาค แสงประพฤติกรรมเป็นคลื่นพบได้ในปรากฏการณ์การแทรกสอดของยัง (Young) ทฤษฎีหน้าคลื่นของฮอยเกนส์ใช้อธิบายการสะท้อนและการหักเห สมบัติความเป็นคลื่นของแสงใช้อธิบายการทดลองการเลี้ยวเบนของฟรอนเนล (Fresnel) แต่สมบัติความเป็นคลื่นไม่สามารถนำไปใช้อธิบายการเกิดอิเล็กตรอนอิสระบนผิวโลหะเมื่อแสงตกกระทบ ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์คอมป์ตัน และไม่สามารถอธิบายการแผ่รังสีของวัตถุดำได้ครบสมบูรณ์

ปรากฏการณ์เหล่านี้ต้องใช้สมบัติความเป็นอนุภาคของแสงอธิบายโดยตั้งสมมุติฐานว่าแสงเป็นอนุภาคไร้มวลเรียกว่า โฟตอน พลังงานของโฟตอน ϵ ตัวมีค่าเท่ากับ hf เมื่อ h คือค่าคงที่ของพลังค์ (planck's constant) มีค่าเท่ากับ 6.63×10^{-34} จูลวินาที และ f เป็นความถี่ของแสง สมมุติฐานที่ให้แสงเป็นอนุภาคสามารถอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่กล่าวมาได้ทั้งหมด สมบัติความเป็นคลื่นของแสงคลื่นแสงขบวนหนึ่งๆ เราสามารถแทนด้วยเส้นตรงในแนวทิศการเคลื่อนที่เรียกเส้นนี้ว่า รังสี (ray) ของแสง รังสีของแสงจะตั้งฉากกับหน้าคลื่น (wavefront) ของแสง

การหาหน้าคลื่นใหม่ของแสงสามารถทำได้โดยวิธีทางเรขาคณิตเรียกว่า หลักของ ฮอยเกนส์ (Huygen's principle) กล่าวว่าทุกๆ จุดบนหน้าคลื่นถือว่าเป็นต้นกำเนิดคลื่นทุติยภูมิ (secondary wave) ที่แผ่ออกไปด้วยความเร็วเท่าเดิมในตัวกลางเดิม เส้นสัมผัสที่ลากผ่านตำแหน่งเหล่านี้เป็นหน้าคลื่นใหม่



- รูปที่ 20 (ก) การสร้างหน้าคลื่นใหม่ของคลื่นระนาบ
(ข) การสร้างหน้าคลื่นใหม่ของคลื่นแบบทรงกลม

2.2 คุณสมบัติพื้นฐานของแสง

แสงมีคุณสมบัติเป็นทั้ง “คลื่น” (wave) และ “อนุภาค” (particle) ปรากฏการณ์ที่เราพบเห็นในชีวิตประจำวัน เช่น การสะท้อนแสง (reflection) การแทรกสอดของแสง (interference) และการหักเหของแสง (Refraction) แสดงให้เห็นว่าแสงมีคุณสมบัติเป็นคลื่น ส่วนปรากฏการณ์ที่แสดงให้เห็นหรืออธิบายได้ว่าแสงเป็นอนุภาคได้แก่ การส่องแสงเข้าสู่ผิวโลหะ แล้วทำให้อิเล็กตรอนกระเด็นหลุดออกสู่อวกาศ ซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก หรือการเพิ่มขึ้นของค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเมื่อถูกแสงหรือการเปล่งแสงของไดโอดเปล่งแสง เป็นต้น

2.2.1 การเป็นคลื่นของแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ถ้าให้ λ คือ ความยาวคลื่นแสง ν คือ ความถี่ และ C_0 คือ ความเร็วของแสงที่เดินทางในสุญญากาศ ($C_0 = 2.99792458 \times 10^8$ m/s) จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\lambda = \frac{C_0}{\nu} \quad (2.1)$$

ประมาณ 400-700 nm แสงมองเห็นนี้สเปกตรัมแสงมีการแบ่งเป็นแสงสีต่างๆ ได้แก่ แสงสีม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง ส้ม แดง ในจำนวนแสงสีต่างๆ เหล่านี้ สีที่ตามนุษย์มีความไว (visible) มากที่สุดคือ แสงสีเขียว

ถ้าแสงเดินทางในวัสดุที่มีเนื้อราบเรียบตลอดและเป็นไอโซทรอปี (isotropy) แสงจะเดินทางเป็นเส้นตรง แต่ถ้าแสงเดินทางจากวัสดุหนึ่งไปสู่วัสดุอีกชนิดหนึ่ง ที่พรมแดนของวัสดุทั้งสองนั้น จะหักเหหรือสะท้อนกลับได้ การเดินทางของแสงในวัสดุที่มีดัชนีหักเหแสงเท่ากับ n จะทำให้ความเร็วของแสงช้ากว่าในสุญญากาศ กล่าวคือ ความเร็วแสง C ในวัสดุจะเท่ากับ

$$c = \frac{c_0}{n} \quad (2.2)$$

ค่าดัชนีหักเหแสง n ของวัสดุใดๆ จะขึ้นกับความยาวคลื่นหรือความถี่ของแสงด้วย และค่า n นี้ มีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวไดอิเล็กทริก ϵ ของวัสดุ(dielectric constant) ดังนี้

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} \quad (2.3)$$

โดยที่ ϵ_0 คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ = $8.85418782 \times 10^{-12}$ F/m

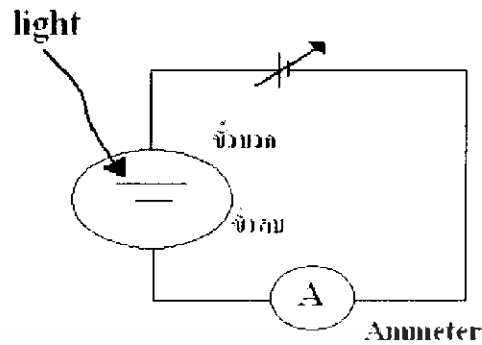
2.2.2 การเป็นอนุภาคของแสง

แสงนอกจากมีคุณสมบัติเป็นคลื่นแล้วยังมีคุณสมบัติเป็นอนุภาคด้วย เราเรียกอนุภาคแสงว่า โฟตอน(photon) อนุภาคแสงมีพลังงานอยู่ภายใน และถ้าแสงมีความถี่เท่ากับ อนุภาคแสงหนึ่งตัว จะมีพลังงานเท่ากับ

$$h\nu \quad (\text{หน่วย electronvolt : ย่อว่า eV})$$

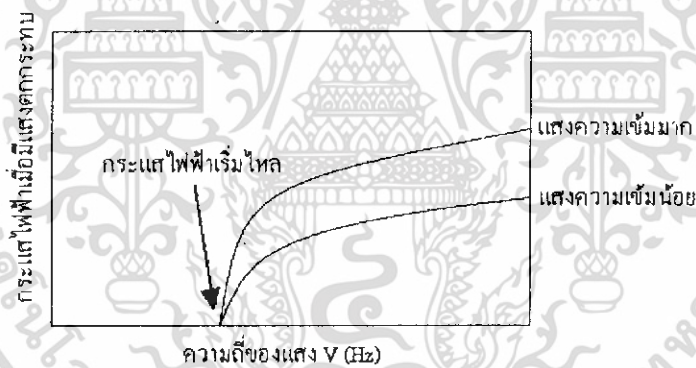
โดยที่ h คือค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant) = 6.626176×10^{-34} (J.s)

ตัวอย่างปรากฏการณ์หนึ่งซึ่งแสดงว่าแสงเป็นอนุภาค เช่น ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการส่องแสงลงบนผิวของโลหะที่วางอยู่ในสุญญากาศแล้วทำให้อิเล็กตรอนที่ผิวโลหะกระเด็นหลุดออกจากที่ผิวของโลหะ ดังแสดงวิธีทดลองในรูป 2.2.1



รูปที่ 2.1 วงจรแสดงการนำกระแสออกมาจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

ในรูปที่ 2.1 ในหลอดสุญญากาศมีแผ่นขั้วไฟฟ้าบวกและลบบรรจุอยู่ และขั้วไฟฟ้าเหล่านี้ถูกต่อออกไปสู่วงจรภายนอกซึ่งมีแบตเตอรี่ไบแอสอยู่ เมื่อส่องแสงลงบนขั้วไฟฟ้าลบจะพบว่าถ้าแสงมีความถี่สูงกว่าค่าหนึ่งจะทำให้มีกระแสไหลในวงจร แต่ถ้าแสงมีความถี่ต่ำเกินไปก็จะมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความถี่ของแสงในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก
กระแสไฟฟ้าจะเริ่มไหลเมื่อความถี่ของแสงสูงกว่าค่าหนึ่ง

ในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกดังกล่าว บางข้อไม่สามารถให้เหตุผลอธิบายได้ด้วยทฤษฎีการเป็นคลื่นของแสง แต่สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีการเป็นอนุภาคของแสงซึ่งตั้งโดยไอน์สไตน์ ปรากฏการณ์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งซึ่งแสดงให้เห็นชัดว่าแสงนั้นมีคุณสมบัติเป็นอนุภาคด้วยคือปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton effect) ซึ่งค้นพบโดยคอมป์ตัน ใน ค.ศ. 1923 ปรากฏการณ์คอมป์ตันเป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวกับการกระเจิงรังสีเอ็กซ์ (X-ray scattering) เมื่อเรายิงรังสีเอ็กซ์เข้า

ตัววัสดุ รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นมากและสามารถวิ่งทะลุผ่านวัตถุได้ง่าย แม้กระนั้นเองก็ตามในขณะที่รังสีเอกซ์กำลังเคลื่อนที่ผ่านภายในวัตถุจะถูกวัสดุดูดกลืนบ้าง และถูกกระเจิงบ้าง ถ้าเราฉายรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นเท่าเดิมและรังสีที่มีความยาวคลื่นที่ยาวกว่าเดิม

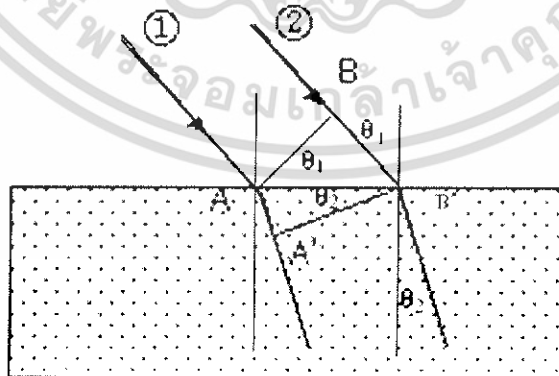
2.1.3 การกระเจิงของแสง(Scattering)

การกระเจิงของรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นเท่าเดิมนั้นถูกศึกษาโดยทอมสัน(Thomson) เรียกว่าการกระเจิงชนิดทอมสัน (Thomson scattering) เขาสามารถอธิบายปรากฏการณ์นี้ได้ด้วยปรากฏการณ์นี้ได้ด้วยทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเดิม แต่เขาไม่สามารถอธิบายการกระเจิงของรังสีเอกซ์ในกรณีที่ทำให้เกิดรังสีที่มีความยาวคลื่นยาวกว่าเดิมได้สำเร็จและเรียกว่า ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton effect)

ปรากฏการณ์คอมป์ตันสามารถอธิบายได้ดังนี้ เริ่มแรกเราจะพิจารณาว่าอนุภาครังสีเอกซ์ที่ยิงเข้าวัตถุนั้นจะวิ่งไปชนกับอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในวัตถุนั้น ทำให้อิเล็กตรอนถูกชนและอิเล็กตรอนกระเด็นไปไปในทิศทางที่ต่างจากทิศทางที่รังสีเอกซ์ตกกระทบวัตถุ ดังนั้นทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาครังสีเอกซ์จึงเปลี่ยนไปด้วยและโมเมนตัมก็เปลี่ยนไปด้วย แต่ในขณะเดียวกันจะต้องรักษากฎของการอนุรักษ์พลังงานด้วย ดังนั้นพลังงานส่วนที่ลดลงของอนุภาครังสีเอกซ์จะเท่ากับพลังงานส่วนที่เพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอน นั่นคือ ถ้าให้ $h\nu$ เป็นพลังงานของอนุภาครังสีเอกซ์ ความถี่ ν ของรังสีเอกซ์นั้นจะลดลง ดังนั้นความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์จึงยาวขึ้นนั่นเอง

2.2.4 การหักเหและการสะท้อนของแสง

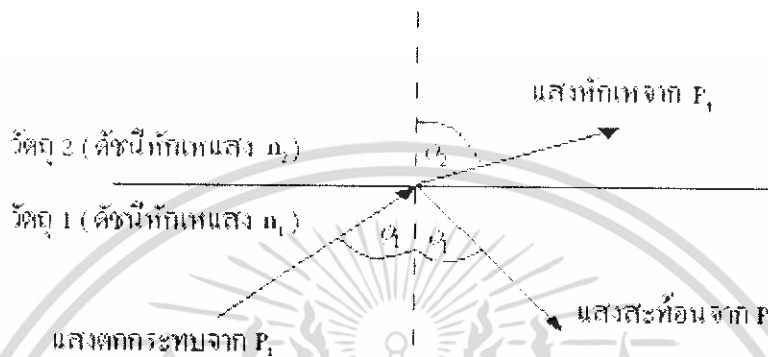
เมื่อแสงเดินทางจากวัตถุหนึ่งไปอีกวัตถุอีกชนิดหนึ่ง ที่บริเวณพรมแดนของวัตถุทั้งสองแสงบางส่วนจะสะท้อนกลับ (reflect) และแสงบางส่วนจะหักเห (refract) และแสงบางส่วนจะวิ่งเข้าสู่วัตถุที่สอง ในรูปที่ 2.1.3 ถ้าให้ ϕ_1 คือ มุมแสงตกกระทบ ϕ_2 คือมุมหักเห n_1 ดัชนีหักเหแสงของวัตถุที่หนึ่ง และ n_2 ดัชนีหักเหแสงของวัตถุที่สอง



รูปที่ 2.3 การหักเหเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นไม่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารังสี 2 เส้น เส้น 1 และ 2 รังสี 1 จะตกกระทบที่ผิวรอยต่อตรงจุด A ขณะที่ รังสี 2 วกมาถึงจุด B ขณะที่ รังสี 2 ตกกระทบผิวรอยต่อที่จุด B' รังสี 1 จะเคลื่อนมาถึงจุด A' แสง ใช้เวลา Δt เท่ากันในการเดินทางจาก A ถึง A' และจาก B ถึง B' แต่ระยะ AA' น้อยกว่า BB' (เพราะแสงมีความเร็วเปลี่ยนไป)



รูปที่ 2.4 การหักเหและการสะท้อนของแสงที่พรมแดนระหว่างวัตถุ 2 ชนิด ในรูปนี้ $n_1 > n_2$

เราจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\sin \phi_2 / \sin \phi_1 = n_1 / n_2 \quad (2.4)$$

ความสัมพันธ์นี้เรียกว่า กฎของเฟรสเนล (Frenel's Law)

ต่อไปเราจะพิจารณาเกี่ยวกับพลังงานของแสง ถ้าให้ P_i คือ กำลังของแสงวิ่งทะลุ (power of transmitted light) ให้ P_r คือ กำลังของแสงสะท้อนกลับ (power of reflection light) และ P_i คือ กำลังของแสงที่ตกกระทบ (power of incident light) จะได้ว่า

$$P_i = P_t + P_r \quad (2.5)$$

นิยามของสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง คือ $T = P_t / P_i$

นิยามของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสง คือ $R = P_r / P_i$

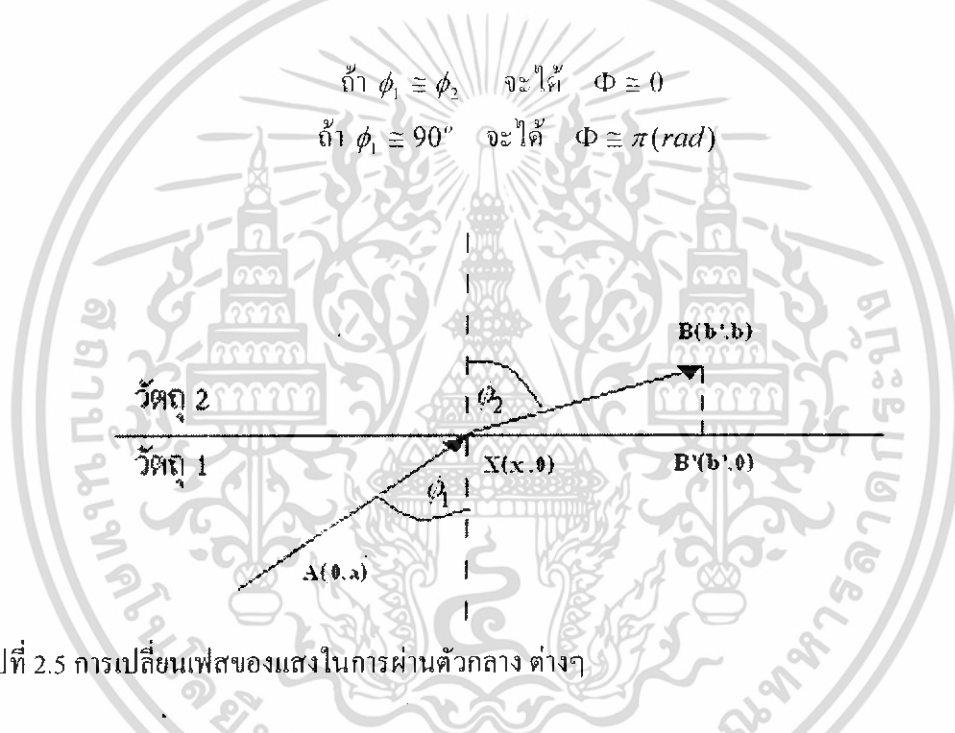
และ $T + R = 1$

จากการคำนวณโดยละเอียด พบว่าถ้าวัตถุทั้งสองชนิดมีเงื่อนไขดัชนีหักเหแสงว่า $n_1 < n_2$ และมุมแสงตกกระทบบมีค่า $0 < \phi_1 < 90^\circ$ จะไม่สามารถทำให้ มีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือ ไม่สามารถ ทำให้ R มีค่าเป็นหนึ่ง นั่นคือจะไม่เกิดการสะท้อนกลับอย่างสมบูรณ์

