

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น
สำหรับการสื่อสารความเร็วสูง



ณัฐ ศรีวิบูลย์ชัย

พุทธพงษ์ เหมะวงษ์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 43935
วัน, เดือน, ปี 18 ต.ค. 2545

b.....
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

53247

Dense WDM
For High Speed Transmission



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

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

2001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น สำหรับการสื่อสาร
ความเร็วสูง

โดย

นางสาวณัฐ ศรีวิบูลย์ชัย

รหัสประจำตัว 41054030

นายพุทธิพงศ์ เหมะวงษ์

รหัสประจำตัว 41054043

ภาควิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ยูพาพิน

อาจารย์ภารจ บัณฑิตาวิทย์

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้นับโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ลายเซ็น

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ)

หัวหน้าภาค

คณะกรรมการ โครงการพิเศษ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ปรีชา ยูพาพิน)

ประธานกรรมการ

กรรมการ

(อาจารย์ภารจ บัณฑิตาวิทย์)

(อาจารย์สุรศักดิ์ พิพัฒน์ศาสตร์)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ธีรวัฒน์ ประกอบผล)

กรรมการ

(อาจารย์เบญจพล ต้นสู)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น สำหรับการสื่อสาร ความเร็วสูง
นักศึกษา	นางสาวณัฏฐ์ ศรีวิบูลย์ชัย รหัสประจำตัว 41054030 นายพุทธิพงษ์ เหมะวณิช รหัสประจำตัว 41054043
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ยูพาพิน อาจารย์ภารุจ บันฑิธาตาวิทย์
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2544

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เสนอการศึกษาการส่งสัญญาณข้อมูลทางแสง โดยการใช้การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งตามความยาวคลื่น โดยจะทำการศึกษาทฤษฎี หลักการ และผลของสัญญาณที่ได้จากการมัลติเพล็กซ์ ในงานวิจัยนี้ใช้แหล่งกำเนิดแสงแบบไดโอดเลเซอร์จำนวน 2 ชุด ทำการมอดูเลตสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณทางแสง แล้วทำการมัลติเพล็กซ์โดยใช้ปริซึมรวมแสง และส่งผ่านสัญญาณทางแสงเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง หลังจากนั้นจะทำการแยกสัญญาณทางแสงด้วยเกรตติงหรือฟิลเตอร์แสง เพื่อให้อุปกรณ์รับสัญญาณทางแสงเปลี่ยนสัญญาณทางแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าในการศึกษานี้จะทำการพิจารณา ค่าการสูญเสียกำลังทางแสง ค่าสัญญาณรบกวนข้ามช่อง อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน และอัตราการใช้บิตผิดพลาด

Special Project Title	Wavelength Division Multiplexing for High Speed Transmission
Name	Miss Nat Sriwiboonchai Mr. Puttipong Hemawanich
Special Project Advisor	Assoc.Prof.Dr.Preecha Yupapin Mr. Parud Buntitadawit
Department	Applied physics
Academic Year	2001

ABSTRACT

This special project is the study of an optical transmission data by using Wavelength Division Multiplexing (WDM). The signal processing schemes such as direct detection techniques were investigated by using Wavelength Division Multiplexing, where the system noise and crosstalk effects were studied . Two different laser diode were employed in the study. The modulated input signals were multiplexed via beam splitter (BS) before entering into the optical transmission lines. The combine signals were demultiplex by using optical grating at the other end of the like, before falling on the photodetector. Result obtained loss of optical , crosstalk effect , signal to noise ratio (SNR) and bit error rate.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการพิเศษ	2
1.5 ตารางการทำงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักเกณฑ์ที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ฟิสิกส์ของแสง	4
2.2 สมการของแมกซ์เวลล์	5
2.3 คุณสมบัติของเส้นใยนำแสง	7
2.3.1 โครงสร้างของเส้นใยนำแสง	7
2.3.2 ชนิดของเส้นใยนำแสง	7
2.3.3 การเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสง	8
2.3.4 นิวเมอริคัลอะเพอเจอร์	10
2.3.5 จำนวนโหมดแสง	10
2.4 การสื่อสารด้วยแสง	11
2.4.1 การสื่อสารเชิงแสง	12
2.4.2 ระบบการสื่อสารใยแก้วนำแสง	13
2.5 การมัลติเพล็กซ์	16
2.5.1 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา	16
2.5.2 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่	18
2.5.3 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 อุปกรณ์ตรวจวัดแสง	24
2.7 ไดโอดเลเซอร์	27
2.8 การประมวลสัญญาณทางแสง	31
2.8.1 การตรวจจับแบบตรง	31
2.8.2 สัญญาณรบกวน	33
2.8.3 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน	35
2.8.4 อัตราการส่งบิตผิดพลาด	37
2.8.5 แพทเทิร์นรูปดวงตา	38
บทที่ 3 การวิจัยและการดำเนินงาน	43
3.1 การสร้างอุปกรณ์รับสัญญาณแสง	43
3.2 การสร้างระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น	44
3.3 การศึกษาการสูญเสียกำลังทางแสง	47
3.4 การศึกษาค่าสัญญาณรบกวนข้ามช่อง	47
3.5 การศึกษาสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน	48
3.6 การศึกษาอัตราการส่งบิตผิดพลาด	48
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์	49
4.1 อุปกรณ์รับสัญญาณแสง	49
4.2 ระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น	50
4.3 ผลการศึกษาการสูญเสียกำลังทางแสง	53
4.4 ผลการศึกษาค่าสัญญาณรบกวนข้ามช่อง	54
4.5 ผลการศึกษาสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน	55
4.6 ผลการศึกษอัตราการส่งบิตผิดพลาด	56
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	58
5.1 สรุปผลการทดลอง	58
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น	58
5.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป	59

สารบัญ (ต่อ)

เอกสารอ้างอิง	หน้า
ภาคผนวก	60
ภาคผนวก ก	61
ภาคผนวก ข	64
ประวัติผู้เขียนปริญญาโท	71



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงกำหนดการทำงาน โครงการงานพิเศษ	3
2.1 แสดงค่าดัชนีหักเหของแสง	4
2.2 แสดงค่าต่างๆของพิน โฟโตไดโอด	25
2.3 แสดงคุณลักษณะของแหล่งกำเนิดแสงแบบสารกึ่งตัวนำ	30
2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับ SNR	38
4.1 แสดงค่าสัญญาณรบกวนที่ได้จากการคำนวณ	49
4.2 แสดงค่าการสูญเสียกำลังทางแสงของช่องสัญญาณที่หนึ่ง (670 nm)	53
4.3 แสดงค่าการสูญเสียกำลังทางแสงของช่องสัญญาณที่สอง (785 nm)	54
4.4 แสดงค่าสัญญาณรบกวนข้ามช่องที่ช่องสัญญาณที่หนึ่ง (670 nm)	54
4.5 แสดงค่าสัญญาณรบกวนข้ามช่องที่ช่องสัญญาณที่สอง (785 nm)	55
4.6 แสดงค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ช่องสัญญาณที่หนึ่ง (670 nm)	56
4.7 แสดงค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ช่องสัญญาณที่สอง (785 nm)	56

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	5
2.2 แสดงโครงสร้างของเส้นใยนำแสง	7
2.3 แสดงประเภทของเส้นใยนำแสง	8
2.4 แสดงการสะท้อนภายในเส้นใยนำแสง	9
2.5 แสดงมุมการรับแสงตกกระทบเส้นใยนำแสง	9
2.6 แสดงระบบพื้นฐานของการสื่อสารทางแสง	12
2.7 แสดงการผสมสัญญาณและการส่ง	13
2.8 การมัลติเพลกซ์แบบแบ่งระยะทาง	15
2.9 การมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความถี่	15
2.10 การมัลติเพลกซ์แบบแบ่งเวลา	15
2.11 การมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น	16
2.12 แสดงการทำงานของระบบมัลติเพลกซ์แบบแบ่งเวลา	17
2.13 แสดงการทำงานของระบบมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความถี่	18
2.14 แสดงช่วงคลื่นพหุขั้วในแต่ละช่องสัญญาณของการมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความถี่	19
2.15 แสดงการทำงานของระบบมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น	20
2.16 แสดงการมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น	20
2.17 แสดงเกรตติงชนิดทะลุผ่าน	22
2.18 แสดงเกรตติงชนิดสะท้อน	23
2.19 แสดงไรซ์โซมใหม่ของอุปกรณ์	24
2.20 แสดงโครงสร้างของพินโฟโตไดโอด	25
2.21 แสดงสเปกตรัมเรสพอนส์ของพินโฟโตไดโอด ซึ่งทำมาจาก Si และ InGaAs	25
2.22 แสดงวงจรสมมูล	26
2.23 แสดงวงจรของพินโฟโตไดโอด	26
2.24 แสดงไดโอดเลเซอร์ชนิด AlGaAs	27
2.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของไดโอดเลเซอร์สัมพันธ์กับกระแสไบแอส	28
2.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไปข้างหน้าของไดโอดเลเซอร์	28
2.27 แสดงการมอดูเลตแบบดิจิตอลนั้นมี I_{dc} เป็นกระแสชืดเริ่มเปลี่ยนเมื่อกระแส i_r เป็นศูนย์ สำหรับสำหรับแอนะล็อกมอดูเลชัน	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.28 แสดงการมอดูเลตแบบแอนะล็อกของไดโอดเลเซอร์	29
2.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเลเซอร์กับอุณหภูมิ	30
2.30 แสดงการตรวจจذبแบบตรง	31
2.31 แสดงวงจรสมมูลด้านหน้าของภาคขยายสัญญาณ	34
2.32 แสดงวงจรขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนอยู่ภายใน	35
2.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับ SNR	37
2.34 แสดงการจัดระบบเพื่อบันทึกแพทเทิร์นรูปดวงตา	39
2.35 แสดงสัญญาณ $d_o(t)$	40
2.36 แสดงแพทเทิร์นรูปดวงตาที่เกิดบนออสซิลโลสโคป	40
2.37 แสดงแพทเทิร์นรูปดวงตากับความหมายของส่วนต่างๆ	41
2.38 แสดงความสัมพันธ์ของแพทเทิร์นรูปดวงตากับอัตราการส่งบิตผิดพลาด	42
3.1 แสดงวงจรของอุปกรณ์รับสัญญาณแสง	43
3.2 แสดงไดอะแกรมของระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นที่ใช้ในการทดลอง	44
3.3 แสดงระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นที่ใช้ในการทดลอง	45
3.4 แสดงการมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสง	46
3.5 แสดงการดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสง	46
4.1 แสดงสัญญาณรบกวนรวมของอุปกรณ์รับสัญญาณแสง	50
4.2 แสดงสัญญาณแสงอินพุทของช่องสัญญาณที่ 1 (670 nm)	51
4.3 แสดงสัญญาณแสงอินพุทของช่องสัญญาณที่ 2 (785 nm)	51
4.4 แสดงสัญญาณแสงเอาต์พุทของช่องสัญญาณที่ 1 (670 nm)	52
4.5 แสดงสัญญาณแสงเอาต์พุทของช่องสัญญาณที่ 2 (785 nm)	53