แต่ถ้าวัตถุทั้งสองชนิดมีเงื่อนไขดัชนีหักเหแสงว่า $n_1 > n_2$ และมุมแสงตกกระทบบมีค่า ϕ_c จะสามารถทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดอย่างสมบูรณ์ได้ โดยที่ มีนิยามดังนี้

$$\sin \phi_c = n_2 / n_1 \quad (2.6)$$

นอกจากนี้จากกฎของ Goos-Hunche Shift มีการพบว่า เฟสของแสงสะท้อนอาจเปลี่ยนแปลงไปจากเฟสของแสงตกกระทบบ ถ้าให้ ปริมาณของเฟสที่เปลี่ยนแปลงจะได้ว่า

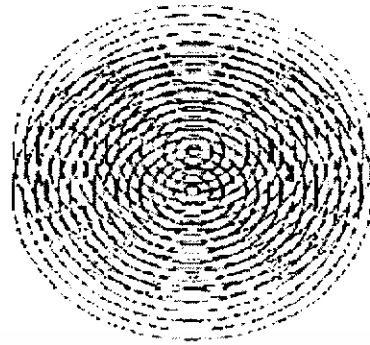
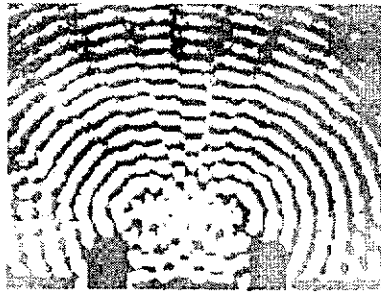


รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนเฟสของแสงในการผ่านตัวกลาง ต่างๆ

2.2.5 การแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสง

2.2.5.1 การแทรกสอดของแสง

เมื่อมีคลื่นที่มีตั้งแต่ 2 คลื่น เคลื่อนที่มาพบกันจะเกิดการรวมกันแบบเสริมและหักล้างซึ่งสังเกตได้จากการเกิดแนวสว่างและแนวมืดของตาคลื่น เราเรียกสมบัติการรวมกันของคลื่นนี้ว่า “การแทรกสอด” (interferometer) และเรียกแนวสว่างและแนวมืดที่เกิดว่า “ลวดลายการแทรกสอดหรือริ้วของการแทรกสอด” ดังรูปที่ 2.2.6 โดยที่มี แหล่งกำเนิดแสงเดียวกันหรือทำกัน



รูปที่ 2.6 แสดงลวดลายการแทรกสอด

เมื่อคลื่นจากแหล่งกำเนิดทั้งสองเคลื่อนมาพบกันจะเกิดการซ้อนทับ (superposition) ซึ่งมีลักษณะ ดังนี้

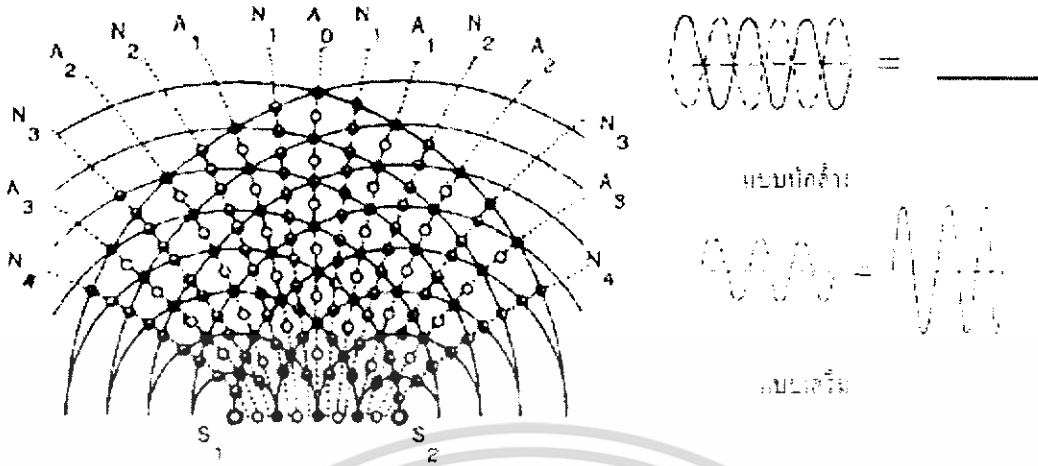
1) การแทรกสอดแบบเสริม (constructive interference)

เกิดขึ้นเมื่อส่วนที่เป็นสันคลื่นพบส่วนที่เป็นสันคลื่น หรือ ส่วนที่เป็นท้องคลื่นพบส่วนที่เป็นท้องคลื่น แอมพลิจูดของคลื่นทั้งสองจะเสริมกันทำให้ผิวน้ำ ณ ตำแหน่งนั้นมีระดับสูงชันมากที่สุดและลดต่ำมากที่สุดตามลำดับ เรียกว่าตำแหน่งนี้ว่า “ปฏิบัพ” (antinode)

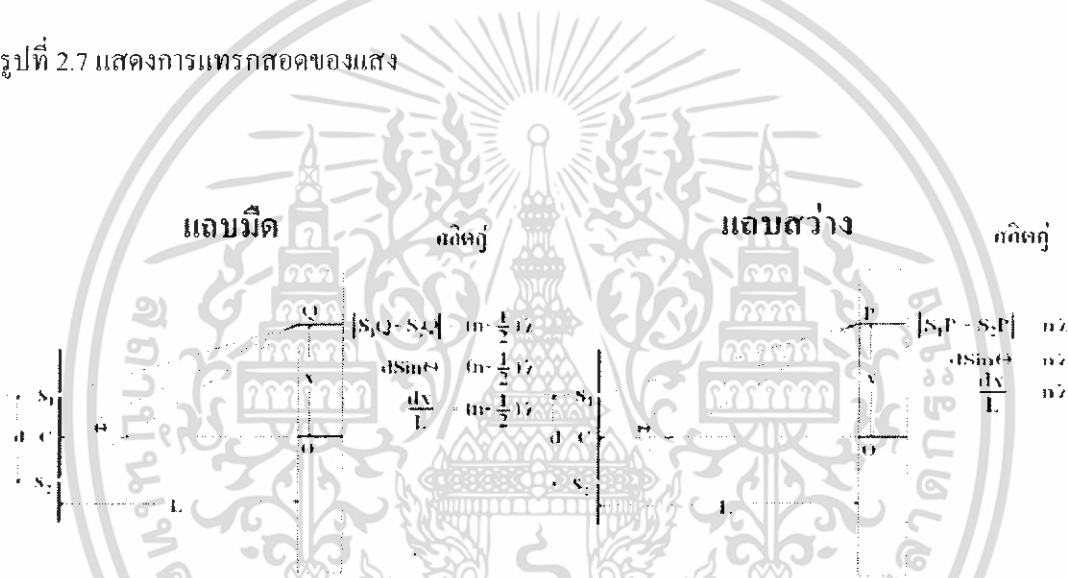
2) การแทรกสอดแบบหักล้าง (destructive interference)

เกิดขึ้นเมื่อส่วนที่เป็นสันคลื่นพบส่วนที่เป็นท้องคลื่น แอมพลิจูดของคลื่นทั้งสองจะหักล้างกันทำให้ ผิวน้ำ ณ ตำแหน่งนั้นไม่กระเพื่อม เรียกว่าตำแหน่งนี้ว่า “บัพ” (node)

คลื่น 2 ขบวนที่มีแหล่งกำเนิดเดียวกัน หรือ แหล่งกำเนิดเท่ากัน จะเกิดบัพและปฏิบัพอย่างต่อเนื่อง และพบว่าเมื่อวางเส้นเชื่อมต่อบัพที่อยู่ติดกันไปได้แนวเส้นที่เรียกว่า เส้นปฏิบัพ ส่วนเส้นที่เชื่อมต่อบัพที่อยู่ติดกันไปได้แนวเส้นที่เรียกว่า เส้นบัพ ทำให้ทราบถึงลวดลายการแทรกสอด



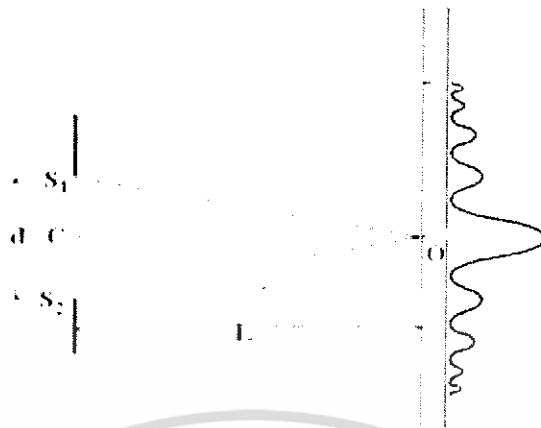
รูปที่ 2.7 แสดงการแทรกสอดของแสง



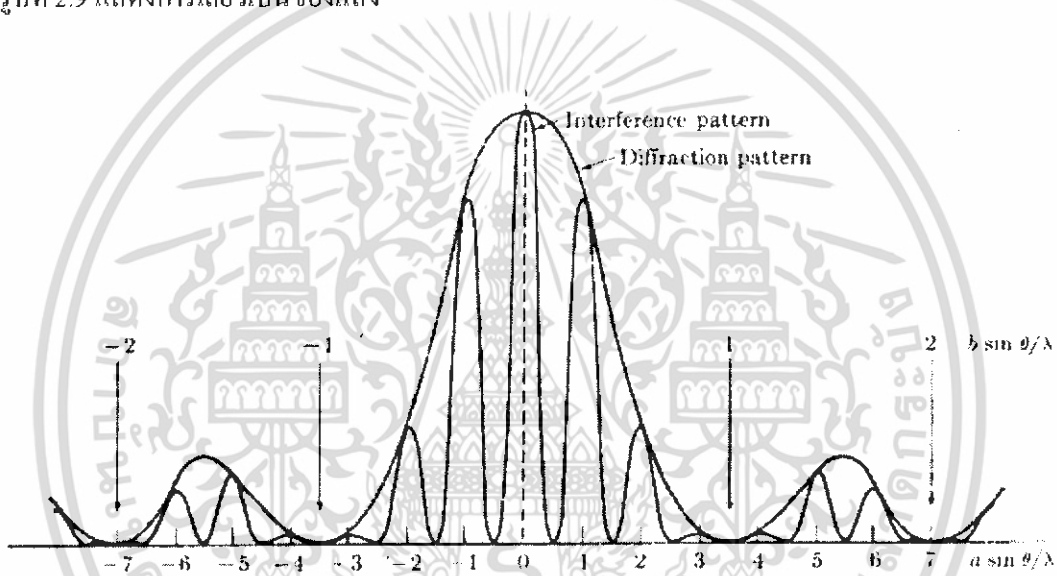
รูปที่ 2.8 แสดงการแทรกสอดของแสง แถบมืด และ แถบสว่าง

2.2.5.2 การเลี้ยวเบนของแสง

แสงแสดงสมบัติของคลื่นคือการเลี้ยวเบน เมื่อแสงผ่านสลิตเดียวจะเกิดการเลี้ยวเบนและการแทรกสอดของแสงเกิดเป็นแถบสว่างและแถบมืดสลับกันเช่นเดียวกับแสงผ่านสลิตคู่ แต่แถบสว่างตรงกลางจะมีขนาดกว้างและ สว่างมากที่สุด แสงผ่านสลิตเดี่ยว ซึ่งกว้าง d แสงจาก S_1 ไปยังจุดกึ่งกลาง O และแสงจาก S_2 ไปยังจุดกึ่งกลาง O มีระยะทางเท่ากันเป็นผลทำให้คลื่นทั้งสองมีเฟสตรงกัน เกิดแถบสว่าง จากจุดกึ่งกลาง C ไปยังแถบมืดถัดไป คลื่นทั้งสองมีเฟสต่างกัน $\lambda/2$ เกิดแถบมืด ดังรูป 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของแสง



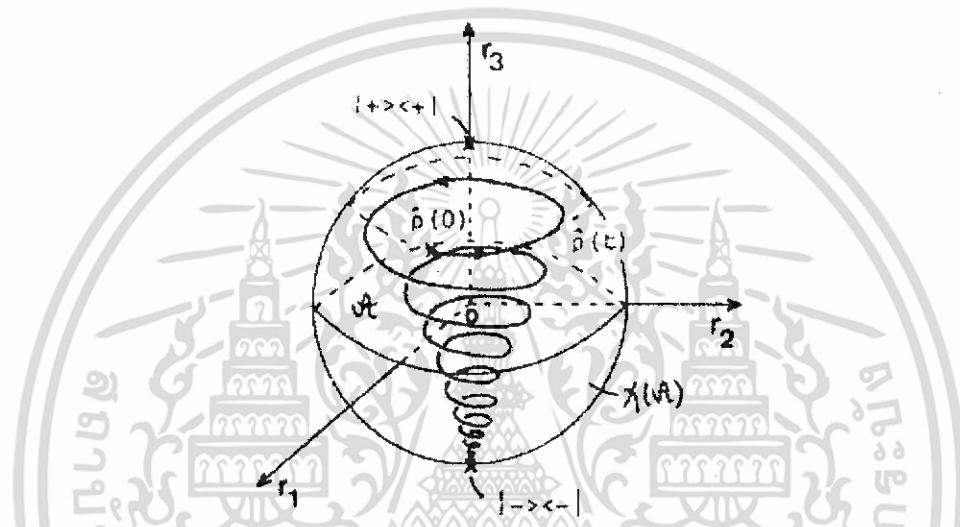
รูปที่ 2.10 แสดงการแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสง

2.2.6 โพล่าไรเซชัน (Polarization)

แสงที่เป็นคลื่นระนาบ และมีทิศของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงหรือสั่นในแนวคงที่แนวหนึ่ง เรียกว่า เป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นหรือเรียกว่ามีสมบัติโพลาไรซ์เชิงเส้น (linearly polarized light) สมบัติทางโพลาไรซ์เชิงเส้นของแสงมีความเกี่ยวข้องกันอย่างมากกับการเป็นคลื่นตามขวาง (transverse wave) กล่าวคือแนวการของสั่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีทิศตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น จึงอาจกล่าวได้ว่าโพลาไรเซชันของแสงเป็นการพิสูจน์ว่าแสงเป็นคลื่นตามขวาง

2.3 ควอนตัม (Quantum)

มีความหมายที่หลากหลาย ขึ้นอยู่กับสิ่งหรือระบบที่เกี่ยวข้อง ดังเช่น Quantized State, Quantization ของปริมาณทางกายภาพของอนุภาค เช่น Quantization ของประจุไฟฟ้า แต่ทั้งหมดล้วนแต่ใช้ในความหมายเกี่ยวข้องกับทฤษฎีควอนตัม (Quantum Theory) หรือกลศาสตร์ควอนตัม (Quantum Mechanics) ซึ่งมีหลักการร่วมพื้นฐานสำคัญที่สุด คือ สภาพหรือกระบวนการต่างๆ ดังเช่นที่เกี่ยวข้องกับพลังงาน ล้วนมีสภาพเป็นแบบควอนตัม คือ เป็นท่อน เป็นกลุ่ม ไม่ใช่เป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous) ดังเช่นฟิสิกส์ยุคเก่าของนิวตัน



รูปที่ 2.11 สภาพการเคลื่อนที่แบบควอนตัม

สำหรับพลังงานควอนตัม (Quantum Energy) ที่จะเห็นหรือเข้าใจได้ง่าย คือ การรับและการปลดปล่อยพลังงานของวัตถุหรือของอะตอมที่จะต้องรับหรือปลดปล่อยออกมาเป็นควอนตัมคือ เป็นก้อน ไม่ใช่เป็นแบบต่อเนื่อง ดังเช่นกรณีการเกิดพลังงานแสงในรูปของเลเซอร์ เมื่ออะตอมของวัตถุที่จะเป็นตัวปลดปล่อยพลังงานออกมาเป็นเลเซอร์เช่น ผลึกทับทิมได้รับพลังงานกระตุ้นจากภายนอกในรูปของโฟตอน อิเล็กตรอนของอะตอมของทับทิมจะรับพลังงานโฟตอนจากภายนอก ทำให้อิเล็กตรอนกระโดดจากตำแหน่งหนึ่งในอะตอมขึ้นไปอยู่ในอีกตำแหน่งหนึ่งที่มีระดับพลังงานสูงขึ้น เมื่อขึ้นไปอยู่ในตำแหน่งที่มีระดับพลังงานสูงขึ้นแล้ว อิเล็กตรอนก็อยากจะกระโดดกลับไปยัง ณ ตำแหน่งที่มีระดับพลังงานต่ำกว่า ซึ่งเป็นธรรมชาติของอิเล็กตรอนในอะตอมเอง ในการกระโดดกลับไปยังตำแหน่งที่มีระดับพลังงานต่ำกว่า อิเล็กตรอนต้องปล่อยพลังงานออกจากอะตอม เป็นปริมาณเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงานของอะตอม แล้วพลังงานที่ถูก

ปลดปล่อยออกมา นี้จะเป็นโฟตอนหรือเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีพลังงานเป็นแบบควอนตัม คือมีพลังงานควอนตัมเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานควอนตัมของอิเล็กตรอนทั้งสองตำแหน่งนั่นเอง

ถ้าจะอธิบายให้เห็นกระบวนการง่ายขึ้น อาจนึกภาพอะตอมของทับทิม มีอิเล็กตรอนโคจรรอบในวิถีโคจร (แบบควอนตัม) เป็นชั้นๆ รอบนิวเคลียส โดยปกติอิเล็กตรอนจะพยายามอยู่ในชั้นใกล้นิวเคลียสมากที่สุด เพราะเป็นชั้นอิเล็กตรอนมีระดับพลังงาน (ควอนตัม) ต่ำกว่าชั้นที่อยู่ห่างไกลจากนิวเคลียสออกไป แต่เมื่ออะตอมของทับทิมได้รับพลังงานโฟตอนจากภายนอก ผลคืออิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรรอบนิวเคลียสชั้นใกล้นิวเคลียสจะเป็นตัวรับโฟตอน ทำให้มีพลังงานเพิ่มมากขึ้นจึงกระโดดจากวงโคจรชั้นเดิมขึ้นไปอยู่ในวงโคจรชั้นนอกออกไป แต่เมื่อออกไปแล้วโดยธรรมชาติของอิเล็กตรอน ก็จะอยากกลับไปอยู่ที่ตำแหน่งเดิมหรือตำแหน่งใหม่ ในวงโคจรใกล้นิวเคลียสกว่าที่ยังว่างอยู่ และเมื่อมีวิถีโคจรที่ว่างจริง อิเล็กตรอนก็จะกระโดดกลับลงไปอยู่ในวิถีโคจรใกล้นิวเคลียส แต่ในการกระโดดกลับเข้าไปอยู่ในวงโคจรชั้นนี้ อิเล็กตรอนจะต้องปล่อยพลังงานออกมา เป็นปริมาณเท่ากับผลต่างระหว่างระดับพลังงานทั้งสองที่เกี่ยวข้อง พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมา คือโฟตอน จึงมีพลังงานที่แน่นอนหรือเป็นพลังงานควอนตัมในรูปของโฟตอน มีความถี่ที่แน่นอน จึงทำให้นักวิทยาศาสตร์สามารถเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการสร้างเครื่องกำเนิดเลเซอร์