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงได้มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว โดยมีสาเหตุสำคัญมาจากการใช้งานด้านการสื่อสารข้อมูลอินเทอร์เน็ต (Internet) ที่มีอย่างแพร่หลาย [1] จึงทำให้ผู้ให้บริการทางการสื่อสาร จำเป็นต้องจัดหาวิธีที่จะทำให้ระบบการสื่อสารมีความสามารถพอที่จะรองรับกับความต้องการของการสื่อสารข้อมูลได้ โดยวิธีที่จะเพิ่มความสามารถในการสื่อสารข้อมูลมีอยู่ 3 วิธี คือ

- 1) เพิ่มจำนวนเส้นใยนำแสง (Fiber optic cable)
- 2) เพิ่มความสามารถของอุปกรณ์ในระบบให้มีอัตราการส่งผ่านข้อมูล (Bitrate) สูงกว่าเดิม
- 3) การใช้วิธีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wave Division Multiplexing: WDM)

ซึ่งในการเพิ่มจำนวนเส้นใยนำแสงนี้เป็นวิธีที่ทำได้โดยง่าย เนื่องจากในปัจจุบันราคาของเส้นใยนำแสงนี้มีราคาถูกกว่าในอดีตเป็นอย่างมาก จึงทำให้วิธีนี้คุ้มค่างบเงินลงทุนที่เสียไป แต่ในบางสถานการณ์ที่การติดตั้งจำนวนเส้นใยนำแสงเพิ่มนั้นจำเป็นต้องมีการก่อสร้างอุโมงค์ หรือการวางท่อเพื่อทำการติดตั้งสายเคเบิล ซึ่งเป็นการลงทุนสูงและไม่ใช่วิธีที่คุ้มค่างอีกต่อไป ส่วนการเพิ่มความสามารถของอุปกรณ์ในระบบให้มีอัตราการส่งผ่านข้อมูล (Bit rate) ที่สูงขึ้น กว่าเดิมนี้เป็นวิธีที่จำเป็นต้องใช้เงินลงทุนเป็นจำนวนมาก เช่น ในการปรับปรุงระบบจาก SONET OC-48 rates (2.5 GB/s) ไปเป็นแบบ SONET OC-192 rates (10 GB/s) นี้จะต้องมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ส่วนวิธีสุดท้ายคือ วิธีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wave Division Multi-plexing : WDM) [1-2] ซึ่งวิธีนี้จะใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเส้นใยนำแสงเดิม โดยการใช้เส้นใยนำแสงเดิม เพื่อให้ช่องสัญญาณอื่นที่มีความยาวคลื่นของแสงที่แตกต่างกันมาใช้ร่วมกัน โดยใช้อุปกรณ์เพิ่มจากระบบเดิมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทำให้วิธีนี้มีค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก และเป็นวิธีที่คุ้มค่างกับการใช้งานเป็นอย่างมาก

เพื่อให้เข้าใจการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (WDM) ได้ง่ายขึ้น โดยจะมาพิจารณาจากแสงขาว โดยปกติแล้วแสงขาวไม่ได้ประกอบมาจากแสงเพียงสีเดียว แต่แสงขาวนั้นประกอบไปด้วยแสงหลายๆสีที่มารวมกัน เช่น สีแดง, สีเขียว และสีน้ำเงิน เป็นต้น จึงเปรียบเสมือนว่าในการส่งแสงสีขาวหนึ่งครั้งคือการส่งแสงหลายสีไปพร้อมกัน โดยแสงในแต่ละสีนั้นจะมีความยาวคลื่นอยู่ค่าหนึ่ง เช่น สีแดงมีความยาวคลื่นประมาณ 650 nm สีเขียวมีความยาวคลื่นประมาณ 550 nm สีน้ำเงินมีความยาวคลื่นประมาณ 500 nm เป็นต้น [3]

ดังนั้นในการประยุกต์ใช้กับงานด้านการสื่อสาร จะกำหนดให้จะให้แหล่งกำเนิดแสงหนึ่งใช้สัญญาณแสงความยาวคลื่นหนึ่ง และแหล่งกำเนิดแสงตัวต่อไป จะใช้สัญญาณแสงความยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นที่ไม่ซ้ำกับแหล่งกำเนิดเดิม จากสัญญาณแสงจากหลายๆแหล่งกำเนิดสัญญาณแสงดังกล่าว จะถูกนำมารวมกันด้วยอุปกรณ์รวมแสง เช่น ปริซึมรวมแสง(BS), คัปเปอ์(Couple) เป็นต้น เพื่อทำการส่งผ่านในสายใยนำแสงแล้วทำการแยกสัญญาณแสงดังกล่าวออก โดยใช้อุปกรณ์แยกแสง เช่น ฟิลเตอร์ (Filter), เกรตติง (Grating) เป็นต้น หลังจากนั้น สัญญาณทางแสงแต่ละความยาวคลื่นจะถูกอุปกรณ์ตรวจรับสัญญาณ และส่งสัญญาณไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าอีกต่อไป [4-6]

ในการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความคลื่นที่ใช้แสงจำนวนหลายความยาวคลื่นจะเรียกว่า “การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นที่มีความหนาแน่นสูง (Dense Wavelength Multiplexing : DWDM)” ซึ่งเป็นที่มาของงานวิจัยในครั้งนี้ [1]

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

- 1.2.1 เพื่อสนับสนุนการนำเทคโนโลยีทางด้านแสงมาใช้ในการสื่อสาร
- 1.2.2 เพื่อศึกษาถึงหลักการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นสำหรับการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูง
- 1.2.3 เพื่อสร้างเสริมประสบการณ์การพัฒนาร่างเครื่องมือทางแสง โดยอาศัยหลักการประยุกต์ทางฟิสิกส์

1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

- 1.3.1 ศึกษาหลักการและทฤษฎีทางแสงที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 1.3.2 ศึกษาหลักการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น
- 1.3.3 ศึกษาค่าการสูญเสียกำลังทางแสง ค่าสัญญาณรบกวนข้ามช่อง อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน และอัตราการใช้พื้นที่ผลผลิต ของระบบการสื่อสารข้อมูลที่ใช้การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการพิเศษ

โครงการพิเศษนี้จะเป็แนวทางในการใช้เทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นเพื่อประยุกต์ใช้ในการสื่อสารทางด้านแสงที่ต้องการความสามารถในการส่งผ่านข้อมูลได้สูง โดยโครงการพิเศษนี้จะเป็แนวทางให้มีการพัฒนาระบบการสื่อสารด้วยแสงให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นต่อไป

1.5 ตารางการทำงาน

กำหนดการทำงานโครงการพิเศษ แสดงดังตารางที่ 1.1 ดังนี้

ตารางที่ 1.1 แสดงกำหนดการทำงาน โครงการพิเศษ

ช่วงเวลา	กิจกรรม
มิถุนายน 2544	เสนอชื่อ โครงการพิเศษ
กรกฎาคม 2544	รวบรวมทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ โครงการพิเศษ
กันยายน 2544	ออกแบบขั้นตอนการทำโครงการพิเศษ
ตุลาคม 2544	จัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการพิเศษ
พฤศจิกายน 2544	สร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการพิเศษ
ธันวาคม 2544	ทำการศึกษาตามจุดประสงค์
มกราคม 2545	ตรวจสอบผลการศึกษา และสรุปผลการศึกษา
กุมภาพันธ์ 2545	เขียนรายงานผลการการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักเกณฑ์ที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักเกณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง และคุณสมบัติโดยทั่วไปอุปกรณ์ที่ใช้ระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง โดยในรายละเอียดจะกล่าวถึงเฉพาะในส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงการพิเศษนี้เท่านั้น ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ฟิสิกส์ของแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางด้วยความเร็วประมาณ 3×10^8 เมตร / วินาที ในสุญญากาศ ซึ่งความเร็วของแสงในสุญญากาศสำหรับทุกๆ ความยาวคลื่นนั้นมีค่าเท่ากัน อย่างไรก็ตามความเร็วของแสงจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งที่มีความหนาแน่นไม่เท่าเดิม จึงเป็นเหตุที่ทำให้แสงเกิดการหักเห จากคุณสมบัติการหักเหของแสงนี้เองที่ทำให้แสงมีพฤติกรรมต่างๆ ขณะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง ซึ่งการเคลื่อนที่ของแสงในเส้นใยนำแสงก็อาศัยหลักการทางฟิสิกส์นี้เช่นกัน

การหักเหของแสงเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของแสงในตัวกลางซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยนั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความเร็วแสงในสุญญากาศกับความเร็วของแสงในตัวกลางที่แสงผ่าน ค่าอัตราส่วนของความเร็วนี้เรียกว่าดัชนีหักเห (n) ซึ่งแทนด้วยความสัมพันธ์

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

เมื่อ c และ v คือ ความเร็วของแสงในสุญญากาศ และในตัวกลางใดๆตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางต่างๆ

ตัวกลาง	ค่าดัชนีหักเห
สุญญากาศ (Vacuum)	1.00
อากาศ (Air)	1.0003
น้ำ (Water)	1.33
เอทิล แอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol)	1.36
ควออร์ต (Fused Quarts)	1.46
แก้ว (Glass Fiber)	1.50-1.90

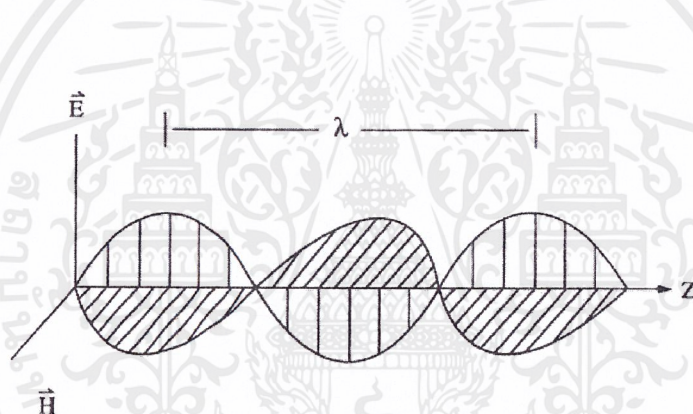
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สมการของแมกซ์เวลล์

เนื่องจากแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดนั้น อาจมีความยาวคลื่นเดียว หรือหลายค่าก็ได้ ทั้งแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ซึ่งการกระจายของความยาวคลื่นนี้ เรียกว่า สเปกตรัม (Spectrum) ส่วนค่าความยาวคลื่น λ และความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ν มีความสัมพันธ์ ดังนี้กล่าวถึงบางส่วนที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดดังจะกล่าวได้ต่อไปนี้

$$c = \lambda \nu \quad (2.2)$$

เมื่อ c คือ ความเร็วของคลื่น ในสุญญากาศมีค่าประมาณ 3×10^8 เมตรต่อวินาที ลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในขณะที่เดินทางแสดงได้ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้า คือ B_0 และ E_0 ตามลำดับ มีการเปลี่ยนแปลงในทิศตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ และตั้งฉากซึ่งกันและกัน เดินทางไปตามแกน k ซึ่งเรียกว่า คลื่นตามขวาง และมีสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equation) ที่สามารถนำมาอธิบายพฤติกรรมของแสงได้ดังต่อไปนี้

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot D = 0 \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.6)$$

เมื่อ \mathbf{E} คือ เวกเตอร์สนามไฟฟ้า \mathbf{H} คือ เวกเตอร์สนามแม่เหล็ก โดยที่ $\mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E}$ และ $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$ เมื่อ ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และ μ คือ ค่าซึมซาบทางไฟฟ้า (Permeability) จากสมการที่ (2.3) และ (2.4) ใช้ตัวดำเนินการ (Operator) เกร็ดเข้าทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{H}) = -\mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

จากหลักการของเวกเตอร์เอกลักษณ์ (Vector identity)

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{Y}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{Y}) - \nabla^2 \mathbf{Y} \quad (2.9)$$

เมื่อ \mathbf{Y} คือตัวดำเนินการ และนำสมการ (2.9) ไปใช้กับสมการที่ (2.7) และ (2.8) จะได้

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.10)$$

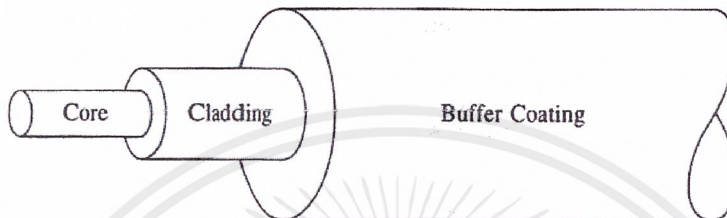
$$\nabla^2 \mathbf{H} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2.11)$$

เมื่อ ∇^2 คือ ตัวดำเนินการลาปลาเซียน (Laplacian) สมการ (2.9) และ (2.10) เรียกว่าสมการมาตรฐานสำหรับสมการอนุพันธ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาสมการอนุพันธ์สำหรับเส้นใยนำแสงได้

2.3 คุณสมบัติของเส้นใยนำแสง

2.3.1 โครงสร้างของเส้นใยนำแสง

เส้นใยนำแสงมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ส่วนที่เป็นแกน (Core) และส่วนที่เป็นชั้นหุ้มแกนหรือเคลดคิง (Cladding) โดยมีค่าดัชนีหักเหที่แตกต่างกันเพื่อให้แสงสามารถเดินทางภายในแกนได้ ดังรูปที่ 2.2



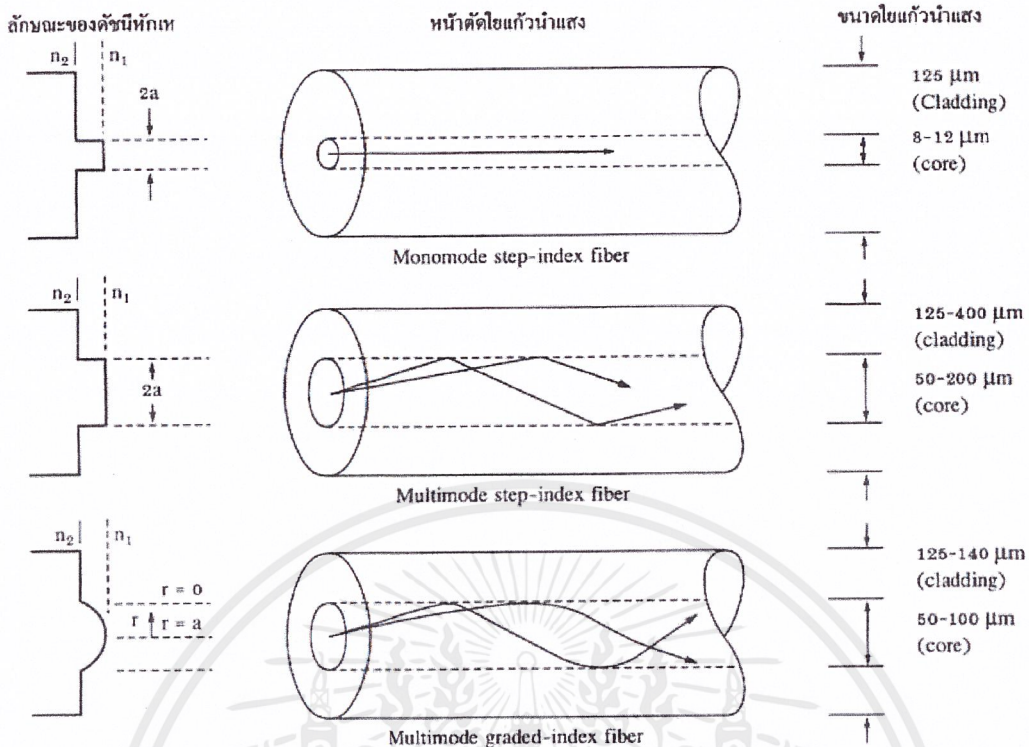
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของเส้นใยนำแสง

2.3.2 ชนิดของเส้นใยนำแสง

การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงนั้นค่อนข้างยุ่งยากเนื่องจากการได้มีการแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงออกไปได้หลายแบบ เช่น แบ่งตามวัสดุที่ทำ แบ่งตามคุณสมบัติการสูญเสียกำลังแสง แบ่งตามองค์ประกอบของเส้นใยนำแสง เป็นต้น อย่างไรก็ตามหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงตามตามโหมดการเดินทางของแสง ซึ่งสามารถแบ่งได้ดังนี้

- 1) เส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยว (Single-mode fiber , SM)
- 2) เส้นใยนำแสงแบบหลายโหมด (Multimode fiber , MM)
 - เส้นใยนำแสงแบบหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ (Multimode step index fiber , SI)
 - เส้นใยนำแสงแบบหลายโหมดชนิดเกรดอินเด็กซ์ (Multimode graded index fiber , GI)

ซึ่งสามารถแสดงประเภทของเส้นใยนำแสงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงประเภทของเส้นใยนำแสง

โดยรูปบนแสดงโครงสร้างของเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดียว
 รูปกลางแสดงโครงสร้างของเส้นใยนำแสงแบบหลายโหมดชนิดขั้นบันได
 รูปล่างแสดงโครงสร้างของเส้นใยนำแสงแบบหลายโหมดชนิดมน

จากรูปที่ 2.3 จะมีดัชนีหักเหของแกน และแคลดดิ้งเป็น n_1 และ n_2 ตามลำดับ ซึ่งรอยต่อของค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงไปในรูปแบบต่างๆ ดังรูป จากรูปจะเห็นได้ว่าลำแสงที่เดินทางในเส้นใยแบบหลายโหมดจะมีหลายลำแสงสะท้อนไปมาภายในแกน ส่วนลำแสงที่เดินทางในเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดียว จะมีลำแสงเพียงเส้นเดียวเดินทางในแกนกลางของแกน

โดยทั่วไปเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก (Plastic optical fiber, POF) จะเป็นเส้นใยนำแสงแบบหลายโหมดชนิดขั้นบันไดวัสดุที่นำมาทำในส่วนแกนจะต้องโปร่งใสในช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งาน ซึ่งมักใช้วัสดุประเภทเทอร์ฟอสโพลีเมอร์ (Amorphous-polymers)

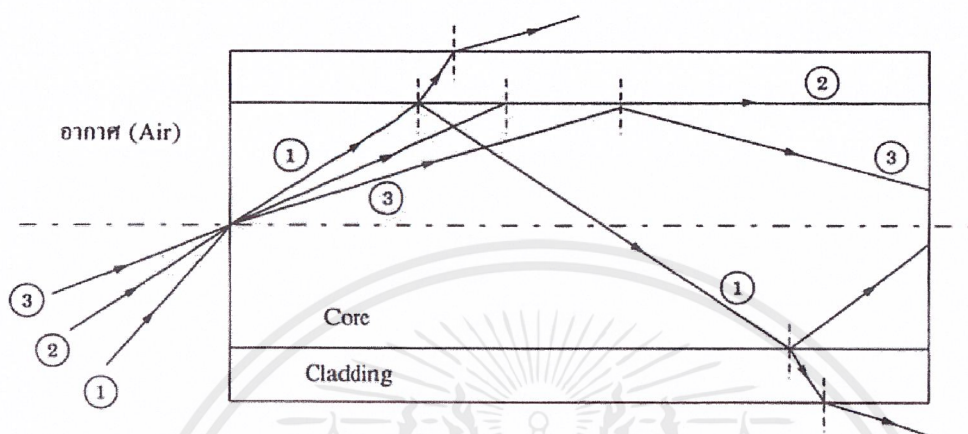
2.3.3 การเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสง

การเดินทางของแสงจะอาศัยหลักการสะท้อนกลับหมดภายในแกน ซึ่งอาศัยกฎของสเนลล์ (Snell's law) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