ประโยชน์ของควอนตัมกับพลังงานควอนตัมในปัจจุบัน มีมากมาย และเป็นหัวใจสำคัญของเทคโนโลยีแปลกใหม่ที่คนทั่วโลกได้ใช้ประโยชน์กัน โดยไม่ต้องเข้าไปสัมผัสหรือรับรู้กระบวนการในระดับควอนตัม หรือพลังงานควอนตัม

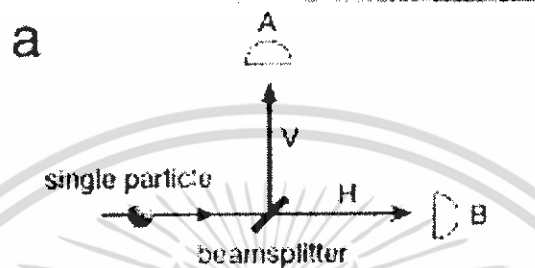
ใน quantum mechanics มีปรากฏการณ์อยู่สองอย่างที่น่าสนใจและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งเราจะพบคำเหล่านี้บ่อยๆ นั่นก็คือ "coherent superposition" และ "entanglement"

2.3.1 ปรากฏการณ์ทางควอนตัม

2.3.1.1 Coherent superposition

สามารถสังเกตได้จากการทดลองนี้ โดยเอา beamsplitter วางทำมุม 45 องศากับเครื่องยิงอนุภาคโฟตอน (photon - อนุภาคของแสง) แล้วก็เอา photodetector วางไว้ที่มุมสะท้อนของ beamsplitter อันนี้ (A) และหลัง beamsplitter อันนี้ (B) โดย A และ B มีระยะห่างจากจุดตกกระทบเท่ากัน ตัวbeamsplitter จะยอมให้แสงผ่านได้ 50% และสะท้อนแสง 50% การทดลองนี้จะยิง photon ทีละตัวให้ไปตกกระทบที่ beamsplitter โฟตอนแต่ละอนุภาคมี โอกาสสะท้อนแล้วไปปรากฏที่ A 50% หรืออาจจะทะลุไปปรากฏที่ B 50% ดังนั้นในการยิง photon หนึ่งตัว มันก็ควรจะ

สะท้อนไปปรากฏที่ detector A "หรือ" ทะลุกระจกไปปรากฏที่ B อันใดอันหนึ่ง..... แต่ผลปรากฏว่า สิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้คือโฟตอน "หนึ่ง" ตัวนั้นวิ่งไปทั้ง "สอง" ทาง - ทั้งสะท้อนและทะลุกระจก - ไปปรากฏทั้งที่ A และ B ในเวลาเดียวกัน ซึ่งก็แปลว่าอนุภาคตัวเดียวสามารถปรากฏตัวได้สองตำแหน่งในเวลาเดียวกัน ซึ่งอันที่จริงจะมีการทดลองอีกสองแบบต่อจากนี้ที่ยืนยันผลว่าโฟตอนตัวเดียวสามารถปรากฏตัวได้สองตำแหน่งในเวลาเดียวกันจริงๆ



รูปที่ 2.12 แสดง single particle ปรากฏตัวได้สองตำแหน่งในเวลาเดียวกัน

2.3.1.2 Entanglement

พบครั้งแรกใน EPR Experiment ปี 1935 การทดลองนี้ทำขึ้นโดย อัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ บอริส โปโดลสกี และ นาธาน โรเซน (Albert Einstein, Boris Podolsky, และ Nathan Rosen) เพื่อจะหาตำแหน่งและวัด สปินของอนุภาคในขณะเวลาหนึ่ง .. ปัญหาก็คือการจะวัดค่าทั้งสองค่าได้เที่ยงตรง ไม่สามารถทำได้เนื่องจากหลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก (ยิ่งวัดค่าหนึ่งได้ถูกต้องเพียงไร ก็จะทำให้วัดอีกค่าได้ผิดพลาดมากขึ้น) ไอน์สไตน์ก็เลยหาทางเลี่ยงโดยใช้อนุภาคสองตัว สมมติเป็น A กับ B ซึ่งมีขนาดเท่ากัน แต่มี spin ตรงกันข้าม เอา A กับ B ยิงสวนกันด้วยความเร็วเท่ากัน (ความเร็วแสง) ทั้งสามเชื่อว่าวิธีนี้ทำให้วัดตำแหน่งของ A โดยตรงได้ แต่หลังจากวัดตำแหน่งของ A แล้วผลกระทบจากการวัดตำแหน่งจะทำให้ไม่สามารถวัดสปินได้ถูกต้องตามหลักความไม่แน่นอน จึงใช้วิธีวัด spin ของ B เพื่อหาการเปลี่ยนแปลง moment มาคำนวณหา spin ของ A อีกที.. .. ซึ่งปรากฏว่า ERP Experiment เป็นการทดลองที่ล้มเหลว หลักของไฮเซนเบิร์ก ยังคงใช้ได้แม้แต่ในระดับอนุภาค ซึ่งตรงกับที่ทฤษฎีควอนตัมสมัยนั้นทำนายผลของ EPR Experiment เอาไว้ว่า "ผลกระทบจากการวัดค่าที่ A จะเกิดขึ้นกับ B ด้วย แม้ว่า A กับ B จะอยู่ห่างกันไกลเท่าไหนก็ตาม" จะพูดอีกอย่างก็คืออะไรที่เกิดขึ้นกับ A ก็จะเกิดกับ B ในลักษณะเดียวกัน ตรงนี้เองที่ทำให้ ไอน์สไตน์ถกเถียงกับ นีล บอห์ร (Neil Bohr) ว่าทฤษฎี quantum ไม่สมบูรณ์ เนื่องจาก การที่ผลของ A จะมีกับ B ได้แสดงว่าจะต้องมี "information" หรือสัญญาณ หรือแรงบางอย่างที่ส่งระหว่าง A กับ B แต่อนุภาค A กับ B กำบังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสงอย่างห่างจากกัน ดังนั้นไม่ว่าคือที่เชื่อม

ระหว่าง A กับ B นั้นจะเป็นอะไร มันต้องเดินทางด้วยความเร็วมากกว่าแสงซึ่งเป็นไปได้ตาม ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ .. การทดลองนี้ใช้เวลาหลายปีกว่าจะได้ผลสรุปว่า ทฤษฎีควอนตัม สมบูรณ์และถูกต้องแล้ว แม้ว่าทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษจะใช้อธิบาย EPR Experiment ไม่ได้แต่ก็ ยังคงถูกต้องสมบูรณ์เช่นกัน ซึ่งการทดลองนี้ทำให้เห็นว่าอนุภาคสองอันถ้าเตรียมถูกวิธีจะทำให้มัน มี "Entanglement" - อนุภาคสองตัวมีอะไรบางอย่างเป็นตัวผูกมันไว้ด้วยกัน แม้ว่าจะอยู่ห่างกันถึง ไหนก็ตามสิ่งที่เกิดกับอนุภาคหนึ่งจะไปปรากฏกับคู่ของมันด้วย.. เราเรียกคู่อนุภาคนี้นี้ว่ามันเกิด "quantum mechanically entangled" ระหว่างกัน .. การทดลองในปัจจุบันสามารถสร้าง entanglement ระหว่างอนุภาคในระยะราว 20 km

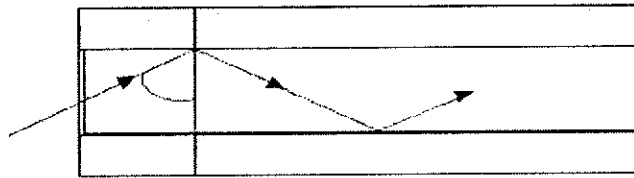


รูปที่ 2.13 คู่อนุภาค "quantum mechanically entangled"

ซึ่งข้อจำกัดที่ว่าการส่งกลุ่มรหัสควอนตัมจะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า จะต้องไม่ถูกรบกวน จากสภาวะที่ไม่เหมาะสม นั้นหมายถึงการส่งสัญญาณทางอากาศจะเป็นไปไม่ได้เลยเพราะมีโอกาส ที่โมเลกุลของอากาศจะเปลี่ยนสภาวะควอนตัมของข้อมูลไป ด้วยข้อจำกัดนี้ทำให้สามารถใช้การ เข้ารหัสควอนตัมได้เฉพาะในสายไฟเบอร์ออปติกเท่านั้น และก็ได้ในระยะทางสั้นๆ อีกด้วย มีความพยายามใช้ตัวขยายสัญญาณเพื่อให้ข้อมูลเดินทางไปได้ในระยะไกลๆ แต่การกระทำดังกล่าวก็ ถือเป็น การรบกวนสถานะทางควอนตัมของรหัสอีก

2.4 เส้นใยนำแสง

เส้นใยนำแสงเป็นสายที่มีขนาดเล็กมากทำจากแก้ว ประกอบด้วยคอร์ และแคลดดิ้ง สายแบบ มัลติโหมด (Multimode) จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์ประมาณ 50 ไมโครเมตร หุ้มโดยรอบ ด้วยแคลดดิ้ง ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 125 ไมโครเมตร



รูปที่ 2.16 การเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสง

แสงจะเดินทางอยู่ในคอร์ของเส้นใยนำแสง เพื่อให้แน่ใจว่าแสงจะเดินทางอยู่ภายในคอร์แน่นอน ค่าดัชนีการหักเหของแสงของคอร์จะสูงกว่าแคลคดิ่งเล็กน้อย ในทางปฏิบัติ $n_{cladding}$ 0.99 n_{core} นั้นคือมีความแตกต่างกันประมาณ 1%

จากรูปที่ 2.10 ค่าดัชนีการหักเหของแสงในคอร์เท่ากับ 1.468 และค่าดัชนีการหักเหของแสงในแคลคดิ่งเท่ากับ 1.453 ดังนั้นค่ามุมวิกฤตที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดเพื่อให้แสงเดินทางอยู่ภายในคอร์สามารถหาได้ดังนี้

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{1.453}{1.468} \right)$$

$$= \sin^{-1} 0.99$$

$$\approx 82^\circ$$

มุมวิกฤตจะประมาณเท่ากับ 82° เมื่อเทียบกับเส้นปกติ หรือประมาณ 82° เมื่อวัดจากรอยต่อของคอร์กับแคลคดิ่ง แสงที่เดินทางมาตกกระทบ ณ จุดนี้จะต้องมีมุมมากกว่ามุมวิกฤตแสงจึงจะเดินทางอยู่ภายในคอร์ และเดินทางจากปลายด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งของเส้นใยนำแสง หากมุมตกกระทบของแสงดังกล่าวน้อยกว่ามุมวิกฤตจะทำให้แสงหักเหเข้าไปสู่แคลคดิ่งแสงเหล่านี้จะถูกดูดซับที่รอยต่อแคลคดิ่ง หรือถูกดูดซับในเนื้อฉนวนที่หุ้มเส้นใยนำแสง (Coating) เอง ซึ่งจะทำให้เกิดการลดทอนสัญญาณ การที่แสงจะเดินทางเข้าสู่คอร์ในมุมที่ถูกต้องจำเป็นที่ต้นกำเนิดแสงส่งแสงออกมาในมุมที่ถูกต้องด้วย

ดัชนีหักเหของแสงที่คอร์เท่ากับ n_1 และแคลคดิ่งเท่ากับ n_2 แสงถูกส่งจากต้นกำเนิดแสงภายนอกผ่านอากาศที่มีค่าดัชนีหักเหของแสง แสงจากต้นกำเนิดตกกระทบปลายเส้นใยนำแสงที่จุด A และทำมุมกับปลายเส้นใยนำแสงเท่ากับ θ_0 แล้วแสงนี้เกิดการหักเหเข้าไปในเส้นใยนำแสงทำมุม θ_1 และตกกระทบรอยต่อของคอร์ และแคลคดิ่งที่จุด B โดยทำมุม θ แล้วเกิดการสะท้อนกลับหมด (มุม θ มากกว่ามุมวิกฤต) พิจารณาที่ D ABC

$$\theta_1 = 90^\circ - \theta \quad (2.5)$$

$$\sin \theta_1 = \sin(90^\circ - \theta)$$

$$\sin \theta_1 = \cos \theta \quad (2.6)$$

จากกฎของไซน์

$$\begin{aligned} \sin \theta_0 &= \frac{n_1 \sin \theta_1}{n_0} \\ &= \frac{n_1 \cos \theta}{n_0} \end{aligned} \quad (2.9)$$

มุม q สูงสุด (q_{\max}) ที่ยังคงทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดจะเท่ากับ q_C แทนค่า $\cos q_C$ เท่ากับ

$$\frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1} \quad (2.10)$$

ลงในสมการ (2.9)

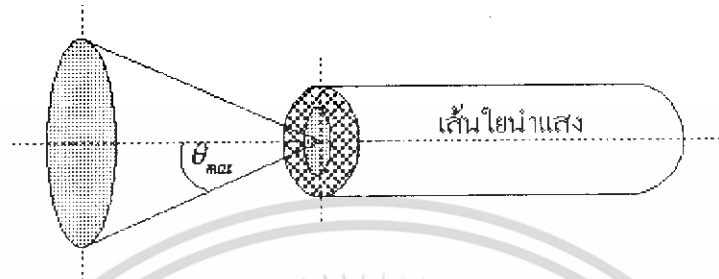
$$\begin{aligned} \sin \theta_{\max} &= \frac{n_1 \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0 n_1} \\ \theta_{\max} &= \sin^{-1} \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0} \end{aligned}$$

เมื่อ n_0 จากอากาศมีค่า = 1

$$\theta_{\max} = \sin^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.11)$$

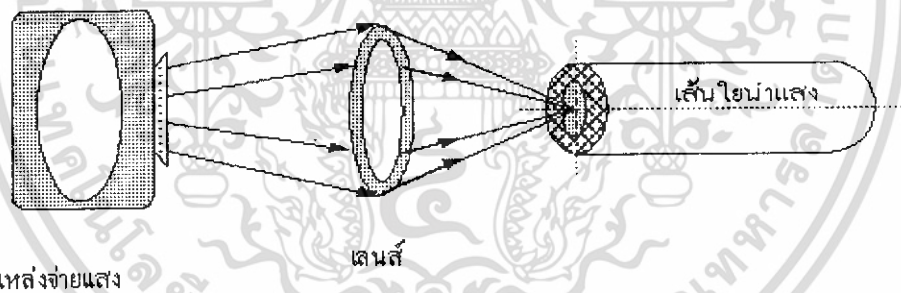
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมสูงสุด (q_{max}) ที่แสงเดินทางจากภายนอกมาตกกระทบผิวหน้าของเส้นใยนำแสง แล้วยังคง ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดของแสงภายในคอร์เรียกว่า "มุมสูงสุดในการป้อนแสง (Acceptance Angle หรือ Acceptance Core Half-Angle)"



รูปที่ 2.17 มุมสูงสุดในการป้อนแสง

ในทางปฏิบัติค่า "มุมสูงสุดในการป้อนแสง" ยิ่งมากขึ้นจะทำให้การนำสัญญาณแสงเข้าสู่เส้นใยนำแสงจะง่ายขึ้น และจะใช้เลนส์เพื่อรวมแสงจากแหล่งกำเนิดเข้าสู่เส้นใยนำแสงตามมุมของ "มุมสูงสุดในการป้อนแสง" ที่กำหนดดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.18 การเชื่อมต่อแหล่งกำเนิดแสงกับเส้นใยแก้วนำแสงผ่านเลนส์

โหมดในการเดินทางของแสง (Propagation Mode) จำนวน โหมดของแสงที่เคลื่อนที่ในเส้นใยนำแสงเป็นเครื่องบ่งชี้ชนิดของเส้นใยนำแสงอย่างหนึ่ง ซึ่งมีอยู่ 2 ชนิด คือ เส้นใยนำแสงชนิดซิงเกิล โหมด และมัลติโหมด องค์ประกอบที่ทำให้จำนวน โหมดของแสงที่เคลื่อนที่ไปในเส้นใยนำแสงมีมากน้อยเพียงใดจะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์ ความแตกต่างระหว่างค่าดัชนีหักเหของแสงบริเวณคอร์ และแคลดดิ้ง และความยาวคลื่นแสง จำนวน โหมดของแสงที่

เคลื่อนที่ไปในเส้นใยนำแสงสามารถคำนวณได้โดยพิจารณาจากค่าความถี่นอร์มอลไลซ์ (Normalized Frequency) ดังนี้

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.12)$$

ที่ a คือ รัศมีของเส้นใยนำแสงมีหน่วยเป็นเมตร

λ คือ ความยาวคลื่นแสงมีหน่วยเป็นเมตร

n_1 คือ ดัชนีหักเหของคอร์

n_2 คือ ดัชนีหักเหของแคลคดิ่ง

โดย ดังนั้นจำนวน โหมดของแสงที่สามารถเคลื่อนที่ไปในเส้นใยนำแสงได้ เป็นดังนี้

$$N = \frac{V^2}{2} \quad (\text{สำหรับเส้นใยนำแสงแบบ SI}) \quad (2.13)$$

$$N = \frac{V^2}{4} \quad (\text{สำหรับเส้นใยนำแสงแบบ GI}) \quad (2.14)$$

สำหรับเส้นใยนำแสงแบบซิงเกิล โหมด ปัจจัยที่ทำให้เส้นใยนำแสงมีสภาพเป็น เส้นใยนำแสง ชนิดซิงเกิล โหมดได้ นอกจากโครงสร้าง และคุณสมบัติของเส้นใยนำแสงยังมีปัจจัย อื่นอีก เช่น ความยาวคลื่นแสงที่ใช้ความยาวคลื่นแสงน้อยสุดซึ่งยังทำให้เส้นใยนำแสงคงสภาพเป็น ซิงเกิล โหมดเรียกว่า ความยาวคลื่นแสงคัทออฟ หาได้จากสมการ 2.15

$$\lambda_c = 3.7 a n_1 \sqrt{\Delta} \quad (2.15)$$

โดยที่ a = รัศมีของคอร์

n_1 = ดัชนีหักเหของแสงที่คอร์

Δ = (ความแตกต่างระหว่างดัชนีหักเหของแสงที่คอร์และแคลคดิ่ง)

2.4.1 ชนิดของเส้นใยนำแสง

การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงสามารถแบ่งได้หลายวิธี คือ ชนิดของสารไดอิเล็กทริกที่ใช้ จำนวนโหมดในการเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสง ลักษณะของดัชนีการหักเห (Refractive Index Profile) ซึ่งแสดงให้ดูดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสง

การแบ่งชนิดตาม	ชนิดของเส้นใยนำแสง
สารไดอิเล็กทริกที่ใช้	1) Silica Glass Fiber
	2) Multi Component Glass Fiber
	3) Plastic Optical Fiber
จำนวนโหมดในการเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสง	1) Single Mode Optical Fiber
	2) Multimode Optical Fiber
ลักษณะของดัชนีการหักเห	1) Step Index Optical Fiber
	2) Graded Index Optical Fiber

2.4.1.1 การแบ่งชนิดตามสารไดอิเล็กทริกที่ใช้

การแบ่งชนิดตามสารไดอิเล็กทริกที่ใช้ สามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิด คือ

- 1) กระจกไฟเบอร์ (Silica Glass Fiber) คือ เส้นใยนำแสงที่สร้างจากแก้วซิลิกาบริสุทธิ์ โดยมีการเติมสารอื่นเจือปนลง ไปเพื่อทำให้เกิดความแตกต่างของดัชนีการหักเหของคอร์ และแคลดดิ้ง ซึ่งสารที่เติมลงไปนี้เรียกว่า โดปเพน (Dopant) ได้แก่ เจอร์มันเนียม (Germanium (Ge)) โบรอน (Boron (B)) และ ฟลูออรีน (Fluorine (F)) เป็นต้น
- 2) มัลติคอมโพเนนทกลาสไฟเบอร์ (Multi Component Glass Fiber) คือ เส้นใยนำแสงที่สร้างจากแก้วหลายๆ ชนิดปนกัน โดยส่วนใหญ่จะใช้สาร โซดาแคลเซียม (Soda Calcium) แก้วที่มีโบรอน และ ซิลิกอน (Silicon) ผสมเป็นสารหลัก สำหรับสารโดปเพน ได้แก่ โซเดียม (Na) และแคลเซียม (Ca) เป็นต้น
- 3) พลาสติกออปติคอลไฟเบอร์ (Plastic Optical Fiber) คือ เส้นใยนำแสงที่สร้างจากพลาสติกซึ่งนิยมใช้สารซิลิกอนเรซิน (Silicon Resin) และเอคริลเรซิน (Acryl Resin)

2.4.1.2 การแบ่งตามจำนวน โหมดในการเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสง

การแบ่งตามจำนวน โหมดในการเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสงสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

- 1) เส้นใยนำแสงชนิดซิงเกิล โหมด (Single Mode Optical Fiber ; SM) เส้นใยนำแสงชนิดนี้ แสงสามารถเคลื่อนที่ไปในเส้นใยนำแสงได้เพียงโหมดเดียว ดังนั้นจึงผลิตเส้นใยนำแสงชนิดนี้เป็นแบบสเต็ปอินเด็กซ์ (Step Index) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์ และแคลดดิ้งแตกต่างกันประมาณ 0.3 ไมครอน

2) เส้นใยนำแสงชนิดมัลติโหมด (Multi Mode ; MM) เส้นใยนำแสงชนิดนี้แสงสามารถเคลื่อนที่ไปในเส้นใยนำแสงได้หลายโหมดเนื่องจากคอร์มีขนาดโตกว่าแบบซิงเกิลโหมด โดยมีดัชนีการหักเหทั้งแบบสเต็ปอินเด็กซ์และเกรดเดอินเด็กซ์ (Graded Index) โดยแบบเกรดเดอินเด็กซ์จะได้รับความนิยมมากกว่าเนื่องจากสามารถลดปัญหาเกี่ยวกับการขยายกว้างออกเนื่องจากโหมด (Modal Dispersion) ลงได้

2.4.1.3 การแบ่งตามลักษณะของดัชนีการหักเห

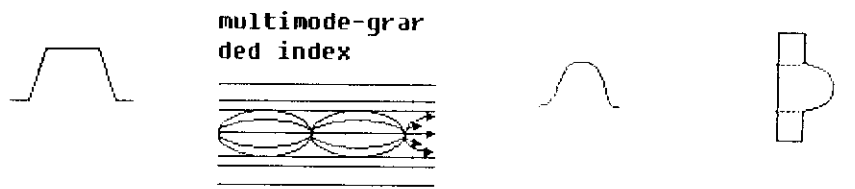
การแบ่งตามลักษณะของดัชนีการหักเหสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1) แบบสเต็ปอินเด็กซ์ (Step Index Optical Fiber ; SI - Fiber) เส้นใยนำแสงที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหแบบขั้นดังตารางที่ 2.3 ดังนั้นจึงเรียกเส้นใยนำแสงชนิดนี้ว่าสเต็ป (Step) เมื่อนำมาใช้งานจะเป็นได้ทั้งซิงเกิลโหมด และมัลติโหมด โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์ที่แตกต่างกัน หากใช้เป็นแบบซิงเกิลโหมดจะมี เส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์ประมาณ 10 ไมโครเมตร แต่หากใช้เป็นมัลติโหมดเส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์ประมาณ 50 ไมโครเมตร อย่างไรก็ตามหากใช้เป็นแบบมัลติโหมดปัญหาที่เกิดขึ้น คือการขยายกว้างออกเนื่องจาก โหมด เนื่องจากแสงมีการเคลื่อนที่หลายเส้นทางแต่ละเส้นทางระยะทางไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงทำให้สัญญาณไปถึงปลายทางไม่พร้อมกันการผิดเพี้ยนของสัญญาณจึงเกิดขึ้น ดังนั้น เส้นใยนำแสงชนิดเกรดเดอินเด็กซ์จึงเกิดขึ้น เพื่อลดปัญหาดังกล่าว

2) แบบเกรดเดอินเด็กซ์ (Graded Index Optical Fiber ; GI - Fiber) เป็นเส้นใยนำแสงที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหที่ค่อยๆ ลดลงทีละน้อย ดังตารางที่ 2.2 เส้นใยนำแสงชนิดนี้ถูกสร้างขึ้นเพื่อลดปัญหาการขยายกว้างออกเนื่องจากโหมด

ตารางที่ 2.2 ลักษณะของดัชนีการหักเหและการเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสง





ค่าดัชนีหักเหของแสงจะค่อยๆ ลดลงจากคอร์ไปหาแคลดคิง เมื่อแสงเดินทางไปในเส้นใยนำแสงชนิดนี้ แสงจะมีการหักเหทีละน้อยภายในคอร์ และมีการสะท้อนบริเวณแคลดคิง การหักเห และการสะท้อนดังกล่าวอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของแสงทีละน้อยนั้น จึงทำให้ดูเหมือนว่าแสงเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้ง เส้นใยนำแสงชนิดนี้ใช้เป็นมัลติโมดเท่านั้น การเคลื่อนที่ของแสงแต่ละเส้นทางจะใช้ระยะเวลาเท่าๆ กัน ถึงแม้ว่าระยะทางจะแตกต่างกันเนื่องจากแสงที่เดินทางสั้นที่สุดผ่านแกนกลางของคอร์จะเคลื่อนที่ได้ช้าที่สุด และทำนองกลับกันแสงที่เดินทางไกลที่สุดซึ่งมีการสะท้อนบริเวณ แคลดคิงจะเคลื่อนที่ได้เร็วที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าดัชนีหักเหของแสงทำให้แสงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างๆ กัน ปัญหาเกี่ยวกับการขยายกว้างออกเนื่องจากโมดจึงลดลง

2.4.2 คุณลักษณะในการส่งสัญญาณของเส้นใยนำแสง

เนื่องจากเส้นใยนำแสงก็คือสื่อกลางชนิดหนึ่งที่ใช้ในการส่งสัญญาณ ซึ่งไม่ว่าจะเป็นตัวกลางชนิดใดก็ตามย่อมจะมีคุณลักษณะเฉพาะตัวที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อสัญญาณที่ทำการส่งเส้นใยนำแสงก็เช่นเดียวกัน โดยเส้นใยนำแสงจะมีคุณลักษณะต่างๆ ในการส่งสัญญาณนี้

2.4.2.1 การลดทอนสัญญาณ

การลดทอนสัญญาณของเส้นใยนำแสงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ทำให้เส้นใยนำแสงนิยมนำมาใช้ในระบบการสื่อสารโทรคมนาคม โดยการลดทอนสัญญาณของเส้นใยนำแสงก็จะแสดงอยู่ในหน่วย เดซิเบล เช่นเดียวกับตัวนำที่เป็นโลหะ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.16

$$\text{Single Attenuation} = 10 \log_{10} \frac{P_i}{P_o} \quad (2.16)$$

แต่เนื่องจากการสื่อสารเส้นใยนำแสงนั้นนิยมบอกค่าการลดทอนสัญญาณในรูปของเดซิเบลต่อหน่วยความยาว (เช่น dBkm-1) ดังนั้นสามารถเขียนสมการ 2.16 ได้ใหม่ดังนี้

$$\alpha_{dB} L = 10 \log_{10} \frac{P_i}{P_o} \quad (2.17)$$

โดย α_{dB} คือ การลดทอนสัญญาณต่อหน่วยความยาวและ L คือความยาวของเส้นใยนำแสง

2.4.2.2 การสูญเสียสัญญาณในเส้นใยนำแสง

การลดทอนสัญญาณของเส้นใยนำแสงจะทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณ (Transmission Loss) โดยเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น องค์ประกอบสารที่นำมาสร้าง เทคนิคในการเตรียมสารและการทำให้สารบริสุทธิ์ และ โครงสร้างของเส้นใยนำแสง นอกจากนี้ยังมีการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการใช้คอนเนคเตอร์ และการเชื่อมต่อเส้นใยนำแสง ซึ่งสามารถแยกการสูญเสียสัญญาณออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ

การสูญเสียที่มีอยู่ในตัวเส้นใยนำแสง (Fixed Loss) และการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นจากการนำไปใช้งาน (Addition Loss)

1) การสูญเสียที่มีอยู่ในตัวเส้นใยนำแสง ประกอบด้วย

1.1) การสูญเสียจากการดูดกลืนแสงของวัสดุที่ใช้สร้าง (Material Absorption Losses) คือการสูญเสียเนื่องจากการดูดกลืนแสงขององค์ประกอบของสารที่ใช้ในการสร้างเส้นใยนำแสง โดยการสูญเสียนี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารที่ใช้สร้างและกระบวนการในการสร้าง (Fabrication Process) เส้นใยนำแสง โดยจะทำให้เกิดการกระจายตัวของกำลังงานแสงที่ส่งกลายเป็นความร้อนขึ้นภายในเส้นใยนำแสง ซึ่งการสูญเสียแสงเนื่องจากการดูดกลืนแสงสามารถแบ่งได้ 2 กรณี คือ

1.1.1) การดูดกลืนแสงเนื่องจากสารที่ใช้ทำเส้นใยนำแสง (Intrinsic Absorption) เนื่องจากแก้วซิลิกาบริสุทธิ์ที่ใช้ในการสร้างเส้นใยนำแสงจะมีการดูดกลืนแสง โดยการดูดกลืนแสงอุลตราไวโอเลตมากที่สุดที่ความยาวคลื่น 0.1 ไมโครเมตร และมีการดูดกลืนแสง อินฟราเรดมากที่สุดที่ความยาวคลื่น 10 ไมโครเมตร

1.1.2) การดูดกลืนแสงเนื่องจากสารที่เจือปนอยู่ในเส้นใยนำแสง (Extrinsic Absorption) เกิดขึ้นเนื่องจากการเจือปนไอออนของธาตุโลหะในเส้นใยนำแสงที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของการหลอมแก้ว ซึ่งสารที่เจือปนในเส้นใยนำแสงที่เกิดจากการหลอมเหลวนี้นี้เป็นสาเหตุสำคัญของการลดทอนสัญญาณแสง

1.2) การสูญเสียแสงเนื่องจากการกระจัดกระจายแสง (Scattering Losses) เมื่อเกิดการกระจัดกระจายของแสงจะทำให้แสงที่เดินทางในเส้นใยนำแสงเกิดการเปลี่ยนโมด ซึ่งจะทำให้แสงเกิดการเปลี่ยนไปสู่โมดที่สามารถแพร่กระจายออกไปนอก เส้นใยนำแสงได้ ไม่สามารถเดินทางไปในคอร์ได้ แต่จะแพร่กระจายออกไปภายนอก การสูญเสียที่เกิดจากการกระจัดกระจายแสงสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ แบบเรย์เลย์ (Rayleigh Scattering) และแบบไม (Mie Scattering) ซึ่งทั้งสองแบบล้วนมีสาเหตุมาจากคุณลักษณะทางกายภาพที่ไม่สมบูรณ์ของเส้นใยนำแสงที่เกิดจากกระบวนการผลิตซึ่งยากที่จะกำจัดให้หมดไปในปัจจุบัน

1.2.1) แบบเรย์เลห์ เกิดมาจากการที่แสงเดินทางไปกระทบวัตถุที่มีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการส่งสัญญาณ ทำให้แสงแตกกระจายออกไปในทิศทางที่ต่างๆ โดยวัตถุที่เจอปนอยู่นั้นเกิดขึ้นในตอนการผลิตเส้นใยนำแสง คือ ในกระบวนการทำเส้นใยนำแสงให้ความร้อนประมาณ 2,000 องศาเซลเซียส แก่แท่งแก้วพรีฟอร์มแล้วดึงแท่งแก้วให้เป็นเส้นใยนำแสงขนาดเล็กและลดอุณหภูมิของเส้นใยนำแสงนั้นเป็น 20 องศาเซลเซียส อย่างรวดเร็วซึ่งจะทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่น และเกิดเป็นวัตถุขนาดเล็กๆ ขึ้น โดยค่าการสูญเสียเนื่องจากการกระจัดกระจายแบบเรย์เลย์นี้จะเกิดกับแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและอินฟราเรด จะแปรผกผันกับความยาวคลื่นแสง

ดังสมการที่ 2.18

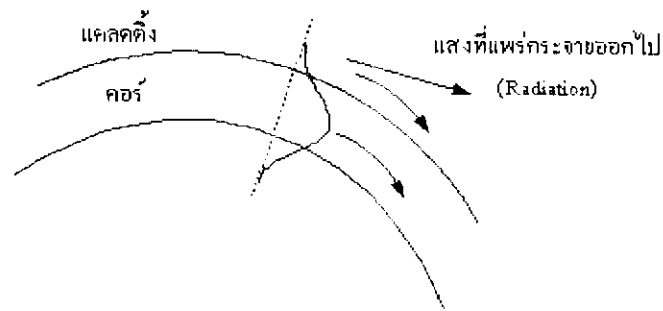


รูปที่ 2.21 การกระจัดกระจายแสงแบบเรย์เลห์

$$\text{Rayleigh Scattering Loss} = \frac{1}{\lambda^4} \quad (2.18)$$

2) การสูญเสียที่เพิ่มขึ้นมาจากการนำไปใช้งาน ประกอบด้วย

- 2.1) การสูญเสียแสงเนื่องจากการโค้งงอของเส้นใยนำแสง (Bending Loss) จะเกิดขึ้นเมื่อมีการโค้งงอเส้นใยนำแสง โดยมีมุมการโค้งงอมากกว่ามุมวิกฤต ซึ่งทำให้แสงที่เดินทางไปเกิดการกระจัดกระจายออกไปนอกคอร์ได้ ดังรูปที่ 2.22
- 2.2) การสูญเสียที่เกิดจากการโค้งงอเส้นใยนำแสงแบบไมโครเบนดิง (Micro Bending) เป็นการสูญเสียสัญญาณแสงที่เกิดจากการมีแรงกดที่ไม่สม่ำเสมอมากระทำต่อด้านข้างของเส้นใยนำแสง ส่งผลให้แกนของเส้นใยนำแสงเกิดการบิดงอไปเล็กน้อย (ประมาณ 2 - 3 ไมโครเมตร) ทำให้แสงที่ตกกระทบบริเวณดังกล่าวเกิดการหักเหออกไปภายนอกเส้นใยนำแสงได้



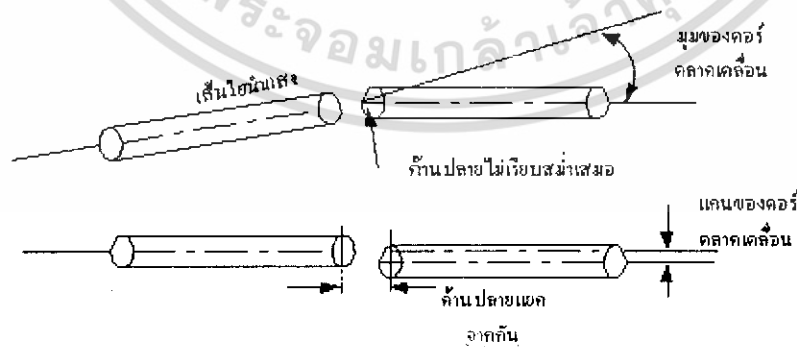
รูปที่ 2.19 การสูญเสียแสงที่เกิดจากการ โค้งงอเส้นใยนำแสง

2.3) การสูญเสียที่เกิดจากการต่อเส้นใยนำแสง (Connection Loss) จะเกิดขึ้นเนื่องจากการเชื่อมต่อไม่สมบูรณ์ ดังรูปที่ 2.23 นอกจากนี้บริเวณรอยต่อจะเกิดช่องว่างขนาดเล็กซึ่งจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียแสงจากการสะท้อนกลับ ซึ่งเรียกว่า "Fresnel Reflection" ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียที่เรียกว่า "Fresnel Loss" โดยคำนวณได้จากสมการ 2.19

$$\text{Fresnel Loss} = -10 \log(1 - r) \quad (2.19)$$

โดยที่ $r = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$

2.4) การสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการคับปลิงสัญญาณ (Coupling Loss) เป็นการสูญเสียระหว่างเส้นใยนำแสงกับแหล่งกำเนิดแสง เนื่องจากแสงที่ออกจากแหล่งกำเนิดแสงจะมีความกว้างของลำแสงไม่เท่ากัน คือ เลเซอร์ไดโอด (LD) จะมีลำแสงแคบกว่าแอลอีดี (LED) จึงทำให้การสูญเสียจากการคับปลิงสัญญาณของเลเซอร์มีค่าน้อยกว่าแอลอีดี นอกจากนี้ค่าการเปิดรับให้แสงผ่าน (NA) ของเส้นใยนำแสง ถ้ามีค่ามากก็จะเกิดการสูญเสียที่เกิดจากการต่อเส้นใยนำแสงน้อยกว่า เส้นใยนำแสงที่มีค่าการเปิดรับให้แสงผ่านน้อย