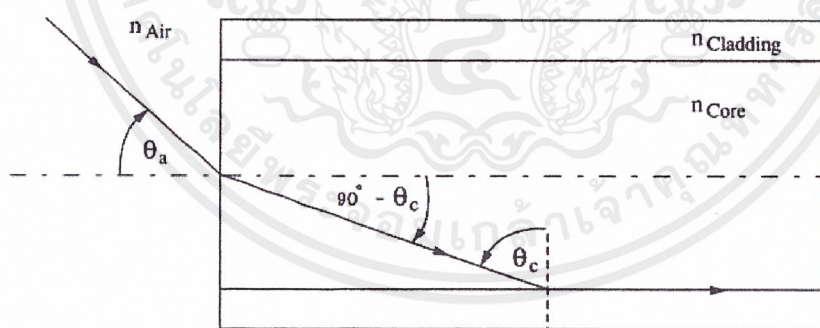
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.12)$$

การหักเหและการสะท้อนของแสงภายในเส้นใยนำแสงแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการสะท้อนภายในเส้นใยนำแสง

ในการส่งลำแสงเข้าสู่เส้นใยนำแสง ถ้าต้องการให้เกิดการสะท้อนกลับหมดภายในนั้นจำเป็นที่จะต้องพิจารณามุมที่ทำการส่งลำแสงเข้าเส้นใยนำแสงด้วย ซึ่งพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงมุมการรับแสงตกระทบเส้นใยนำแสง

จากรูปที่ 2.5 นั้นมุม θ_a เป็นช่วงของมุมที่รับแสงตกระทบได้แล้วจะทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดภายใน ซึ่งจะเรียกมุมนี้นี้ว่าครึ่งมุมรับแสง (Half acceptance angle : θ_a) ส่วนในกรณีทีคิดแบบ 3 มิติมุมรับแสง (Acceptance angle : $2\theta_a$) ก็คือกรวยรับแสง (Acceptance cone) ถ้าแสงตกระทบทำมุมมากกว่ามุมรับแสงจะทำให้แสงเดินทางภายในเส้นใยนำแสง โดยมีมุมตกระทบน้อยกว่ามุมวิกฤต ϕ_c จะทำให้เกิดการรั่วไหลของแสงออกไปจากเส้นใยนำแสงจนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมดไปในที่สุด ทำให้แสงไม่สามารถเดินทางภายในเส้นใยนำแสงไปเป็นระยะทางไกลๆ ได้ โดยสามารถหาค่าครึ่งมุมรับแสง (θ_a) ได้จากสมการ

$$\theta_a = \sin^{-1} (n_{\text{Cladding}} / n_{\text{Core}})^{1/2} \quad (2.13)$$

2.3.4 นิวเมอริกัลอะเพอร์เจอร์ (Numerical Aperture , NA)

เป็นปริมาณที่บอกถึงความสามารถในการรับแสง (Light – collecting ability) ของเส้นใยนำแสง ซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างค่าดัชนีหักเหของตัวกลางตกกระทบ (Incident medium) กับค่าไซน์ (Sine) ของครึ่งมุมรับแสง (Half acceptance angle)

พิจารณากรณีที่ตัวกลางตกกระทบเป็นอากาศ ($n_1 = 1$) จะได้

$$NA = n_1 \sin \theta_a = (n_{\text{Core}}^2 - n_{\text{Clad}}^2)^{1/2} \approx n_{\text{Core}} (2\Delta)^{1/2} \quad (2.14)$$

ถ้า NA มีค่ามากแสดงว่าเส้นใยนำแสงมีมุมรับแสงมากหรือแสงสามารถเดินทางในแกนของเส้นใยนำแสงได้มาก

2.3.5 จำนวนโหมดแสง (V-number)

V-number เป็นปริมาณที่ใช้บอกถึงจำนวนโหมดของแสงที่สามารถเดินทางในเส้นใยแก้วนำแสงได้ โดยมีความสัมพันธ์คือ

$$V = (2\pi a / \lambda) NA \quad (2.15)$$

เมื่อ a คือ รัศมีของแกน

λ คือ ความยาวคลื่นแสง

ถ้า V-number มีค่าน้อยกว่า 2.405 แสดงว่ามีเฉพาะแสงโหมดเดียวเท่านั้นที่สามารถเดินทางในแกนของเส้นใยนำแสงได้ ถ้ามีค่ามากกว่า 2.405 แสดงว่าแสงที่เดินทางในแกนของเส้นใยนำแสงมีลักษณะเป็นชนิดหลายโหมดหรือมัลติโหมด โดยสามารถหาจำนวนโหมดของแสงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

จำนวนโหมดในเส้นใยนำแสงแบบขั้นบันไดคือ

$$N = V^2 / 2 \quad (2.16)$$

จำนวนโหมดในเส้นใยนำแสงแบบมนคือ

$$N = V^2 / 4 \quad (2.17)$$

2.4 การสื่อสารด้วยแสง

จากความเจริญก้าวหน้าทางเศรษฐกิจและสังคม ทำให้มีความต้องการในการแลกเปลี่ยนข่าวสารและข้อมูลเพิ่มขึ้น เพื่อเป็นการตอบสนองต่อความต้องการได้ทั้งปัจจุบันและอนาคต ระบบสื่อสารด้วยแสง (Optical Communication System) ซึ่งสามารถส่งข่าวสารและข้อมูลต่างๆ ได้เป็นจำนวนมากในเวลาเดียวกันจึงได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย

ระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารที่ใช้สายเคเบิลที่ทำด้วยโลหะ แล้วมีข้อดีต่างๆ ที่เกิดจากคุณสมบัติของใยแก้วนำแสงดังนี้คือ

1. มีแบนด์วิดท์กว้าง กล่าวคือ การใช้คลื่นพาห่ที่มีความถี่สูงในระบบสื่อสารทำให้แบนด์วิดท์ของสัญญาณกว้างมากขึ้น การสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงนั้นขึ้นกับคลื่นพาห่ที่มีความถี่ในช่วง $10^{13} - 10^{14}$ เฮิรตซ์ เมื่อเปรียบเทียบกับความถี่ของคลื่นวิทยุซึ่งมีความถี่ $10^6 - 10^9$ เฮิรตซ์ แล้วจะเห็นว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณกว้างขึ้นถึงประมาณ 10^6 หรือ 1 ล้านเท่า
2. มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา เส้นใยนำแสงเพียงเส้นเดียวสามารถแทนคู่สายทองแดงขนาดใหญ่ได้ เช่น สายเคเบิลทางโทรศัพท์ที่มี 1,000 คู่สาย มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7-10 เซนติเมตร จะสามารถใช้เคเบิลเส้นใยนำแสงเพียงเส้นเดียวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร แทนได้ในการส่งช่องสัญญาณจำนวนที่เท่ากัน
3. การสูญเสียต่ำ เส้นใยนำแสงมีการสูญเสียเนื่องจากการลดทอนน้อยกว่าสายเกลียวคู่ (Twisted Pair) หรือสายหุ้มฉนวน (Coaxial Cable)
4. ไม่ถูกรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากเส้นใยนำแสงไม่ได้สร้างจากลวดโลหะเหมือนสายเคเบิลโลหะ แต่สร้างมาจากแก้ว (Glass) หรือซิลิคอน (Silicon) ดังนั้นจึงไม่ถูกรบกวนโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้ไม่ต้องใช้เทคนิคป้องกันด้วยวิธีการชิลด์ (Shield) ที่มีราคาแพงและยุ่งยากเพื่อป้องกันการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

5. คงทนและไม่ถูกรบกวนโดยสภาพดินฟ้าอากาศ แก้วหรือซิลิคอนมีความแข็งแรงกว่าโลหะถึง 20 เท่า โดยซิลิคอนหรือแก้วเป็นธาตุเฉื่อย ดังนั้นสภาพแวดล้อมจึงมีผลน้อยกว่าการใช้สายที่ทำด้วยโลหะ

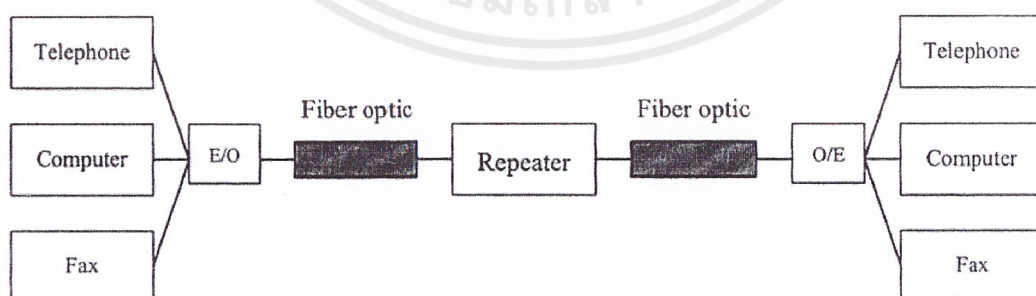
6. มีความปลอดภัย ในระบบสายโลหะจำเป็นต้องป้องกันอันตรายให้กับอุปกรณ์หรือมนุษย์จากไฟฟ้าลัดวงจรระหว่างสาย หรือระหว่างสายกับสายดิน ซึ่งเมื่อใช้เส้นใยนำแสงแล้วจะไม่มีปัญหาเกี่ยวกับสิ่งเหล่านี้

7. ยากต่อการแอบลักลอบต่อใช้สัญญาณ จึงรักษาความปลอดภัยได้ง่าย

2.4.1 การสื่อสารเชิงแสง

แนวความคิดในการสื่อสารด้วยใยแก้วนำแสงเกิดขึ้นเมื่อนักวิทยาศาสตร์พยายามที่จะค้นคว้าเกี่ยวกับการส่งผ่านแสงในชั้นบรรยากาศมาก่อนแต่ไม่ค่อยประสบความสำเร็จมากนัก เนื่องจากแสงจะถูกดูดกลืนหรือลดทอนในชั้นบรรยากาศอย่างมาก การส่งผ่านชั้นบรรยากาศจึงถูกจำกัดเฉพาะการสื่อสารในระยะทางสั้นๆ ต่อมาจึงหันความสนใจมาวิจัยการสื่อสารโดยใช้ใยแก้วนำแสง แต่ในระยะแรกเกิดปัญหาเนื่องจากการสูญเสียมากถึงประมาณ 1,000 เดซิเบล/กิโลเมตร ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้กับการสื่อสารได้ ต่อมานักวิทยาศาสตร์ได้ทำการวิจัยและพัฒนาอัตราการสูญเสียของใยแก้วนำแสงเหลือเพียง 0.2 เดซิเบล/กิโลเมตร ตัวอย่างเช่น แสงที่เดินทางในเส้นใยแก้วนำแสงที่ยาว 15 กิโลเมตร ปริมาณของแสงจึงจะลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง ดังนั้นจึงสามารถนำแสงไปได้ไกลมาก จากการนำแสงเลเซอร์และใยแก้วนำแสงมาใช้ร่วมกันจึงทำให้เกิดการส่งข่าวสารยุคใหม่ขึ้นเรียกว่า “การสื่อสารใยแก้วนำแสง”