รูปที่ 2.20 การสูญเสียแสงที่เกิดจากการต่อเส้นใยนำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ ยังมี เส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกทั้งหมด โดยที่เส้นใยนำแสงชนิดนี้จะเป็นแบบมัลติโมดสเต็ปอินเด็กซ์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์กับ แคลดดิ้งขนาดใหญ่ ซึ่งทำให้ไม่จำเป็นต้องมีเปลือกหุ้ม เส้นใยนำแสงชนิดนี้จะมีราคาถูก โดยเส้นใยนำแสงชนิดนี้จะใช้สาร Polymethyl Methacry (PMMA) ในการสร้างคอร์ และใช้ Fluorinated Acrylic ในการสร้างแคลดดิ้ง ซึ่งในปัจจุบันสามารถให้มีความสูญเสียต่ำที่สุดประมาณ 20 เดซิเบลต่อกิโลเมตรที่ความยาวคลื่น 0.86 ไมโครเมตร

การพัฒนา และปรับปรุงเส้นใยนำแสงที่สร้างจากพลาสติกนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในสภาวะแวดล้อมพิเศษต่างๆ เช่น สภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง หรือในภาวะที่มีอันตรายต่างๆ สำหรับ โครงสร้างของเส้นใยนำแสงชนิดนี้แสดงให้ดูในรูปที่ 2.24

1) โครงสร้าง เส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกมีเส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์เท่ากับ 200 ถึง 600 ไมโครเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของแคลดดิ้งโดยทั่วไปมีขนาด 450 ถึง 1000 ไมโครเมตร และขนาดการเปิดรับให้แสงผ่าน (NA) เท่ากับ 0.5 ถึง 0.6

2) คุณลักษณะทางประสิทธิภาพ

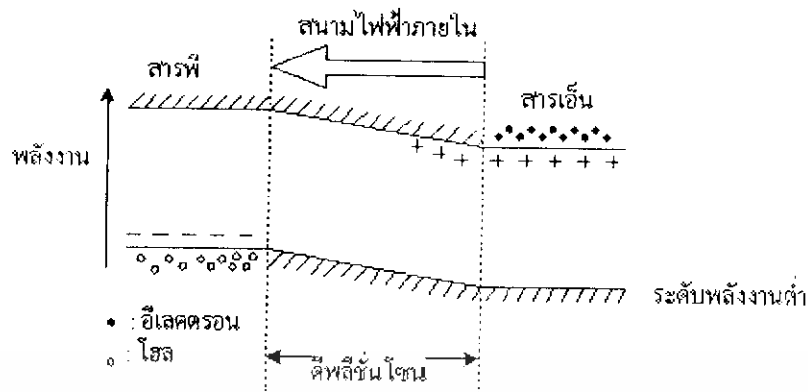
2.1) การลดทอนสัญญาณ มีการลดทอนสัญญาณ 50 ถึง 1000 เดซิเบลต่อกิโลเมตร ที่มีความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร

2.2) การใช้งาน เส้นใยนำแสงชนิดนี้ใช้สำหรับการเชื่อมต่ออุปกรณ์ราคาต่ำที่มีระยะทางสั้นมาก (Very Short - Haul Low Cost Link) เท่านั้น เช่น ในบ้าน โดยมีการเชื่อมต่อและการคัปปลิงที่ง่าย

2.5 การตรวจจับสนุณญาณทางควอนตัม

2.5.1 อุปกรณ์รับแสง

การเปลี่ยนแสงให้เป็นไฟฟ้า การรับแสงหมายถึงการเปลี่ยนแสงให้เป็นไฟฟ้า ในการทำงานนี้แบ่งออกเป็นวิธี คือ วิธีที่หนึ่งเป็นการเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นไฟฟ้าโดยตรง วิธีที่สองทำได้โดยการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานความร้อนแล้วจึงเปลี่ยนเป็นไฟฟ้า วิธีที่หนึ่งนั้นเรียกว่า "โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟค (Photo Electric Effect)" ส่วนวิธีที่สองเรียกว่า "เซนซิทีฟฮีทเอฟเฟค (Sensitive Heat Effect)" หลักการของโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟค ใช้ขบวนการดูดพลังงานตามที่ไดกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.4 นั่นคือ เมื่อมีแสงมาตกกระทบสารกึ่งตัวนำอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานต่ำจะเลื่อนขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงานสูงแต่การเลื่อนขึ้นไปนี้เป็นแต่เพียงอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปเท่านั้น และในที่สุดมันจะไปรวมกันใหม่กับโฮลในระดับพลังงานต่ำอีกทำให้ไม่ได้รับโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคเพื่อที่จะเปลี่ยนแสงให้เป็นไฟฟ้าจะต้องใช้สภาพการแยกกันของอิเล็กตรอนกับโฮลก่อนที่มันจะรวมกัน



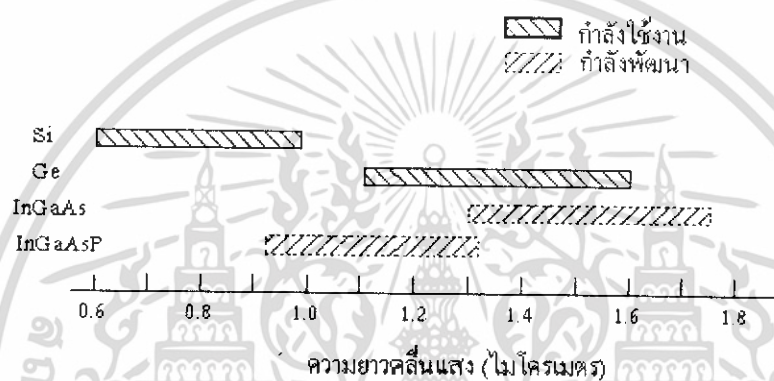
รูปที่ 2.22 ดีพลีชันโซน

สำหรับอุปกรณ์รับแสงสารกึ่งตัวนำก็เช่นเดียวกันกับอุปกรณ์กำเนิดแสง นั่นคือเพื่อที่จะแยกอิเล็กตรอนกับโฮลนั้น โดยทั่วไปใช้รอยต่อพีเอ็น ที่รอยต่อของพีกับเอ็นนั้นจะเกิดสนามไฟฟ้าในที่ว่างขึ้น แต่มันจะถูกดึงด้วยอิเล็กตรอนของสารเอ็นและโฮลของสารพี ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ และบวกเป็นผลให้เกิดบริเวณที่ไม่มีอิเล็กตรอนและโฮลขึ้นตรงรอยต่อบริเวณนี้เรียกว่าดีพลีชันโซน (Depletion Zone) ดังแสดงในรูป 2.40 ในสภาพอย่างนี้เมื่อมีแสงมากระทบจากทางด้านบริเวณสารพีแสงนั้นจะถูกดูด พร้อมทั้งเคลื่อนที่ไปทางบริเวณสารเอ็นแต่ที่ดีพลีชันโซนอิเล็กตรอน และโฮลที่เกิดจากการดูดพลังงานจากแสงจะถูกสเปกอิเล็กทริกฟิลด์ (Space Electric Field) แยกไปในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือ อิเล็กตรอนไปทางด้านเอ็นและโฮลไปทางด้านพี ที่บริเวณซึ่งอยู่ห่างจากดีพลีชันโซนนั้น เนื่องจากไม่มีสนามไฟฟ้าอิเล็กตรอน และโฮลที่เกิดจากโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกจะรวมตัวกันใหม่ ในระหว่างเคลื่อนที่ แต่สำหรับอิเล็กตรอน และโฮลที่เคลื่อนที่เข้าไปในสเปกอิเล็กทริกฟิลด์แล้วนั้นจะสามารถเข้าไปยังบริเวณตรงกันข้ามได้ ผลที่ได้ก็คือ จะเกิดแรงดันไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนกับบริเวณของอิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกแยกขึ้นระหว่างปลายทั้งสองของสารพีและ สารเอ็น ถ้าหากนำวงโคจรภายนอกมาต่อกับปลายทั้งสองนี้จะทำให้อิเล็กตรอน และ โฮลสามารถรวมตัวกันได้โดยผ่าน วงจรภายนอก นั่นคือมีกระแสไหลนั่นเองกระแสที่เกิดที่ดีพลีชัน โซนเรียกว่า "Drift Current" ส่วนกระแสที่เกิดตรงบริเวณที่อยู่ห่างจากดีพลีชัน โซนเรียกว่า "Diffusion Current" และ กระแสนี้เป็นหลักของการเปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้า

2.5.2 สารและ โครงสร้างของอุปกรณ์รับแสง

2.5.2.1 สารที่ใช้สร้างอุปกรณ์รับแสง สำหรับอุปกรณ์รับแสงก็เช่นเดียวกับอุปกรณ์กำเนิดแสง นั้นมีสารหลายชนิด นอกจากนั้นผลต่างของพลังงานของระดับพลังงานสูง และระดับพลังงานต่ำ ของอุปกรณ์รับแสงมีค่าแตกต่างกันทำให้มีย่านความยาวคลื่นต่างกันที่ดูดสัญญาณที่เข้ามาได้ง่าย

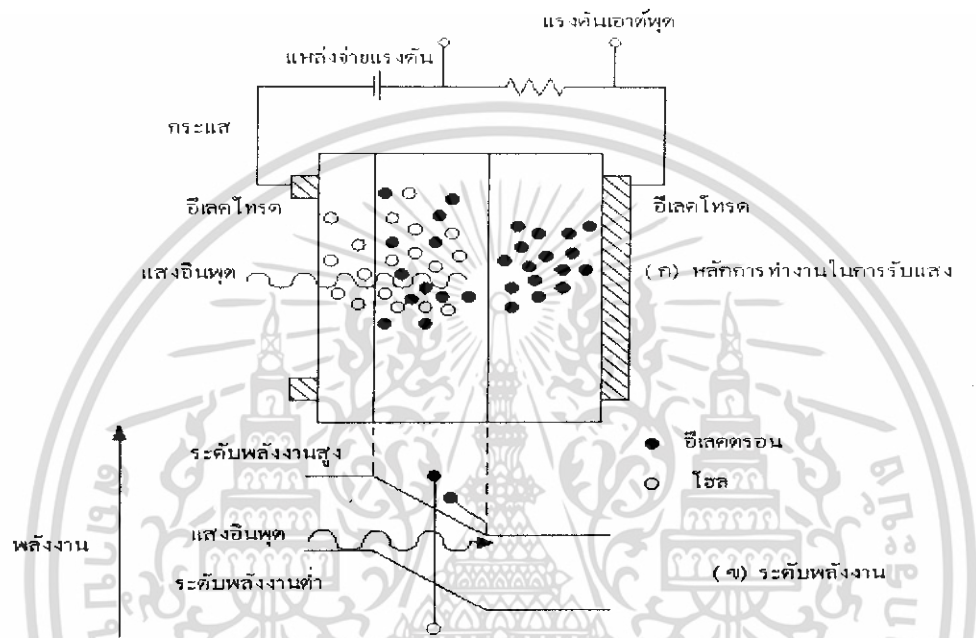
(ความไวในการรับแสง) คุณสมบัติความไวในการรับแสงของสารแต่ละชนิดดังรูป 2.25 ในการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงนั้นจะต้องเลือกอุปกรณ์รับแสงที่เหมาะสมกับความยาวคลื่นที่ใช้เช่นเดียวกันกับอุปกรณ์กำเนิดแสง สำหรับย่านความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 1 ไมโครเมตร จะใช้สารซิลิกอน สำหรับย่านความยาวคลื่น λ @ 1.7 ไมโครเมตร ใช้เจอร์มันเนียมเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนั้นในปัจจุบันสำหรับความยาวคลื่นในช่วง 1.55 ไมโครเมตร เป็นความยาวคลื่นมีการสูญเสียในเส้นใยนำแสงน้อยมาก และเป็นความยาวคลื่นที่อยู่ในวินโดวที่สาม(Third Window) การใช้งานอุปกรณ์รับแสงชนิดใหม่ที่ทำจากสารที่เป็นสารประกอบของ สารกึ่งตัวนำอินเดียมแกลเลียมอาเซไนด์และอื่นๆ ซึ่งมีความไวในการรับแสงดีมากนั้น กำลังได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ



รูปที่ 2.23 ความยาวคลื่นในการรับแสงของอุปกรณ์รับแสงแต่ละชนิด

2.5.2.2 โครงสร้างของอุปกรณ์รับแสง ในหัวข้อที่แล้วได้กล่าวถึงสเปคโตรอิเล็กทริกฟิล์มตรงรอยต่อสารพีเอ็นที่ทำให้อิเล็กตรอน และ โฮลเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้าม แต่ถ้าให้แรงดันไฟฟ้ากลับทิศทางจากภายนอกกล่าวคือทางด้านพีให้โพลบ และทางด้านเอ็นให้ไฟบวกจะทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และ โฮลตรงรอยต่อที่มีอัตราเร่งเพิ่มขึ้น อุปกรณ์รับแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำนี้แบ่งออกเป็น 2 พวกใหญ่ๆ คือ โฟโตไดโอด (Photo Diode : PD) กับ อวาลานซ์โฟโตไดโอด (Avalanche Photo Diode : APD) พวกโฟโตไดโอดนั้นเป็นพวกที่ได้รับการป้อนแรงดันไฟฟ้าปริมาณน้อย ส่วนพวกอวาลานซ์โฟโตไดโอด เป็นพวกที่ได้รับการป้อนแรงดันไฟฟ้าปริมาณมาก ตัวอย่างของโฟโตไดโอด คือ พินโฟโตไดโอด (PIN-Photo Diode) ดังแสดงในรูป 2.26 PIN หมายถึงว่าในระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P - Type) และชนิดเอ็น (N - Type) มีสารกึ่งตัวนำที่เรียกว่าอินทรินสิค (Intrinsic : I) คั่นอยู่ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่าดริฟต์เคอร์เรนต์ (Drift Current) นั้นเกิดขึ้นในดีพลีชันโซน และผลของสนามไฟฟ้าทำให้มีการตอบสนองเร็ว แต่ในทางตรงกันข้ามดริฟต์เคอร์เรนต์ที่เกิดขึ้นภายนอกดีพลีชันโซนนั้นมีการตอบสนองช้า ดังนั้นถ้าความกว้างของ ดี

พลีชั้นโชนยิ่งกว้างมากเท่าใดประสิทธิภาพทางควอนตัม (Quantum Efficiency) และความเร็วในการตอบสนองความถี่ยิ่งดีขึ้น ความกว้างของดีพลีชั้นโชนนี้มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลของสารพีและสารเอ็นยิ่งต่ำจะยิ่งกว้าง ดังนั้นสารกึ่งตัวนำแบบ I ที่กั้นกลางระหว่างสารพีกับสารเอ็น จึงมีหน้าที่เพื่อทำให้ความกว้างของดีพลีชั้นโชนกว้างขึ้นนั่นเอง เนื่องจากโฟโตไดโอดที่ใช้ในระบบการสื่อสารนั้นโดยทั่วไปต้องการความเร็วในการตอบสนองสูง ดังนั้นส่วนใหญ่จะใช้พินโฟโตไดโอด



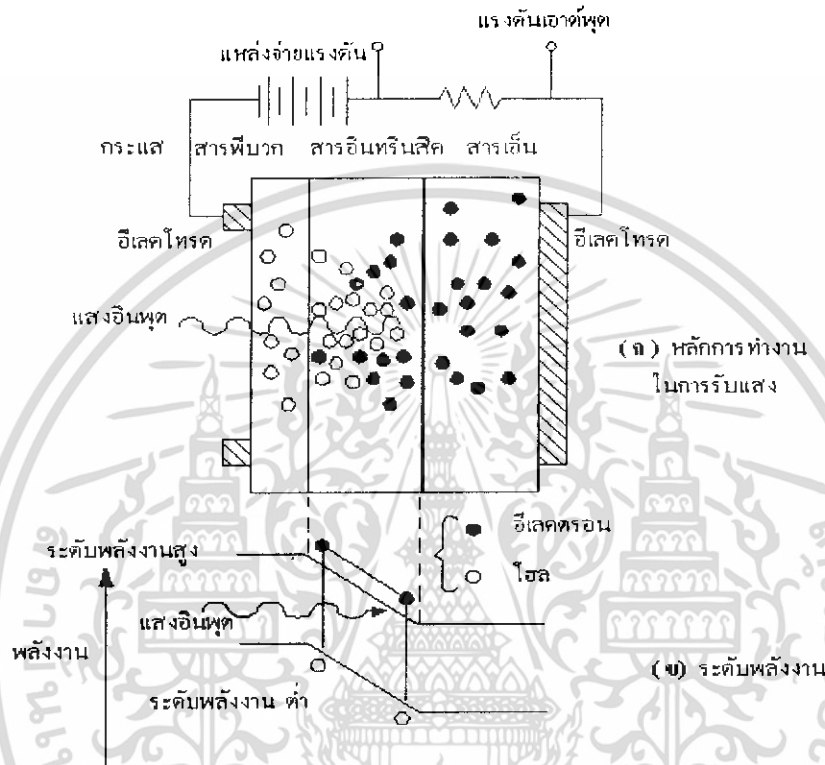
รูปที่ 2.24 หลักการทำงานการรับแสงและระดับพลังงานของ พินโฟโตไดโอด

2.5.3 อวาลานซ์โฟโตไดโอด (Avalanche photo diode)

อวาลานซ์โฟโตไดโอดนั้นใช้ปฏิกิริยาการขยาย (Avalanche) ของอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำเมื่อเปรียบเทียบกับโฟโตไดโอดแล้วเป็นอุปกรณ์รับแสงที่ให้กระแสจำนวนมาก หลักการทำงานของอวาลานซ์โฟโตไดโอดแสดงดังรูป 2.27 สำหรับโครงสร้างนั้นส่วนใหญ่ทางด้านสารพีของรอยต่อพีเอ็นจะมีสารกึ่งตัวนำแบบสารพีที่มีความหนาแน่นของโฮลสูงติดอยู่ (ส่วนที่แสดงด้วยสารพีบวมในรูป) โดยการทำเช่นนี้จะทำให้สนามไฟฟ้าภายในของบริเวณใกล้ๆรอยต่อที่มีสารพีเป็นศูนย์กลางมีค่ามาก อิเล็กตรอนที่ดูดแสงที่มากกระทบทางด้านพีบวม และถูกกระตุ้นจากระดับพลังงานต่ำไปยังระดับพลังงานสูงในระหว่างที่มันได้รับอัตราเร่ง และผ่าน สารพีนั้นมันจะได้รับพลังงานจำนวนมากกว่าผลต่างของพลังงานของระดับพลังงานสูงกับระดับพลังงานต่ำจากเหตุผลนี้ทำให้สามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานต่ำและทำให้เกิด อิเล็กตรอนกับโฮลใหม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และอิเล็กตรอนกับโฮลใหม่นี้ยังถูกสนามไฟฟ้าเร่งอัตราเร่งให้อีกทำให้เกิดอิเล็กตรอนกับโฮลขึ้นมาใหม่อีก เมื่อขบวนการนี้เกิดอย่างต่อเนื่องกันนั้น จำนวนของ อิเล็กตรอนกับโฮลจะเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากมาเป็นผลให้เกิดการขยายที่เรียกว่า "Avalanche Multiplication" ผลนี้ทำให้เกิดกระแสถูกขยายนั่นเอง



รูปที่ 2.25 หลักการทำงานการรับแสงและระดับพลังงานของอะวาแลนซ์โฟโตไดโอด

2.5.4 คุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง

การเลือกอุปกรณ์รับแสงมาใช้งานจะต้องพิจารณาคุณสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.5.4.1 มีความไวสูงในช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งาน อุปกรณ์รับแสงในยุคแรกจะตอบสนองการใช้งานกับความยาวคลื่นแสงช่วงวินโดว์ที่ 1 แต่ในปัจจุบันระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงนิยมใช้งานในช่วงวินโดว์ที่ 2 และช่วงวินโดว์ที่ 3 ดังนั้นอุปกรณ์รับแสงจะต้องสร้างให้สามารถตอบสนองต่อความยาวคลื่นดังกล่าวได้ดี โดยการเลือกใช้สารที่เหมาะสม

2.5.4.2 ความสามารถสร้างสัญญาณไฟฟ้าจากสัญญาณแสงได้มาก ความสามารถในการสร้างสัญญาณไฟฟ้าจากสัญญาณแสงจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพทางควอนตัมของสารที่ใช้สร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปประสิทธิภาพทางควอนตัมจะถูกกำหนดโดยสัมประสิทธิ์ การดูดกลืน (Absorption Coefficient : α_0) ของสารนั้น ค่า α_0 นี้จะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น คือ สารแต่ละชนิดจะมีค่า α_0 ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ไม่เท่ากัน

2.5.4.3 มีความไวสูงในการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตเพื่อให้เหมาะสมกับแบนด์วิดท์ เนื่องจากในปัจจุบันแบนด์วิดท์ในการส่งสัญญาณโดยใช้เส้นใยนำแสงจะมีค่าตั้งแต่ หลายร้อย เมกะเฮิรตซ์ ดังนั้นอุปกรณ์รับแสงจะต้องมีความไวในการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตสูงเพื่อให้สามารถทำงานได้ทันกับสัญญาณอินพุตที่ได้รับ

2.5.4.4 สัญญาณรบกวนต่ออุปกรณ์แสงจะต้องมีค่าต่ำ สัญญาณรบกวนที่สำคัญ ได้แก่ สัญญาณรบกวนควอนตัม (Quantum Noise หรือ Shot Noise) เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลง กระแสโฟโต โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดจากแสงที่มากกระทบในบางช่วงเป็นแสงที่ไม่มีเฟสเดียวกัน หรือมีหลายความยาวคลื่น ทำให้อิเล็กตรอนได้รับพลังงานไม่เท่ากันจึงทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน ดังนั้นปริมาณกระแสโฟโต จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย สัญญาณรบกวนควอนตัมนี้จะแปรผันโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้า ที่ไบอัสกลับ

2.5.4.5 มีขนาดเล็ก เพื่อให้สามารถนำอุปกรณ์ดังกล่าวมาใช้งานได้สะดวก และเชื่อมต่อกับเส้นใยนำแสงซึ่งมีขนาดเล็กได้ง่าย

2.5.4.6 ใช้แรงดันไบอัสต่ำ เพื่อประหยัดพลังงานไฟฟ้า

2.5.4.7 มีความเชื่อถือได้สูง อุปกรณ์รับแสงจะต้องสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง และต่อเนื่องเป็นเวลาหลายปี

2.5.4.8 มีราคาต่ำ เนื่องจากในการออกแบบระบบ ปัจจัยทางด้านการเงินมักจะเป็นสิ่งสำคัญที่ใช้ในการออกแบบด้วย

2.5.5 อุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง

หลักการการทำงานของสถานีขยายสัญญาณแสงหรือ optical Amplifier มีหลักการในการทำงานเดียวกับการสร้างแสงเลเซอร์ ซึ่งอาศัยหลักการพื้นฐาน ทาง ฟิสิกส์ ที่ใช้การกระตุ้นพลังงานจากภายนอกเข้าไปในสสาร แล้วทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของ อิเล็กตรอนในอะตอมของมันเกิดการ

เปลี่ยนแปลง แต่เนื่องจากธรรมชาติของ อิเล็กตรอน มันจะไม่สามารถดำรงอยู่ในสภาวะที่ไม่ใช่สภาวะเดิมของมันได้ มันจึงต้องพยายามเข้าสู่สภาวะเดิมของมัน และจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานกระตุ้นจากภายนอกที่ป้อนให้ก่อนหน้านั้น มันจึงต้องคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปพลังงานแสงที่มีความยาวคลื่นขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของสสารเพื่อทำให้อิเล็กตรอนกลับสู่สภาวะเดิมได้ หากเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมพลังงานส่วนเกินที่อิเล็กตรอนคายออกก็จะกลายเป็นพลังงานของแสงตามที่เรากำลังต้องการ หากเราสร้าง optical amplifier ให้เกิดบนเส้นใยแก้วได้เลย จะเรียกว่าเป็น Optical fiber amplifier (OFA) หรือเรียกสั้นๆ ว่า fiber amplifier วัสดุที่สามารถเปล่งแสงสีเดียวกับแสงที่ใช้ในระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วในกระบวนการของ Fiber Amplifier มีหลายชนิด เช่น ธาตุเออร์เบียม (Erbium) จะให้แสงออกมาในช่วงความยาวคลื่น 1.55 ไมครอน และธาตุนีโอดิเมียม (Neodymium) จะให้แสงออกมาในช่วงความยาวคลื่น 1.33 ไมครอน เป็นต้น ในทางปฏิบัติเส้นใยแก้ว ชนิดพิเศษจะถูกสร้างขึ้นให้มีส่วนประกอบของสารเหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งของคอร์ของเส้นใยแก้ว ในระบบสื่อสารปัจจุบันมักเลือกใช้ ธาตุ Erbium ผสมเข้ากับเนื้อแก้วในส่วนของคอร์ของเส้นใยแก้ว ทำให้เส้นใยแก้วชนิดนี้ถูกเรียกว่า Erbium-Doped Fiber หรือ EDF ซึ่งโครงสร้างทางกายภาพจะมีลักษณะเช่นเดียวกับเส้นใยแก้วธรรมดาทั่วไป และเมื่อนำ EDF มาใช้การขยายสัญญาณแสงจะเรียกว่า Erbium-Doped Fiber Amplifier หรือ EDFA แสงที่เดินทางผ่านเส้นใยแก้วชนิด EDF ตามปกติ โดยจะ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆกับสัญญาณข้อมูล แต่ถ้ากระตุ้นเส้นใยแก้วพิเศษนี้ด้วยการป้อนพลังงานแสงที่มีความยาวคลื่น 980 นาโนเมตรให้กับ EDF ข้อมูลแสงที่มีความยาวคลื่น 1.55 ไมครอน ที่เดินทางผ่านเข้าไปใน EDF จะถูกทำให้มีพลังงานเพิ่มมากขึ้น อันเนื่องมาจากรวมกันทางความเข้มแสงของสัญญาณเดิมที่นำข้อมูล กับสัญญาณแสงที่เปล่งออกมาใหม่จากกระตุ้นพลังงานเข้าไป (ซึ่งแสงทั้งสองนี้ต้องมีขนาดความยาวคลื่นที่ตรงกัน) จึงเสมือนกับการขยายข้อมูลทางแสงที่เดินทางในระบบสายส่งให้มีความเข้มแสงเพิ่มขึ้น พร้อมทั้งจะเดินทางไปในระยะทางที่ไกลออกไปได้ โครงสร้างของสถานีทวนสัญญาณแสงที่ใช้ EDF ต่อแทรกเข้าไปในระบบสายส่ง ข้อมูลแสงในระบบสื่อสารที่มีความยาวคลื่น 1.55 ไมครอน จะเดินทางผ่านคัปเปิลเลอร์เส้นใยแก้ว (fiber coupler) ออกไป ในขณะที่สัญญาณเินพุตอีกทางหนึ่งของคัปเปิลเลอร์เส้นใยแก้ว จะถูกป้อนด้วยแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 980 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมในการกระตุ้น EDF แสงทั้งสองที่เดินทางรวมกันออกจากคัปเปิลเลอร์ในช่วงของเส้นใยแก้วธรรมดาจะไม่มีอะไรเกิดขึ้น ข้อมูลแสงเดิมก็ยังคงมีความเข้มแสงไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อแสงเดินทางผ่านเข้าไปในส่วนของ EDF แสงที่มีความยาวคลื่น 980 นาโนเมตร จะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้มีพลังงานที่สูงขึ้น เรียกว่าเป็นการปั๊ม (pump) และเมื่ออิเล็กตรอนคายพลังงานออกมาเพื่อรักษาสภาวะของตัวเองมัน จะได้แสงที่มีความยาวคลื่น 1.55 ไมครอน เมื่อรวมกับข้อมูลแสงที่มีความยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นเท่ากัน ก็จะทำให้สัญญาณพัลส์แสงมีค่าความเข้มแสงเพิ่มขึ้นตามความยาวของ EDF และสามารถเดินทางเข้าไปในเส้นใยแก้วธรรมดาที่เป็นสายส่งต่อไปได้ ในขณะที่เดียวกันพลังงานของแสงที่นำมามี (ที่ 980 นาโนเมตร) ก็จะมีค่าลดลงและจางหายไปมากที่สุด อย่างไรก็ตาม ขนาดความยาวของ EDF ที่มีค่ามากๆ มิได้หมายความว่าจะทำให้ความสามารถในการขยายสัญญาณแสงมีค่าเพิ่มขึ้นเสมอด้วย แต่จะขึ้นอยู่กับขนาดความยาวที่เหมาะสมค่าหนึ่งเท่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขอบเขตและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การศึกษาข้อมูล

1. ศึกษาวิธีการส่งสัญญาณทางแสง
2. ศึกษาคุณสมบัติของแสงหรือโฟตอน
3. ศึกษาคุณสมบัติของเส้นใยแก้วนำแสง, คัปเปิลอร์, ตัวขยายสัญญาณทางแสง
4. ศึกษาคุณสมบัติของตัวตรวจจับแสงแบบต่างๆเพื่อนำมาตรวจจับโฟตอนที่ขยายออกมา

3.2 ขอบเขตและวิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษานี้จะทำการทดลองสำหรับการตรวจวัดแสง โดยใช้การปล่อยลำแสงที่เป็นโพลาริซเข้าสู่เส้นใยแก้วนำแสงผ่านตัวคัปเปิลอร์ ซึ่งจะทำให้การแยกแสงออกเป็น เปรอร์เซนต์ตามชนิดของคัปเปิลอร์ จากนั้นจะนำเอาสัญญาณที่ได้มาขยายเพื่อนำสัญญาณไปตรวจเช็คสถานะทางโพลาริซและเปรียบเทียบพิกของเอาท์พุทที่ได้ทั้ง 2 ผังโดยการควบคุมขนาดของมุมโพลาริซตั้งแต่ 0-2° โดยแสงที่ออกมาจากเอาท์พุททั้งหมดนั้น จะต้องผ่านตัวดีเทคเตอร์ ซึ่งจะทำให้การตรวจวัดขนาดของสัญญาณ แล้วนำไปเปรียบเทียบผลจากสัญญาณที่ได้

ขั้นตอนที่ 1 วิธีการเชื่อมต่อเส้นใยแก้ว

สายFiber optics มีความยาวอย่างมากประมาณไม่เกิน 12 กม. แต่ที่ใช้จริงมากกว่านี้มากนัก หรือ ต้องการที่ติดต่อกับอุปกรณ์อื่นๆ ส่วนแต่ต้องเริ่มจากการเชื่อมต่อสายใยแก้วให้มีประสิทธิภาพ เพื่อให้ได้คุณสมบัติดังนี้

1.1 มีค่าการสูญเสียสัญญาณต่ำ (Low Join Loss)

1.2 มีสัญญาณสะท้อนกลับต่ำ(Low Reflectivity)

ดังนั้น วิธีการเชื่อมต่อได้ใช้วิธีการ การสไปลซ์แบบหลอม(Fusion Splice)

การสไปลซ์แบบหลอมหรือฟิวชันสไปลซ์ (Fusion Splice)

เป็นการเชื่อมต่อปลายเส้นใยแก้วสองเส้นด้วยการหล่อหลอมด้วยความร้อน ให้วัสดุที่ใช้ทำเส้นใยแก้วนำแสงกลายเป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากเส้นใยแก้วมาตรฐานที่ใช้ในระบบสื่อสารโทรคมนาคมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กมากเท่ากับ 125 ไมครอน การหล่อหลอมเส้นใยแก้ว

เพื่อให้ส่วนของคอร์และแคลดดิ้งกลายเป็นเนื้อเดียวกัน โดยยังคงสภาพส่วนของคอร์และแคลดดิ้งแยกออกจากกันเหมือนเดิม ต้องทำด้วยความร้อนที่เหมาะสม

ในการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงด้วยวิธีฟิวชันสไปลซ์ สิ่งสำคัญเป็นอันดับแรกที่ต้องคำนึงถึงคือ การเตรียมปลายเส้นใยแก้วที่จะนำมาเชื่อมต่อกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนหลักตามลำดับดังนี้

Stripping (สตริปปิ้ง) เป็นการปอกเส้นใยแก้วให้เหลือเฉพาะส่วนของเส้นใยแก้วเปลือย คือให้เหลือเฉพาะส่วนของแก้วที่เป็นแคลดดิ้งและคอร์เท่านั้น

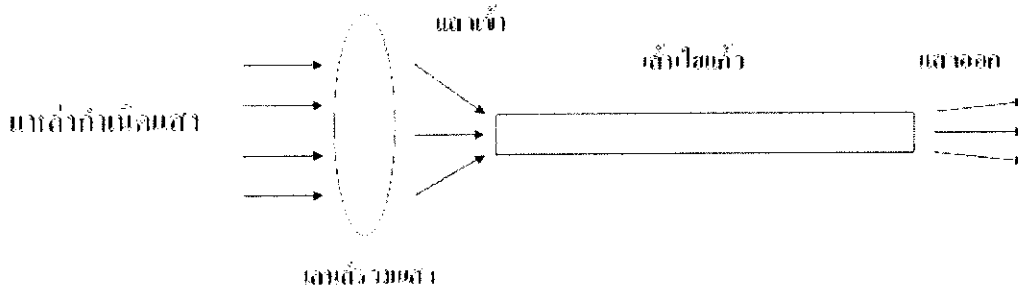
Cleaning (คลีนนิ่ง) เป็นการทำความสะอาดปลายเส้นใยแก้วเปลือย โดยใช้แอลกอฮอล์บิโดส์

Cleaving (คลีฟวิง) เป็นการตัดปลายเส้นใยแก้ว เพื่อให้ระนาบหน้าตัดเส้นใยแก้วมีความเรียบและที่สำคัญต้องตั้งฉากหรือทำมุมกับแนวแกนกลางของเส้นใยแก้วตามต้องการเนื่องจากการตัดปลายเส้นใยแก้วมีความสำคัญมาก จึงมักมีความจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์เฉพาะ

ในการหลอมเส้นใยแก้วที่เชื่อมต่อกันด้วยวิธีสไปลซ์ จะนำปลายเส้นใยแก้วที่เตรียมปลายแล้วมาจับยึดวางไว้ใกล้กันให้ห่างกันประมาณ 2-5 มิลลิเมตร โดยจะต้องให้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน หากไม่อยู่ในแนวเดียวกันต้องทำการปรับตำแหน่งให้ตรงกันเพื่อป้องกันการเกิดออฟเซต จากนั้นก็ทำการให้ความร้อน โดยทั่วไปเครื่องสไปลเซอร์มักใช้เข็มโลหะขนาดเล็กสองอันจัดวางในลักษณะตั้งฉากกับแนวเส้นใยแก้ว โดยห่างกันประมาณ 3-5 มิลลิเมตร เข็มโลหะนี้จะทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดเมื่อป้อนสัญญาณไฟฟ้าให้กับอิเล็กโทรด จะเกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองทำให้เกิดประจุไฟฟ้ากระแส โครดจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่งในลักษณะการเกิดสปาร์ก ทำให้เกิดความร้อนสูงในบริเวณนี้ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ต้องการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วพอดี จากนั้นทำการตรวจสอบและจัดปลายเส้นใยแก้วทั้งสองอีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้แน่ใจว่าเส้นใยแก้วอยู่ในแนวกลางกันพอดี เมื่อหล่อหลอมเป็นเนื้อเดียวกันแล้วจะทำการห่อหุ้มเส้นใยแก้วในบริเวณเชื่อมต่อซึ่งเป็นเส้นใยแก้วเปลือยด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า สลิฟ (Sleeve) ซึ่งมีลักษณะคล้ายท่อโลหะหรือวัสดุแข็ง เพื่อให้จุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้วมีความแข็งแรงสามารถทนแรงจับและแรงกระแทกเบาๆ ได้

ขั้นตอนที่ 2 วิธีการทดสอบสายไฟเบอร์ (launching)

เมื่อทำการสไปลซ์สายไฟเบอร์เรียบร้อยแล้วจะนำมาทดสอบโดยการยิงเลเซอร์ผ่านเข้าไปในเส้นไฟเบอร์ จากนั้น จะเช็คความเข้มของแสงที่ได้จากปลายสายไฟเบอร์ โดยใช้ดีเทกเตอร์วัดยิ่งแสงที่ได้ออกมามีความเข้มคมชัดมากก็ยิ่งดี ถ้าแสงที่ได้ออกมามีความเข้มมากก็จะแสดงว่าเส้นไฟเบอร์นั้นมีการสไปลซ์ที่ดีมีการสูญเสียน้อยสามารถนำไปใช้งานได้ ดังรูปที่ 3.1