ลักษณะของระบบการสื่อสารด้วยแสงได้ดังแสดงได้ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงระบบพื้นฐานของการสื่อสารทางแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

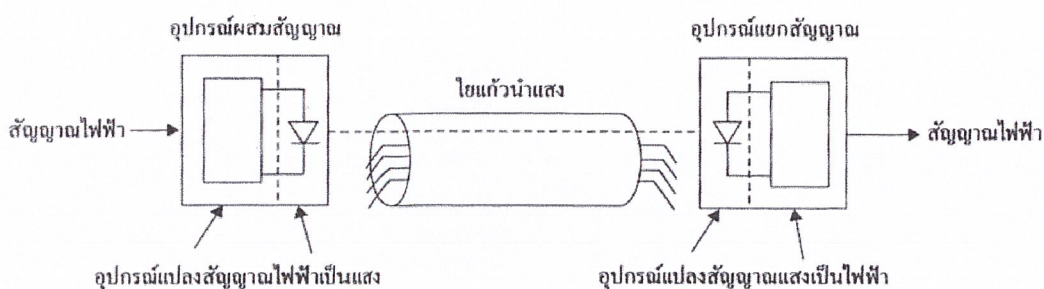
จากรูปที่ 2.6 นั้นสัญญาณไฟฟ้าจากอุปกรณ์ต่างๆ เช่น โทรศัพท์ โทรสาร จะถูกเปลี่ยนจากสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณทางแสงด้วยเครื่องมือแปลงสัญญาณ (Electrical to Optical Converter:E/O) สัญญาณที่ถูกแปลงแล้วถูกส่งเข้าสู่เส้นใยนำแสงพร้อมด้วยการมัลติเพลกซ์สำหรับการเดินทางระยะทางไกลๆนั้น จะต้องมียุทธรณ์สัญญาณ (Repeater) ซึ่งอยู่ระหว่างเส้นใยนำแสงเพื่อไม่ให้สัญญาณอ่อนเกินไป สัญญาณที่ออกที่ปลายทางจะถูกแปลงกลับไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยเครื่องแปลงสัญญาณ (Optical to Electrical converter:O/E) และส่งไปยังอุปกรณ์ปลายทางอีกครั้งหนึ่งเหมือนเดิมตามอุปกรณ์ต่างๆ โดยการมัลติเพลกซ์สัญญาณ

2.4.2 ระบบการสื่อสารใยแก้วนำแสง

ระบบอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นแสงนั้นทำได้โดยใช้อุปกรณ์ทางแสงได้แก่ แหล่งกำเนิดแสง (Light Source) ซึ่งปกติใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดไดโอดเปล่งแสง(LED) หรือไดโอดเลเซอร์ (LD) ส่วนอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้านั้นทำได้โดยใช้ไดโอดเปล่งแสง (Photodiode) หรือทรานซิสเตอร์แสง (Photo Transister) นอกจากนี้กรณีทีระยะทางของสายส่งยาวมากต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Repeater)ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วเปลี่ยนกลับเป็นสัญญาณแสงอีกครั้งและส่งกลับไปในเส้นใยแก้วนำแสง

การผสมและแยกสัญญาณ

การผสมสัญญาณ(Modulation) ของการสื่อสารนั้น หมายถึงการทำให้ความถี่ของการส่งเปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณข่าวสาร สำหรับการสื่อสารใยแก้วนำแสงนั้นความถี่(หรือความยาวคลื่น) ของแสงที่ปล่อยออกมาจากอุปกรณ์กำเนิดแสงมีค่าไม่คงที่ ดังนั้นความหมายของการผสมสัญญาณจึงแตกต่างกับการสื่อสารทางไฟฟ้า ถ้าหากสามารถทำให้แสงเป็นแสงอาพันธ์ (Coherence Light) ที่สมบูรณ์นั้นคือมีความถี่ที่คงที่ และสามารถเปลี่ยนความถี่แสงให้อยู่ในย่านความถี่ไมโครเวฟได้ก็จะทำให้การสื่อสารใยแก้วนำแสงมีการผสมคลื่นชนิดต่างๆเหมือนกับการสื่อสารทางไฟฟ้า ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการผสมคลื่นแสงนั้นเป็นเพียงการผสมความเข้มแสง (Intensity Modulation) เท่านั้น (ดูรูปที่ 2.7 ประกอบ)



รูปที่ 2.7 แสดงการผสมสัญญาณและการส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปกติสัญญาณแสงทางด้านรับของระบบสื่อสารนั้นสัญญาณจะอ่อนกำลังลง และบางครั้งอาจเกิดความผิดพลาดเนื่องจากการส่งผ่านไปใยแก้วนำแสง เมื่ออุปกรณ์รับแสงทำการแปลงสัญญาณแสงให้ได้สัญญาณไฟฟ้าที่ออกมาเป็นรูปร่างของสัญญาณเดิมที่เป็นสัญญาณพื้นฐาน (Baseband) และเป็นไปตามรูปร่างของกรอปกลิ้น (Envelope) ของสัญญาณที่เกิดจากการรวมกับคลื่นพาห้ทางแสง สัญญาณนี้จะผ่านขั้นตอนทางไฟฟ้าเพื่อทำการขยายสัญญาณ และได้สัญญาณที่เครื่องรับปลายทางเหมือนกับต้นกำเนิดข่าวสารทุกประการ ในอนาคตถ้าสามารถทำให้แสงที่เป็นอาพันธ์อย่างสมบูรณ์ก็จะสามารถใช้วิธีการผสมคลื่นที่ทำให้ความถี่ของต้นกำเนิดแสงเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณนั้น คือใช้วิธีผสมคลื่นที่มีประสิทธิภาพดีได้และทำนองเดียวกันกับทางด้านรับแสงก็สามารถใช้การแยกสัญญาณที่เรียกว่าเทคนิคทางด้านความถี่ (Heterodyne Detection) เป็นส่วนการรับสัญญาณปลายทาง

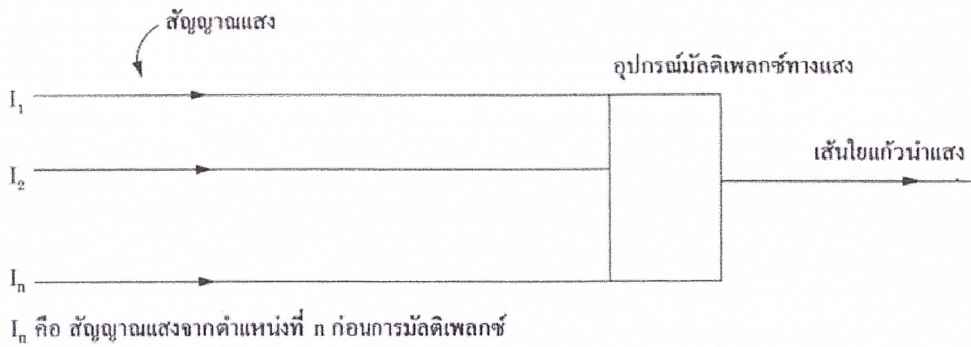
การส่งสัญญาณแบบดิจิทัลและแอนะล็อก

การส่งสัญญาณโดยทั่วไปนั้นมีสองแบบคือ การส่งสัญญาณแบบดิจิทัล (Digital) และแอนะล็อก (Analog) การสื่อสารด้วยแสงนั้นมีการส่งสัญญาณอยู่สองชนิดนี้เช่นกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับสัญญาณไฟฟ้าที่มาผสมกับแสงว่าจะจะเป็นสัญญาณดิจิทัลหรือสัญญาณแอนะล็อกเท่านั้น การส่งสัญญาณแบบดิจิทัลโดยทั่วไปแล้วจะนำมาเปลี่ยนเป็นรหัส (Code) ที่เหมาะแก่การส่งก่อนแล้วจึงส่งออกไปเช่นเดียวกับการส่งสัญญาณแบบแอนะล็อก นั่นคือก่อนที่จะทำการเปลี่ยนแปลงสัญญาณแอนะล็อก นั่นคือก่อนที่จะทำการเปลี่ยนแปลงสัญญาณแอนะล็อกให้เป็นสัญญาณแสงนั้น จะทำการผสมสัญญาณขึ้นแรกกับแหล่งกำเนิดแสงก่อน ทั้งนี้ก็เพราะว่าแสงเอาท์พุทของอุปกรณ์กำเนิดแสงนั้นไม่เป็นสัดส่วนกับระดับสัญญาณไฟฟ้าอินพุทเสมอ ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากในการรักษาคุณสมบัติของการส่งเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงต้องทำการผสมสัญญาณเบื้องต้นก่อน การเลือกระบบการส่งสัญญาณทั้ง 2 ชนิดนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน การเลือกระบบการส่งแบบแอนะล็อกมักใช้กับการส่งสัญญาณภาพในข่ายสาย (Network) หรือเคเบิลทีวี แต่ในอนาคตระบบการส่งแบบดิจิทัลที่มีคุณสมบัติดีกว่าจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในทุกๆด้าน

การทำมัลติเพลกซ์

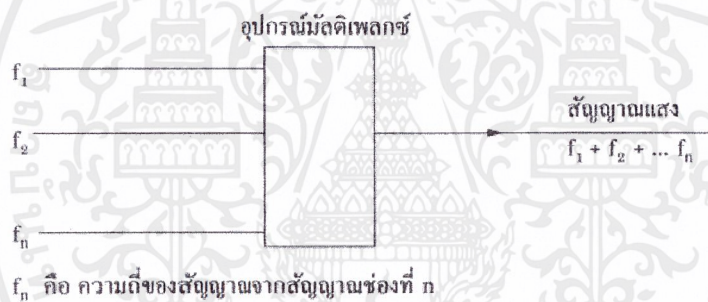
การสื่อสารนั้นถ้าสามารถส่งข่าวสารได้มากเท่าใดก็จะเป็นการประหยัด ระบบสื่อสารใยแก้วนำแสงก็เช่นเดียวกันต้องมีการทำมัลติเพลกซ์ (Multiplex) เหมือนกับระบบการสื่อสารใช้สายที่เป็นโลหะเช่นกัน การมัลติเพลกซ์ทางแสงสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ

1. การมัลติเพลกซ์แบบแบ่งระยะทาง (Space Division Multiplexing) หมายถึง ในสายเคเบิลหนึ่งเส้นจะมีเส้นใยแก้วนำแสงเป็นจำนวนมากซึ่งเป็นวิธีที่ทำให้ส่งสัญญาณได้จำนวนมากต่อสายเคเบิลหนึ่งเส้น



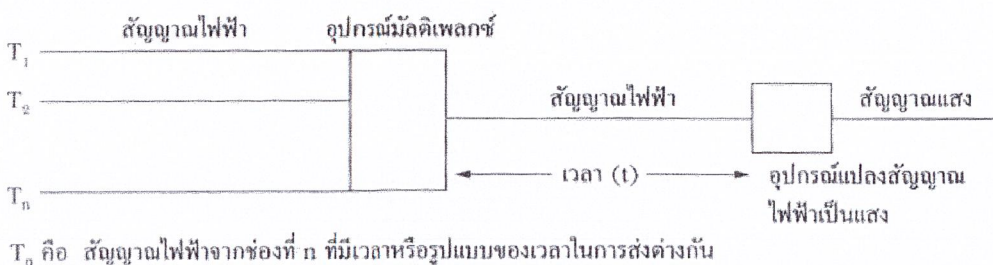
รูปที่ 2.8 การมัลติเพลกซ์แบบแบ่งระยะทาง

2. การมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiplexing) เป็นระบบที่ใช้กับการสื่อสารใยแก้วนำแสงที่มีการส่งสัญญาณจำนวนมาก โดยก่อนส่งไปนั้นจะถูกทำการมัลติเพลกซ์ในขั้นตอนของการแปลงเป็นสัญญาณแสงเป็นไฟฟ้าก่อนการส่งสัญญาณ



รูปที่ 2.9 การมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความถี่

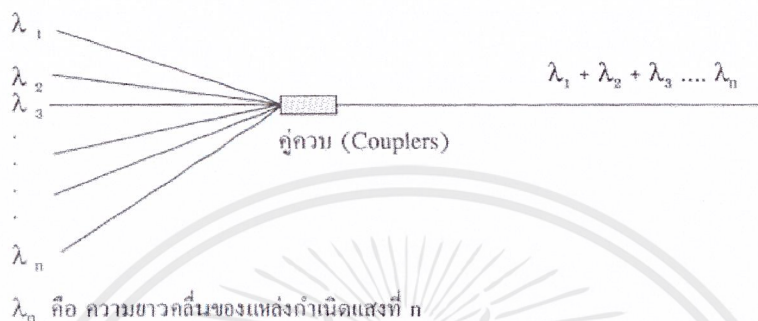
3. การมัลติเพลกซ์แบบแบ่งเวลา (Time Division Multiplexing) มีหลักการเช่นเดียวกันกับการมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความถี่ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้สำหรับการส่งสัญญาณแบบดิจิทัล



รูปที่ 2.10 การมัลติเพลกซ์แบบแบ่งเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing) เป็นวิธีการส่งสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันจำนวนมากในใยแก้วนำแสงหนึ่งเส้น ข้อดีคือสัญญาณไฟฟ้าที่ส่งไปกับความยาวคลื่นแต่ละความยาวคลื่นไม่ว่าจะเป็นแบบแอนะล็อกหรือดิจิทัลสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยง่าย



รูปที่ 2.11 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น

2.5 การมัลติเพล็กซ์

การมัลติเพล็กซ์เป็นวิธีที่สามารถส่งและรับข้อมูลจากแหล่งต่างๆ จำนวนมากได้โดยอยู่ในรูปช่วงเวลาและตัวกลางเดียวกัน การสื่อสารใยแก้วนำแสงนับว่ามีประโยชน์มาก ทั้งนี้เพราะเป็นระบบที่มีช่วงของแบนด์วิดท์ที่กว้างมาก ดังนั้นหากมีการนำระบบมัลติเพล็กซ์ที่มีประสิทธิภาพสูงมาใช้ร่วมกันก็ย่อมทำให้สามารถสื่อสารข้อมูลจำนวนมากได้ภายในช่วงเวลาเดียว ระบบมัลติเพล็กซ์ที่ใช้กันอยู่พอจำแนกได้ดังนี้คือ

2.5.1 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา (Time Division Multiplexing , TDM)

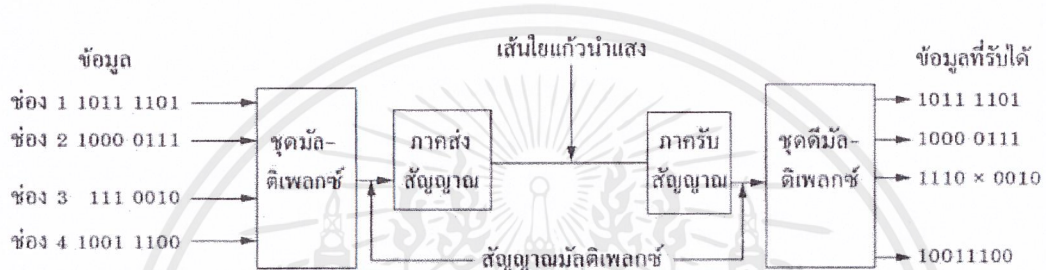
ระบบที่ใช้สื่อสารที่มีการแบ่งเวลาเป็นช่วงๆ โดยในแต่ละช่วงจะใช้สำหรับการบรรจุข้อมูลที่มาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ต่างๆ เรียงกันไป ในรูปที่ 2.12 (ก) เป็นการทำงานของวิธีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลาที่ต้องการส่งข้อมูลจาก 4 ช่องสัญญาณพร้อมกัน โดยในแต่ละช่องสัญญาณจะส่งข้อมูลเป็นคำๆ ละ 4 บิต ข้อมูลทั้ง 4 ช่องจะถูกเลือกด้วยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่คล้ายสวิตช์ เชื่อมระหว่างภาคส่งและภาครับอย่างสัมพันธ์กัน โดยมีสัญญาณซิงโครไนซ์ (Synchronize) คอยควบคุม ระยะเวลาที่ใช้สำหรับรับส่งข้อมูลในแต่ละช่องต้องเท่ากันและต้องมีช่วงเวลาพอที่จะส่งข้อมูลทั้งคำหรือ 4 บิตได้ เมื่อเริ่มต้นทำงานสวิตช์เลื่อนไปครบ 1 รอบ ข้อมูลที่เป็นคำแรกของทุกช่องสัญญาณจะถูกส่งไปยังภาครับทั้ง 4 ช่อง ชุดของข้อมูลที่ส่งไปในหนึ่งรอบนี้เรียกว่า เฟรม ดังแสดงด้วยไทม์มิงไดอะแกรมในรูปที่ 2.12 (ข) ในแต่ละเฟรมของข้อมูลควรมีสัญญาณอื่นแทรกไว้เพื่อคอยบอกให้ทราบว่ามีข้อมูลหมดเฟรมแล้ว ซึ่งภาครับจะได้เตรียมตัวสำหรับสัญญาณในเฟรมใหม่ต่อไป ในทางปฏิบัติสัญญาณข้อมูลอินพุตอาจถูกมอดูเลตและเข้ารหัสด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง ซึ่งจะได้อีกต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

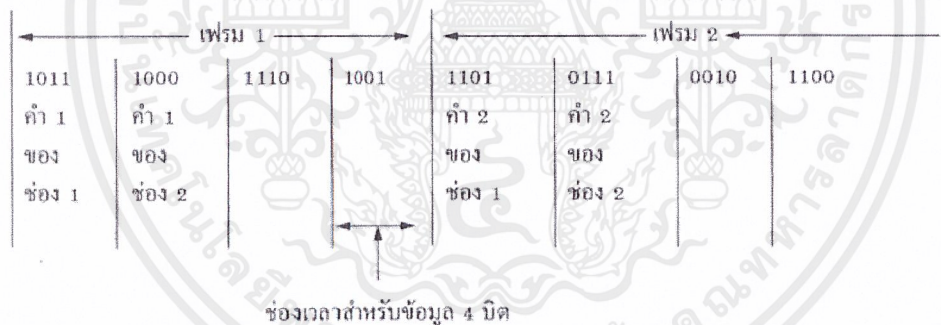
จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปเก็บไว้ในวงจรบัฟเฟอร์ (Buffer) สำหรับพักข้อมูล และรอเวลาในระบบมัลติเพลกซ์ ดังนั้นระบบการแบ่งเวลาจึงเหมาะสำหรับข้อมูลที่มีอัตราการส่งช้า โดยจะช่วยให้สามารถส่งข้อมูลได้พร้อมกันหลายช่องด้วยระบบมัลติเพลกซ์ที่มีอัตราการส่งข้อมูลรวมสูงมาก อัตราการส่งข้อมูล (B_d) ของระบบมัลติเพลกซ์นั้นสามารถคำนวณได้จาก

$$B_d = C_h \times T_b \quad (2.18)$$

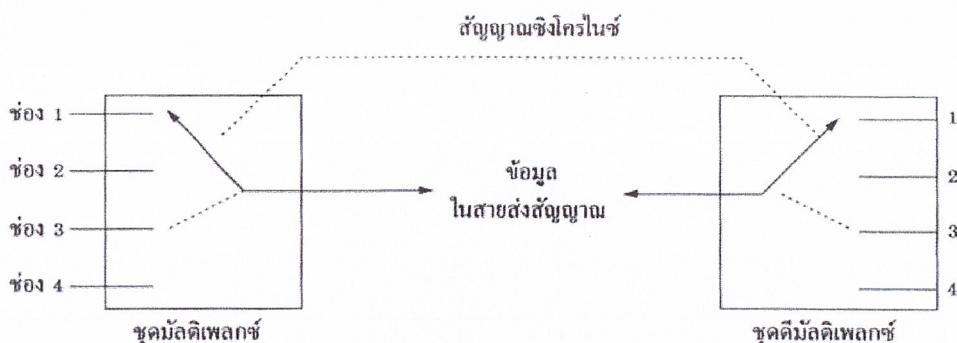
เมื่อ C_h และ T_b คือจำนวนช่อง และอัตราการส่งแต่ละช่อง