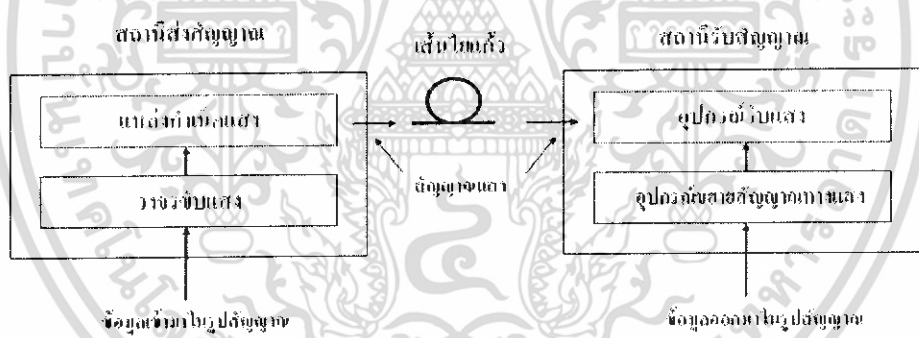


รูปที่ 3.1 แสดง Diagram การทดสอบสายไฟเบอร์

อย่างไรในการทดสอบนั้นทำทั้ง ก่อนและหลัง จากการเชื่อมต่อเส้นใยแก้ว เพื่อตรวจสอบคุณภาพหลังจาก เชื่อมติดกันว่า พอร์ตที่จะยอมรับค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อเส้น ใยแก้ว ได้ คิดออกเป็น ค่าสูญเสียที่สูญเสีย ไม่ควรเกิน 5-10 %

ขั้นตอนที่ 3 การทดลองและการวิเคราะห์

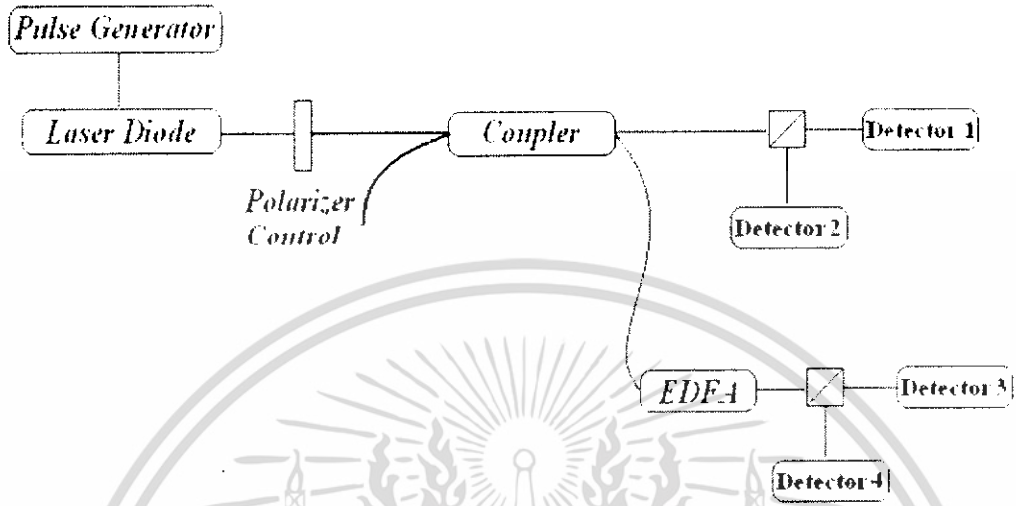
หลักการพื้นฐานของการส่งสัญญาณ เป็นดัง รูปที่ 3.2



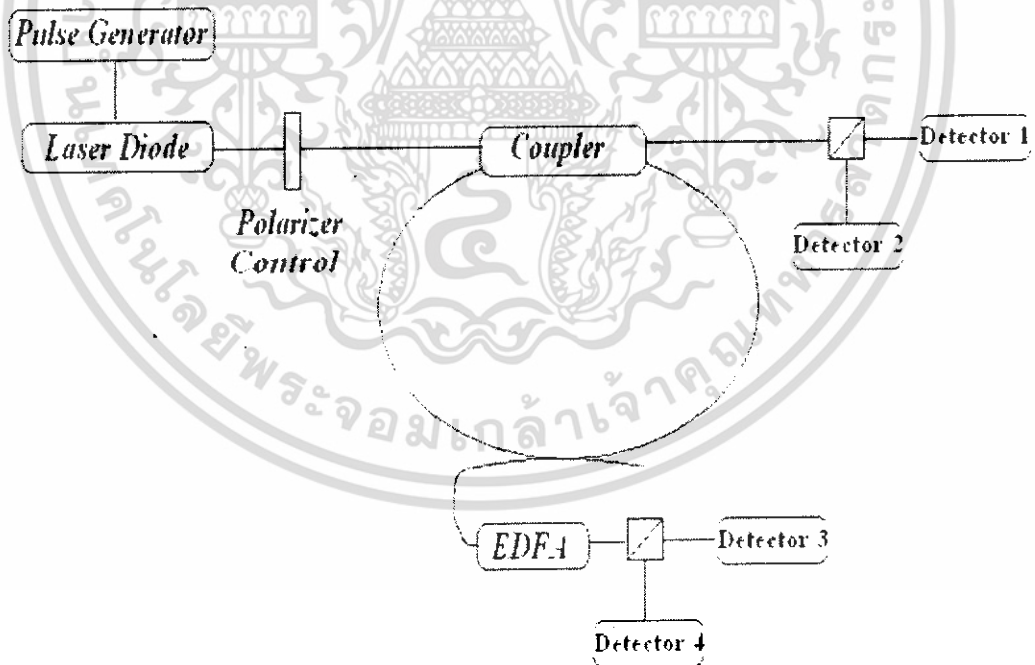
รูปที่ 3.2 หลักการพื้นฐานของการส่งรับสัญญาณทางใยแก้วนำแสง

หลังจากที่ได้เส้นไฟเบอร์ที่ใช้งาน ได้เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนแรก จะทำการยิงแสงที่เป็น โพลาริซซ์เข้าไปในเส้นไฟเบอร์ โดยให้ผ่านตัวคัปเปิลเลอร์ ซึ่งสัญญาณเอาท์พุทที่ได้ออกมาจะถูกแยก ออกเป็นสองฝั่งตามชนิดของคัปเปิลเลอร์ ในกรณีที่สัญญาณด้านที่แบ่งออกมานั้นมีขนาดน้อยมาก จะ ถูกนำมาขยายต่อด้วย EDFA(Erbium dope fiber amplifier) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวขยายสัญญาณทาง แสง เพื่อนำสัญญาณที่ได้มาเปรียบเทียบกับและสถานะทางโพลาริซซ์ โดยเราจะนำไปผ่าน PBS

(polarize beam splitter) ซึ่งจะสามารถบอกเราได้ถึงสถานะทางโพลาไรซ์ของสัญญาณเอาต์พุต ทั้งสอง ดังรูปที่ 3.3 และ 3.4



รูปที่ 3.3 แสดงถึง Diagram ของการ โคลนนิ่งสัญญาณทางแสงวิธีการแรก



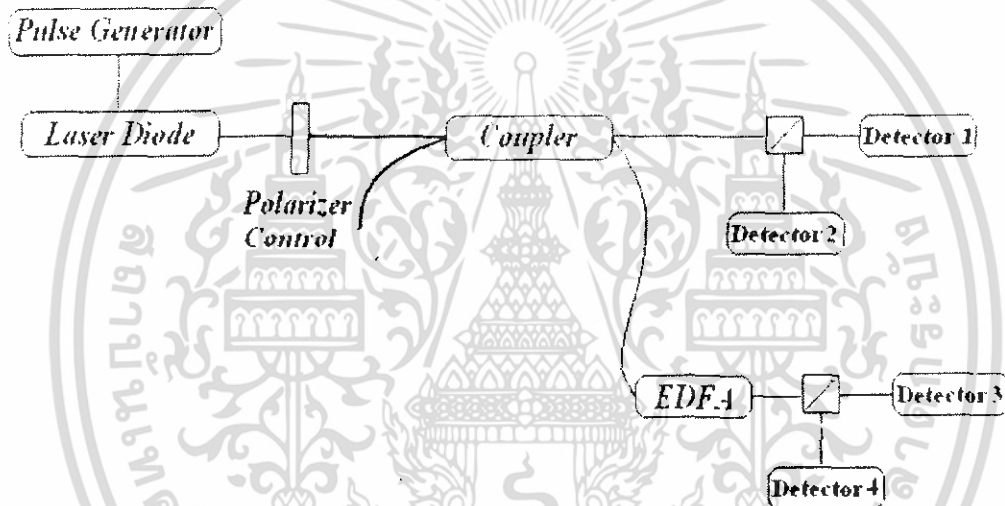
รูปที่ 3.4 แสดง Diagram ของการ โคลนนิ่งสัญญาณทางแสงวิธีการที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปราย

ในส่วนของการทดลองจะแสดงผลที่เปรียบเทียบระหว่างพิกและสถานะทางโพลาไรซ์ของเอาต์พุตสองฝั่ง การทดลองขั้นตอนแรกเราจะเริ่มต้นทดลองแบ่งสัญญาณที่คัปเปลอร์ขนาด 50:50 ก่อนจากนั้นจะเปลี่ยนเป็น 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 และ 99:1 ตามลำดับ สัญญาณที่ได้จะถูกแบ่งออกเป็นสองฝั่งแล้วนำไปผ่าน PBS แล้วทำการบิดมุมโพลาไรซ์ไปดูการเปลี่ยนแปลงของค่าพิกที่ได้ของสัญญาณที่ออกมาจากคัปเปลอร์ โดยที่ PBS จะทำการแยกสัญญาณ โพลาไรซ์ ออกเป็นสองแนวแกนทำให้ทราบถึงสถานะของสัญญาณทั้งสองฝั่งแล้วนำมาเปรียบเทียบกันได้



รูปที่ 4.1 แสดงถึง ไดอะแกรม ของการทดลอง

*หมายเหตุ : channel 1 เป็น กราฟรูปรบน , channel 2 เป็น กราฟรูปล่าง

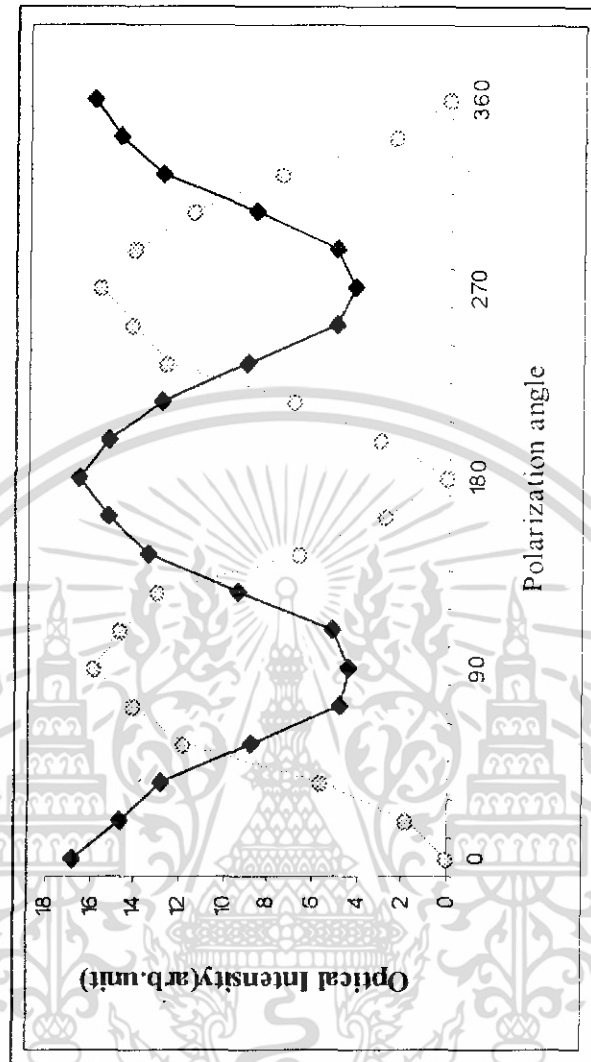
มุม(องศา)	Pk1 (D1)	Pk2(D2)
0	0.0	16.8
20	1.8	14.6
40	5.6	12.8
60	11.8	8.8
80	14.0	4.8
90	15.8	4.4
100	14.6	5.2
120	13.0	9.4
140	6.6	13.4
160	2.8	15.2
180	0.0	16.6
200	3.0	15.2
220	6.8	12.8
240	12.6	9.0
260	14.2	5.0
270	15.6	4.2
280	14.0	5.0
300	11.4	8.6
320	7.4	12.8
340	2.4	14.8
360	0.0	16.0

Coupler 50/50 Input

Input 5 Volt

Frequency 100kHz / (Ips)

หมายเหตุ : วงกลมเป็นของ D1 และ สี่เหลี่ยมเป็นของ D2



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Optical Intensity กับ Polarized Angle ของ Coupler (50/50) ด้าน Input

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

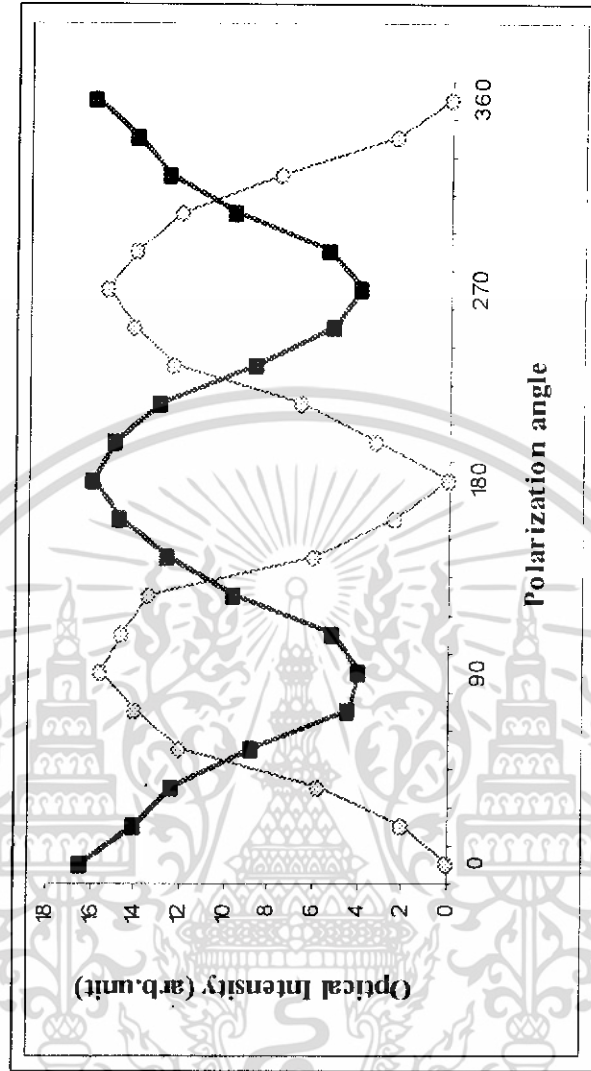
มุม(องศา)	PK1 (D3)	PK2(D4)
0	0.0	16.4
20	2.0	14.0
40	5.8	12.4
60	12.0	8.8
80	14.0	4.4
90	15.6	4.0
100	14.6	5.2
120	13.4	9.6
140	6.0	12.6
160	2.4	14.8
180	0.0	16.0
200	3.2	15.0
220	6.6	13.0
240	12.4	8.6
260	14.2	5.2
270	15.4	4.0
280	14.0	5.4
300	12.0	9.6
320	7.6	12.6
340	2.4	14.0
360	0.0	16.0

Coupler 50/50 Output

Input 5 Volt

Frequency 100kHz / (1µs)

หมายเหตุ : วงกลมเป็นของ D3 และ สี่เหลี่ยมเป็นของ D4



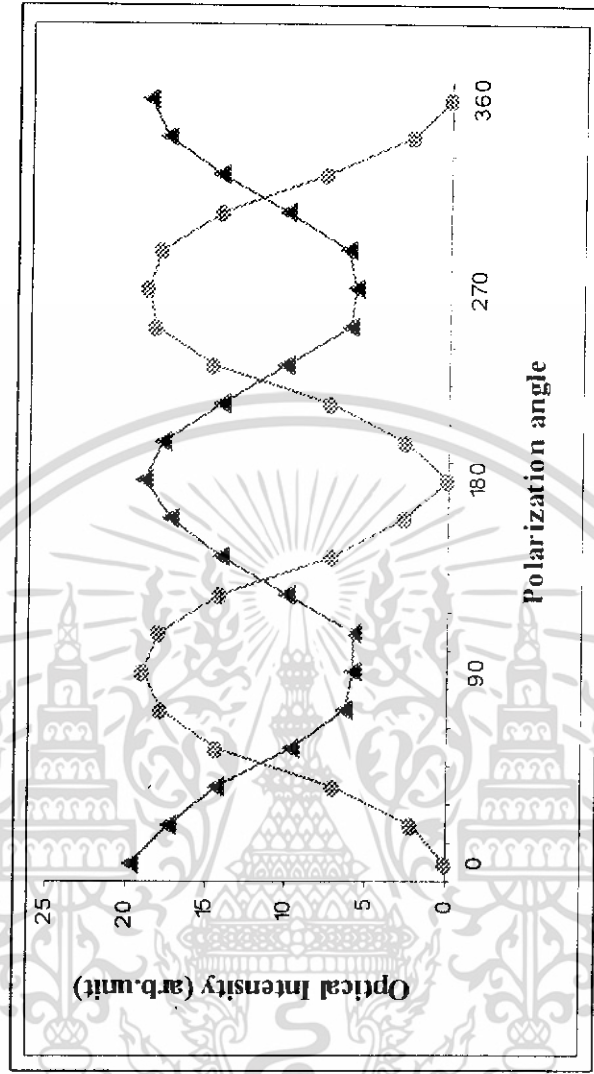
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Optical Intensity กับ Polarized Angle ของ Coupler (50/50) ด้าน Output

Coupler 60/40 - (60%)

Input 5 Volt

Frequency 100kHz / (1μs)

หมายเหตุ : วงกลมเป็นของ D1 และ สี่เหลี่ยมเป็นของ D2



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Optical Intensity กับ Polarized Angle ของ Coupler (60/40) ด้าน 60%

มุม(องศา)	Pk1 (D1)	Pk2(D2)
0	0.0	19.6
20	2.2	17.4
40	7.0	14.4
60	14.4	9.6
80	17.8	6.4
90	19.0	5.8
100	18.0	5.8
120	14.2	10.0
140	7.2	14.2
160	2.6	17.4
180	0.0	19.0
200	2.6	17.8
220	7.4	14.2
240	14.6	10.2
260	18.4	6.2
270	18.8	5.8
280	18.0	6.4
300	14.2	10.2
320	7.6	14.4
340	2.4	17.6
360	0.0	18.8