(ก) ลักษณะการมัลติเพลกซ์



(ข) การส่งเฟรม



(ค) การชิงโครโมโซม

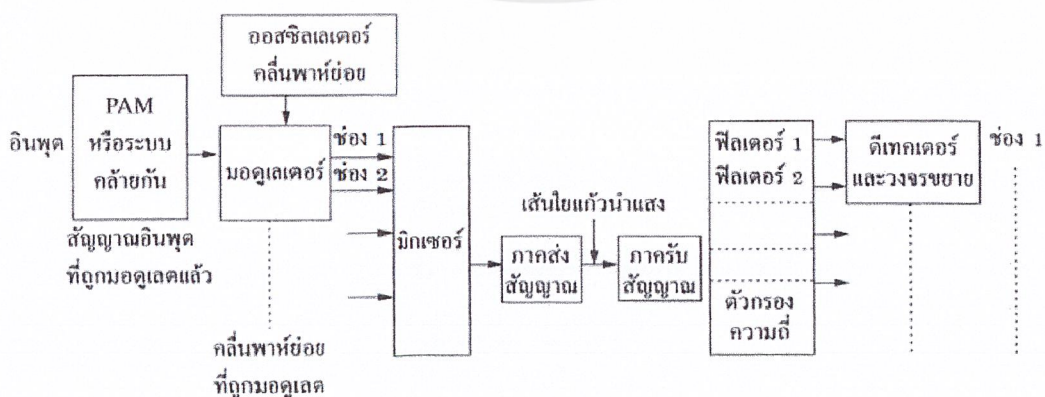
รูปที่ 2.12 แสดงการทำงานของระบบมัลติเพลกซ์แบบแบ่งเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างเช่นเราต้องการส่งข้อมูลจำนวน 8 ช่องสัญญาณพร้อมกัน โดยในแต่ละช่องสัญญาณมีอัตราการส่งข้อมูล 1,000 ไบต์ต่อวินาที หรือ 8,000 บิตต่อวินาที (1 ไบต์มี 8บิต) สามารถใช้ระบบมัลติเพล็กซ์ชนิดการแบ่งเวลาที่มื่ออัตราการส่งข้อมูล $8 \times 8,000 = 64$ กิโลบิตต่อวินาทีได้

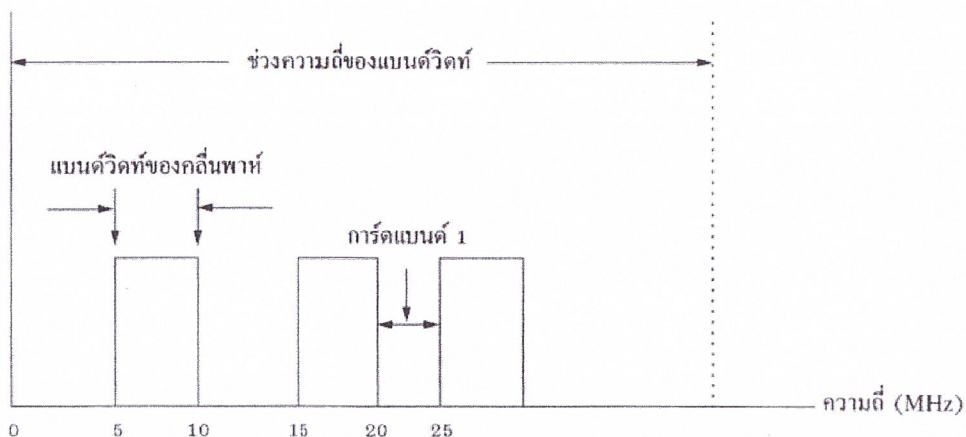
2.5.2 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiplexing , FDM)

ระบบมัลติเพล็กซ์ที่แบ่งช่วงความถี่ของสัญญาณส่งออกเป็นช่วงความถี่ย่อย เพื่อทำหน้าที่เป็นพาหะย่อยของข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณ ดังแสดงด้วยบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.13 สมมติว่าระบบเส้นใยแก้วนำแสงมีช่วงแบนด์วิธหรือความถี่มากที่สุดสัญญาณเป็น 100 เมกะเฮิร์ตซ์ เราอาจแบ่งช่วงความถี่ดังกล่าวออกเป็นช่วงความถี่ย่อยที่มีขนาด 5 เมกะเฮิร์ตซ์ ช่วงความถี่ย่อยนี้จะถูกใช้สำหรับการมอดูเลตสัญญาณอินพุตในแต่ละช่องนั้น ระยะระหว่างแต่ละความถี่ย่อยในแต่ละช่วงจะถูกกันด้วยช่วงความถี่ป้องกันหรือการด์แบนด์ (Guard Band) เพื่อมิให้สัญญาณมีการปะปนกัน (ดูรูปที่ 2.14) สัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้วทั้งหมดจะถูกจัดเรียงเป็นระเบียบและถูกส่งรวมกันไปในระบบ การแบ่งความถี่นั้นสัญญาณอินพุตอาจต้องทำการผสมสัญญาณหรือมอดูเลตถึง 3 ขั้นตอน กล่าวคือ ขั้นตอนแรกเป็นการเข้ารหัสสัญญาณอินพุตที่เป็นแอนะล็อกให้เป็นดิจิทัล (เช่นระบบ Pulse Amplitude Modulation ,หรือ PAM และ Pulse Code Modulation หรือ PCM) จากนั้นสัญญาณที่เข้ารหัสแล้วจะถูกมอดูเลตกับคลื่นพาห่อย่อยแบบ เอเอ็ม (Amplitude Modulation , AM) หรือ เอฟเอ็ม (Frequency Modulation , FM) ในขั้นตอนที่สองและขั้นตอนสุดท้ายเป็นการรวมสัญญาณทั้งหมดที่ถูกมอดูเลตในแต่ละช่องสัญญาณเข้าด้วยกัน เพื่อให้แหล่งกำเนิดแสงใช้ส่งเป็นข้อมูลได้ที่ภาครับของระบบการแบ่งความถี่ อุปกรณ์รับสัญญาณจะแปลงสัญญาณไฟฟ้าของคลื่นความถี่ที่ส่งออกมาแล้วผ่านเข้าไปในวงจรกรองความถี่ที่เหมาะสม เช่น จากตัวอย่างข้างต้นอาจใช้วงจรกรองในช่วงความถี่ 5-10 ,15-20 เมกะเฮิร์ตซ์ เป็นต้น ข้อมูลสัญญาณที่ถูกกรองแล้วจะถูกดีมอดูเลตเพื่อทำให้กลับคืนสู่รูปสัญญาณเดิมอีกครั้งหนึ่งในแต่ละช่องสัญญาณก่อนนำไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 2.13 แสดงการทำงานของระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

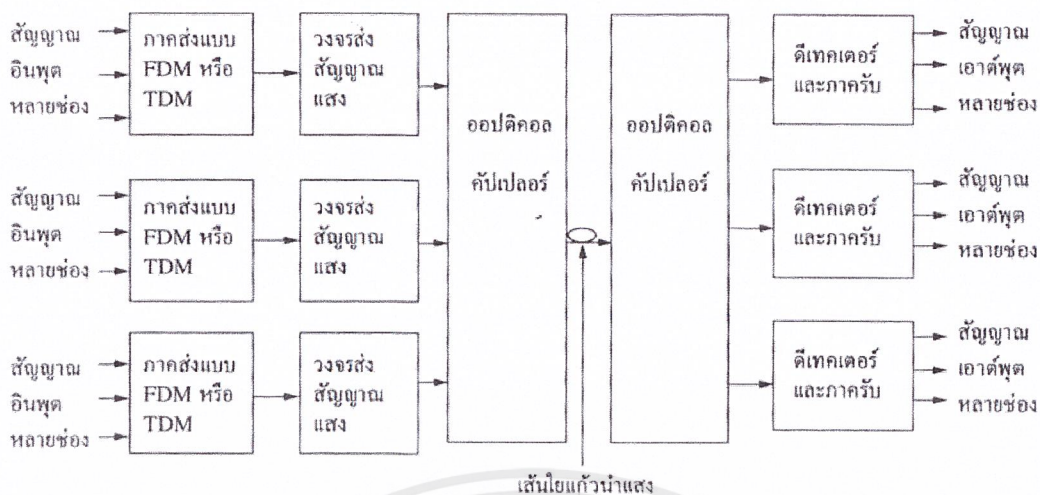


รูปที่ 2.14 แสดงช่วงคลื่นพาหะย่อยในแต่ละช่องสัญญาณของการมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความถี่

ปัญหาการใช้งานระบบการแบ่งความถี่จะเกิดขึ้นในขณะที่มีการผสมคลื่นพาหะย่อยทั้งหมดเข้าด้วยกัน โดยใช้อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เพราะสามารถทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่เรียกว่าครอสทอล์ก (Crosstalk) ขึ้นได้ง่าย การแก้ไขทำได้ด้วยวิธีทางแสงโดยการสร้างสัญญาณแสงของข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณก่อนจากนั้นทำการรวมสัญญาณแสงทั้งหมดให้เป็นสัญญาณเดียวกันด้วยอุปกรณ์ทางแสงที่เรียกว่าคัปเลอร์ หรือคัปเปออร์ (Coupler) ทำให้ได้สัญญาณแสงรวมส่งไปยังผู้รับ ลักษณะของสัญญาณแสงนี้อาจใช้ระดับความเข้มแสงช่วยกำหนดชนิดของข้อมูล

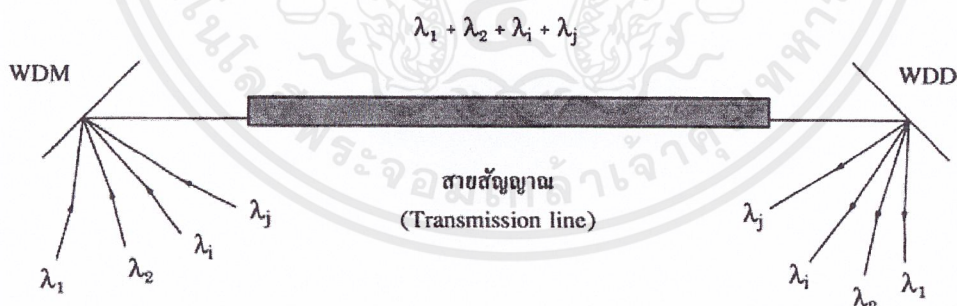
2.5.3 การมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing, WDM)

เป็นระบบมัลติเพลกซ์ที่ใช้คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันเป็นพาหะนำข้อมูล โดยแสงทั้งหมดจะถูกรวมกันก่อนส่งออกด้วยออปติคอลลคัปเปออร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นค่าหนึ่งจะสามารถบรรจุข้อมูลได้หนึ่งชุด และข้อมูลแต่ละชุดนี้อาจเป็นข้อมูลจำนวนมากที่มาจากหลายช่องสัญญาณได้เพราะกาจัดระบบข้อมูลสามารถเลือกใช้ระบบการแบ่งเวลา หรือการแบ่งความถี่ก็ได้มาทำการมอดูเลตกับคลื่นแสงที่เป็นตัวนำส่งข้อมูลและเนื่องจากสัญญาณคลื่นแสงที่มีค่าความยาวคลื่นต่างกันยอมให้สีที่ต่างกัน บางครั้งระบบการแบ่งความยาวคลื่นจะถูกเรียกว่า ระบบการผสมสีของแสง