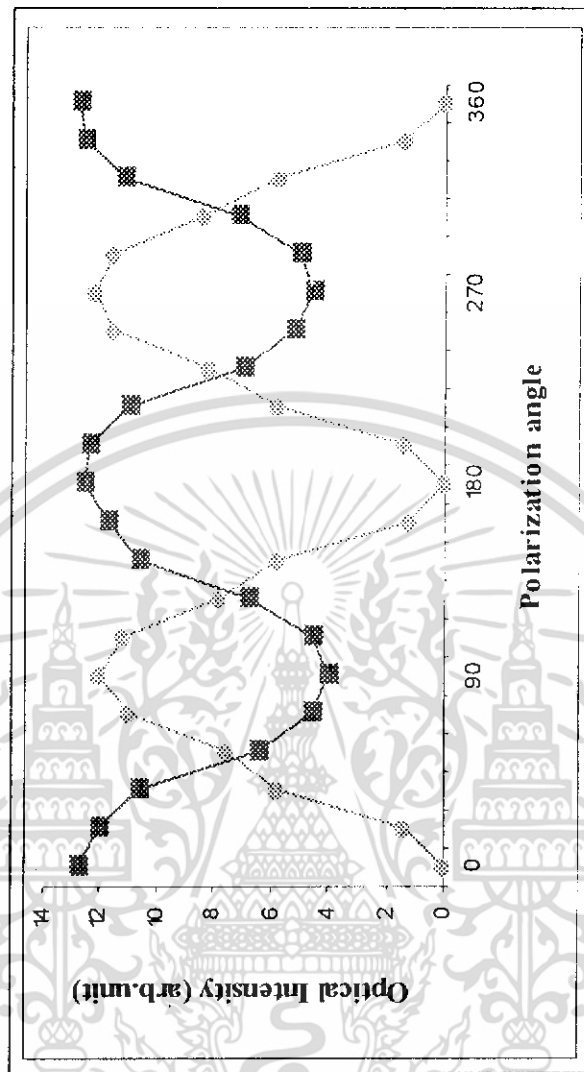
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Coupler 60/40 - (40%)

Input 5 Volt

Frequency 100kHz / (1 μ s)

หมายเหตุ : วงกลมเป็นของ D3 และ สี่เหลี่ยมเป็นของ D4



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Optical Intensity กับ Polarized Angle ของ Coupler (60/40) ด้าน 40%

มุม(องศา)	PK1 (D3)	PK2(D4)
0	0.0	12.8
20	1.4	12.0
40	5.8	10.6
60	7.6	6.4
80	11.0	4.6
90	12.0	4.0
100	11.2	4.6
120	7.8	6.8
140	5.8	10.6
160	1.2	11.8
180	0.0	12.6
200	1.4	12.4
220	5.8	11.0
240	8.2	7.0
260	11.6	5.2
270	12.2	4.6
280	11.6	5.0
300	8.4	7.2
320	5.8	11.2
340	1.4	12.6
360	0.0	12.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

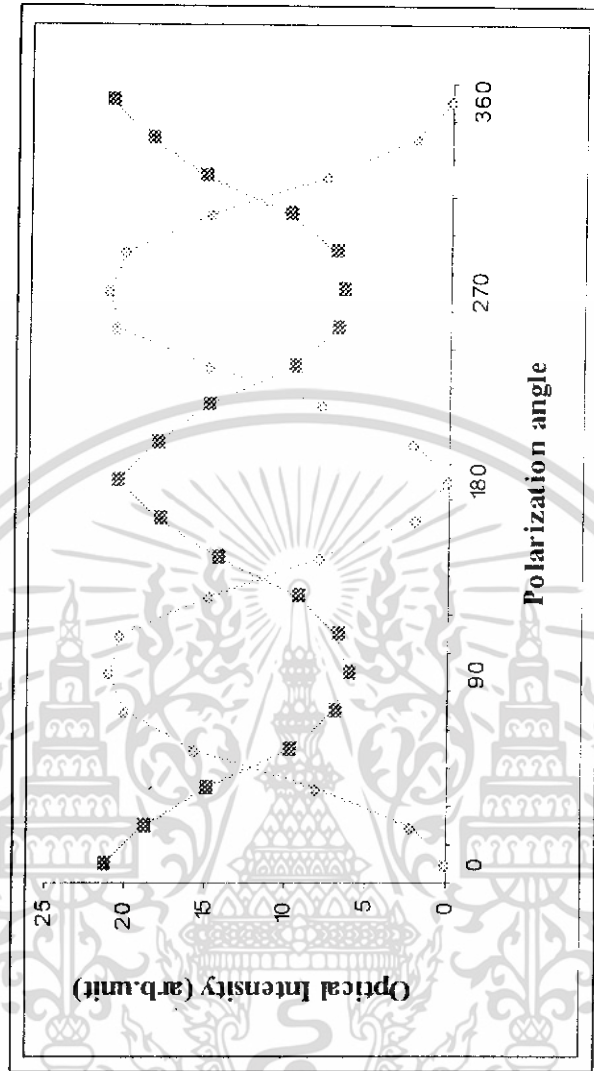
มุม(องศา)	PK1 (D1)	PK2(D2)
0	0.0	21.4
20	2.2	18.8
40	8.0	15.0
60	15.6	9.8
80	20.0	7.0
90	21.0	6.2
100	20.4	6.8
120	14.8	9.4
140	7.8	14.4
160	2.0	18.0
180	0.0	20.6
200	2.2	18.2
220	7.8	15.0
240	14.8	9.6
260	20.6	7.0
270	21.2	6.6
280	20.2	7.2
300	14.8	10.0
320	7.6	15.4
340	2.2	18.6
360	0.0	21.2

Coupler 70/30 - (70%)

Input 5 Volt

Frequency 100kHz / (1µs)

หมายเหตุ : วงกลมเป็นของ D1 และสี่เหลี่ยมเป็นของ D2



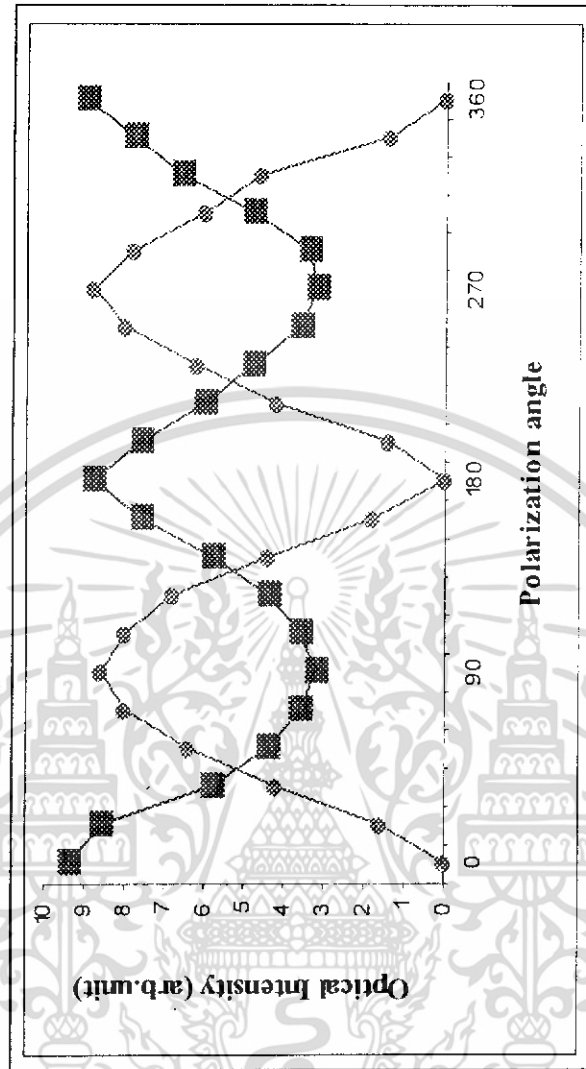
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Optical Intensity กับ Polarized Angle ของ Coupler (70/30) ด้าน 70%

Coupler 70/30 - (30%)

Input 5 Volt

Frequency 100kHz / (1 μ s)

หมายเหตุ : วงกลมเป็นของ D3 และ สี่เหลี่ยมเป็นของ D4



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Optical Intensity กับ Polarized Angle ของ Coupler (70/30) ด้าน 30%

มุม(องศา)	PK1 (D1)	PK2(D2)
0	0.0	9.4
20	1.6	8.6
40	4.2	5.8
60	6.4	4.4
80	8.0	3.6
90	8.6	3.2
100	8.0	3.6
120	6.8	4.4
140	4.4	5.8
160	1.8	7.6
180	0.0	8.8
200	1.4	7.6
220	4.2	6.0
240	6.2	4.8
260	8.0	3.6
270	8.8	3.2
280	7.8	3.4
300	6.0	4.8
320	4.6	6.6
340	1.4	7.8
360	0.0	9.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

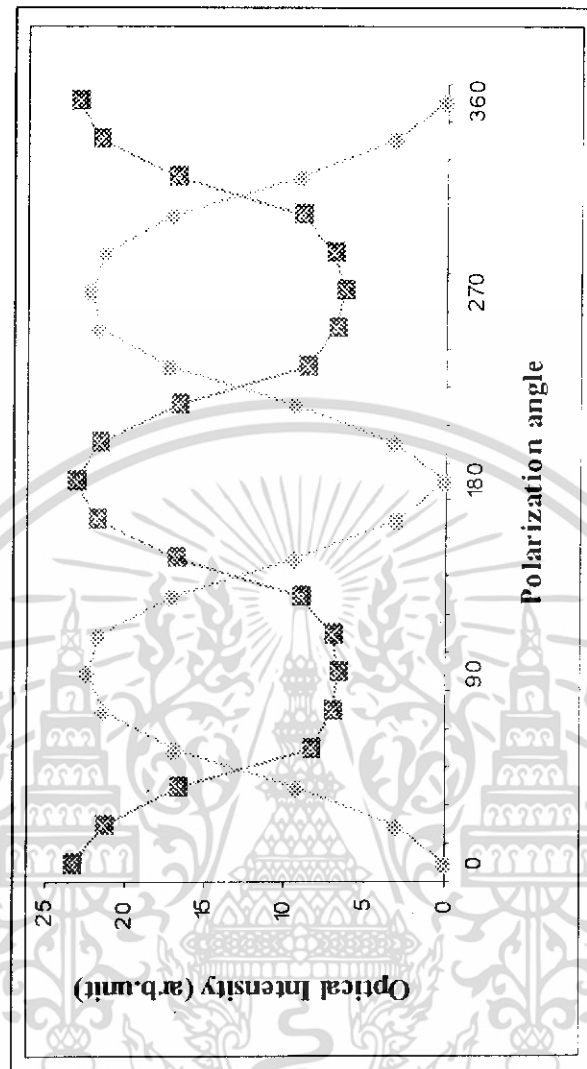
มุม(องศา)	Pk1 (D1)	Pk2(D2)
0	0.0	23.4
20	3.0	21.4
40	9.2	16.6
60	16.8	8.4
80	21.4	7.0
90	22.4	6.6
100	21.6	7.0
120	17.0	9.0
140	9.4	16.8
160	3.0	21.8
180	0.0	23.2
200	3.2	21.6
220	9.4	16.6
240	17.2	8.6
260	21.6	6.8
270	22.2	6.4
280	21.4	7.0
300	17.0	9.0
320	9.0	16.8
340	3.2	21.6
360	0.0	23.0

Coupler 80/20 - (80%)

Input 5 Volt

Frequency 100kHz / (1 μ s)

หมายเหตุ : วงกลมเป็นของ D1 และ สี่เหลี่ยมเป็นของ D2



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Optical Intensity กับ Polarized Angle ของ Coupler (80/20) ด้าน 80%

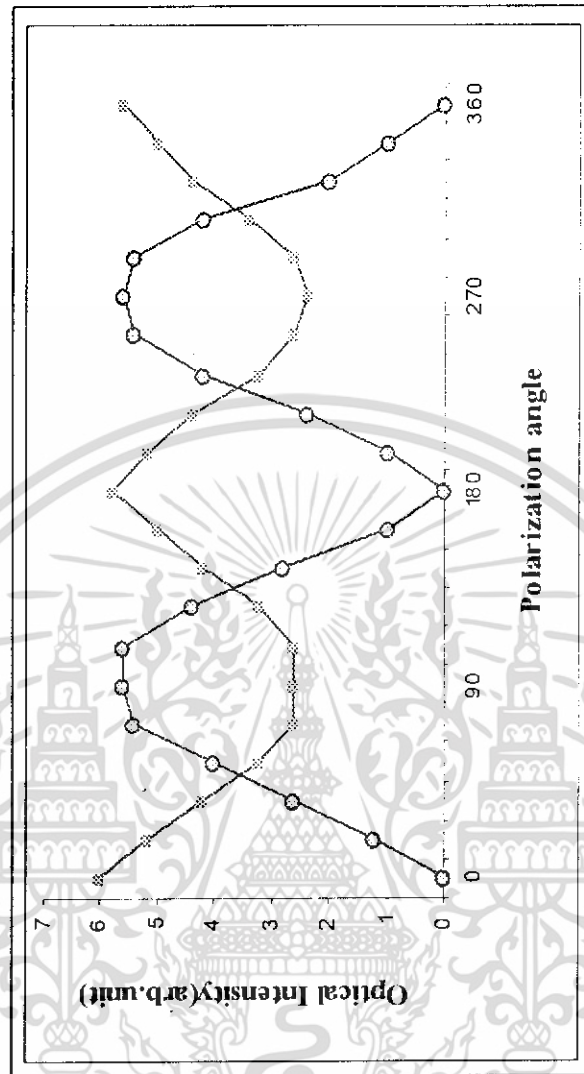
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Coupler 80/20 - (20%)

Input 5 Volt

Frequency 100kHz / (1 μ s)

หมายเหตุ : วงกลมเป็นของ D3 และ สี่เหลี่ยมเป็นของ D4



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Optical Intensity กับ Polarized Angle ของ Coupler (80/20) ด้าน 20%

มุม(องศา)	Pk1 (D3)	Pk2(D4)
0	0.0	6.0
20	1.2	5.2
40	2.6	4.2
60	4.0	3.2
80	5.4	2.6
90	5.6	2.6
100	5.6	2.6
120	4.4	3.2
140	2.8	4.2
160	1.0	5.0
180	0.0	5.8
200	1.0	5.2
220	2.4	4.4
240	4.2	3.2
260	5.4	2.6
270	5.6	2.4
280	5.4	2.6
300	4.2	3.4
320	2.0	4.4
340	1.0	5.0
360	0.0	5.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้ในกราฟ เมื่อทำการแบ่งสัญญาณออกแล้วผ่านตัว PBS เพื่อเปรียบเทียบสถานะทางโพลาไรซ์ ตัว PBS จะแยกแสงที่โพลาไรซ์ออกเป็นสองแกนเมื่อทำการบิดมุมโพลาไรซ์ไปพบว่าแสงที่ผ่านคิปเปลอร์ออกมาทั้งสองฝั่งนั้น มีการเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์ พิก ไปในลักษณะเดียวกันและมีเฟสตรงกันแสดงถึงคุณสมบัติความเป็น entangle กันของโฟตอน แต่สัญญาณที่ได้ยังมีการตกลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับอินพุท อันเนื่องมาจากการสูญเสียของสัญญาณแสงในตัวอุปกรณ์ไฟเบอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

เมื่อเปรียบเทียบผลของการวิจัยกับทฤษฎีพบว่า ในการโคลนนิ่งสัญญาณมัลติโพตอนนั้นมีความเป็นไปได้สูง เพราะมีความคล้ายกันระหว่างสัญญาณทั้ง 2 ทางที่ทำการแบ่งสัญญาณ สัญญาณที่ได้จาก PBS ทั้งสองฝั่งมีความเป็น entangle กันซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของโฟตอน โดยเปรียบเทียบทั้งขนาดของสัญญาณ เฟส และสถานะโพลาไรซ์ของทั้งสองสัญญาณ

จากการทดลองและวิจัยระบบการส่งสัญญาณทางแสงที่สร้างขึ้นมานั้น มีการสูญเสียกำลังทางแสง สัญญาณรบกวน และอัตราความผิดพลาดในการส่งสัญญาณ โดย ยังคงพบ การรบกวนจากสิ่งแวดล้อม เล็กน้อย ซึ่งอาจทำให้สรุปได้ว่า ไม่มีความแตกต่างกัน

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น

ปัญหาที่เกิดขึ้นใน โครงการพิเศษเพื่อการปรับปรุงและพัฒนา มีดังต่อไปนี้

5.2.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Frequency Generator) ซึ่งในการทดลองนี้ใช้แทนสัญญาณเบสแบนด์ของข้อมูล มีความสามารถให้กำเนิดสัญญาณได้ไม่ดีเพียงพอ เนื่องจากเครื่องกำเนิดสัญญาณมีความสามารถในการให้กำเนิดสัญญาณความถี่ได้สูงที่สุด 2 MHz และให้ แบนวิดธ์ได้ 2 ns

5.2.2 อุปกรณ์รับแสงที่ได้ใช้ในการทดลองมีการขยายสัญญาณที่ต่ำ ทำให้ระดับสัญญาณเอาต์พุตมีค่าที่ต่ำ

5.2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีย่านความถี่ในการใช้งานไม่สัมพันธ์กัน ทำให้ความสามารถของอุปกรณ์แต่ละชนิดมีประสิทธิภาพน้อยลง

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

5.3.1 ควรใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณที่มีความสามารถในการให้กำเนิดสัญญาณที่เหมาะสมในการทดลอง

5.3.2 ปรับปรุงอุปกรณ์รับแสงให้มีการขยายสัญญาณที่ดีขึ้น โดยการออกแบบวงจรขยายสัญญาณให้กับอุปกรณ์รับสัญญาณแสง

5.2.3 ปรับปรุงและแก้ไขการสูญเสียสัญญาณในส่วนต่างๆของเส้นใยแก้วนำแสงภายในระบบการทดลองเพื่อที่จะสามารถส่งผ่านสัญญาณแสงได้แม่นยำมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

รศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน, “วิศวกรรมโยธาก้าวนำแสง” สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น),
กรุงเทพมหานคร, 2544.

รศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน, “เครือข่ายโยธาก้าวนำแสง” สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น),
กรุงเทพมหานคร, 2543.

อริคม ฤกษ์บุตร, “เส้นใยแก้วและการประยุกต์ใช้งานเบื้องต้น” ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2546.

คูสิด เครื่องงาม, “สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งานเล่ม 1”
สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

William T.M. Irvine, Antia Lamas Linares, Michiel J.A. de dood, and Dirk Bouwmeester,
“Optimal Quantum Cloning on a Beam Splitter”, 2004

Amnon Yariv, “Quantum Information” California Institute of technology,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้