รูปที่ 2.15 แสดงการทำงานของระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing : WDM) เป็นการรวมแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน ให้เดินทางไปในเส้นใยนำแสงหนึ่งเส้นพร้อมๆกัน ในเวลาเดียวกัน โดยสัญญาณข้อมูลต่างๆจะถูกมอดูเลตเข้ากับแสงแต่ละความยาวคลื่น และใช้อุปกรณ์ทางแสงในการมัลติเพล็กซ์ (Multiplexing) และดีมัลติเพล็กซ์ (Demultiplexing) เช่น คู่ควบแสง (Coupler) เกรตติง (Grating) ปริซึม (Pism) ระบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นแสดงได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น

จากรูปที่ 2.16 นั้น ความยาวแสงหลายความยาวคลื่นจะถูกส่งเข้าไปพร้อมๆกันด้วยอุปกรณ์การรวมสัญญาณซึ่งเรียกว่า การมัลติเพล็กซ์ (WDM) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ปริซึมรวมแสงในการรวมสัญญาณ และส่งกำลังแสงเข้าสู่สายส่งสัญญาณ (Transmission line) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เส้นใยนำแสง แสงที่ออกจากปลายทางจะถูกแยกออกตามความยาวคลื่นด้วยเกรตติง เรียกว่า การดีมัลติเพล็กซ์ (Wavelength Division Demultiplexing:WDD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการมัลติเพล็กซ์เชิงแสงแล้วส่งไปในสายส่ง สัญญาณจะเกิดการสูญเสียกำลังทางแสงที่ความยาวคลื่น λ_j ดังนี้

$$P_j = 10 \log \left(\frac{\phi_j}{\phi_0} \right) \quad (2.19)$$

เมื่อ ϕ_j คือ กำลังแสงหลังผ่านตัวกลาง

ϕ_0 คือ กำลังแสงก่อนเข้าไปในตัวกลาง

P_j คือ กำลังแสงที่สูญเสีย มีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB)

สัญญาณมัลติเพล็กซ์จะมีการรบกวนทางแสงอันเนื่องมาจาก ผลต่างของความยาวคลื่น หรือเกิดสัญญาณรบกวนข้ามช่อง (Crosstalk) โดยที่แต่ละช่องสัญญาณ D_{ij} จะเกิดการรบกวนของช่องสัญญาณ i บนช่องสัญญาณ j คือ

$$D_{ij} = 10 \log \left(\frac{\phi_{ij}}{\phi_j} \right) \quad (2.20)$$

เมื่อ ϕ_{ij} คือ กำลังแสงของช่องสัญญาณ i ที่ความยาวคลื่น λ_j ในช่อง j

ϕ_j คือ กำลังแสงของช่องสัญญาณ j ที่ความยาวคลื่น λ_j ในช่อง j

ผลรวมของการรบกวนของสัญญาณจากช่องต่างๆ ในช่องสัญญาณ j คือ

$$D_j = 10 \log \left(\sum_{i \neq j} \frac{\phi_{ij}}{\phi_j} \right) \quad (2.21)$$

ข้อดีของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น

1. เพิ่มแบนด์วิธของการส่งผ่านข้อมูลผ่านของเส้นใยนำแสง ในการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นจะเป็นการเพิ่มช่องสัญญาณลงบนเส้นใยนำแสงเดิมที่มีอยู่ ทำให้เส้นใยนำแสงเดิมมีความสามารถในการส่งผ่านข้อมูลได้สูงขึ้น
2. ขั้นตอนการมัลติเพล็กซ์ไม่ถูกจำกัดด้วยขีดความสามารถของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากในขั้นการการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น จะใช้เทคนิคทางแสง

และอุปกรณ์ทางแสงเป็นตัวดำเนินการ ซึ่งแตกต่างจากการมัลติเพล็กซ์ด้วยวิธีอื่นๆที่จะใช้อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวดำเนินการ ทำให้ความสามารถในการมัลติเพล็กซ์ถูกจำกัดขีดความสามารถของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

3. ลดค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงระบบ การใช้เทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นในการปรับปรุงระบบให้มีขีดความสามารถในการส่งผ่านข้อมูลที่สูงขึ้นจะมีค่าใช้จ่ายที่ไม่สูงมาก เนื่องจากวิธีนี้สามารถใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเส้นใยนำแสงเดิมได้ ซึ่งต่างจากวิธีอื่นๆที่จำเป็นต้องเปลี่ยนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเพิ่มจำนวนเส้นใยนำแสง

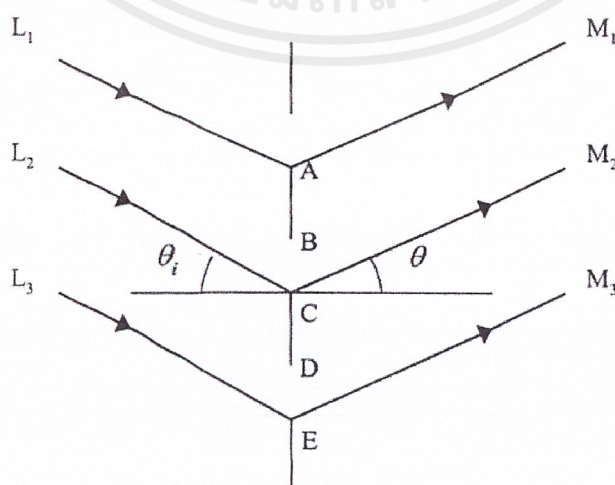
การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นแบบหนาแน่น (Dense WDM)

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นแบบหนาแน่นนี้เป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์ที่พัฒนาจากการการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นแบบเดิม ให้มีจำนวนของช่องสัญญาณเพิ่มขึ้น โดยการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นที่มีจำนวนความยาวคลื่นตั้งแต่ 32 ความยาวคลื่นขึ้นไป จะเรียกว่า “การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นแบบหนาแน่น”

ในระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นแบบหนาแน่นที่มีระยะในการส่งผ่านข้อมูลเป็นระยะทางยาวๆ จะมีการขยายสัญญาณแสงด้วยเส้นใยนำแสงที่ได้ไปด้วยเออร์เบียม (Erbium Dope Fiber Amplifier , EDFA) หรือด้วยเส้นใยนำแสงที่ได้ไปด้วยทอเรียม (Thorium Dope Fiber Amplifier , TDFA) แทนการขยายสัญญาณด้วยวิธีการอิเล็กทรอนิกส์

เกรตติงสำหรับการมัลติเพล็กซ์

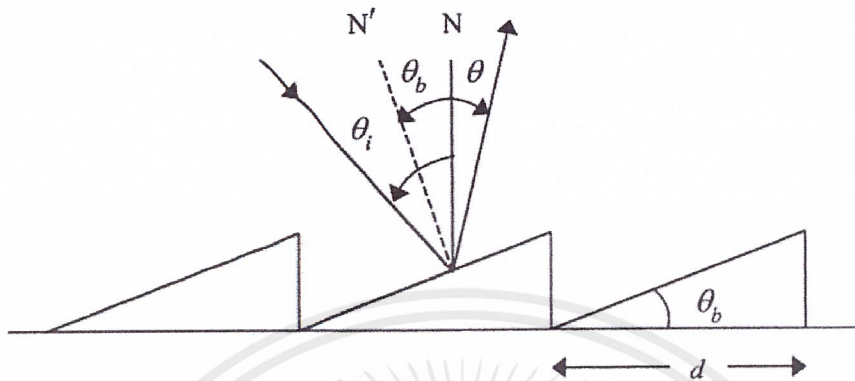
เกรตติงสำหรับการมัลติเพล็กซ์อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ เกรตติงชนิดทะลุผ่าน (Transmission grating) และเกรตติงชนิดสะท้อนแสง (Reflection grating) โดยมีลักษณะ ดังรูปที่ 2.17 และ 2.18 ตามลำดับ



รูปที่ 2.17 แสดงเกรตติงชนิดทะลุผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.17 กำหนดให้ระยะ AC หรือ CE คือระยะห่างของช่องเกรตติง แทนระยะ AC หรือ CE ด้วย d มีมุมตกกระทบและมุมสะท้อนแสงคือ θ_i และ θ ตามลำดับ แนวรังสี L_2 ถึง M_2



รูปที่ 2.18 แสดงเกรตติงชนิดสะท้อน

จากรูปที่ 2.18 มีมุมตกกระทบและมุมสะท้อนของแสง คือ θ_i และ θ มี θ_b คือ มุมของลิ้มเกรตติง และมีฐานลิ้มยาว d และเส้นปกติ $N'N$ กำหนดให้ λ คือ ความยาวของคลื่นแสงที่ตกกระทบเกรตติง ที่จะได้สมการแสดงเงื่อนไขของการเกิดอันดับของแถบสว่าง k ใดๆ สำหรับเกรตติงชนิดทะลุผ่านและเกรตติงชนิดสะท้อนแสงดังสมการที่ (2.22) และ (2.23) ตามลำดับ

$$k\lambda = d[\sin \theta_i + \sin \theta] \quad (2.22)$$

$$k\lambda = d[\sin \theta_i + \sin(2\theta_b - \theta_i)] \text{ เมื่อ } \theta_b = \frac{(\theta_i - \theta)}{2} \quad (2.23)$$

การแยกของเกรตติง (Resolution of grating)

การแยกของเกรตติง หมายถึง ความสามารถในการทำให้เส้นสเปกตรัมในอันดับเดียวกันของความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกันอยู่ห่างกันอย่างชัดเจน แสดงตามสมการ ดังนี้

$$R = mN \quad (2.24)$$

จากสมการ (2.24) บอกให้ทราบถึงการแยกว่าขึ้นกับอันดับของแถบสว่าง m ใดๆ และจำนวนช่องของเกรตติง N ต่อหน่วยความยาว สำหรับเกรตติงอันดับหนึ่งการแยกจะขึ้นกับอันดับของแถบสว่างอย่างเดียว ในทำนองเดียวกันที่อันดับใดๆ การแยกก็จะขึ้นกับจำนวนช่องของเกรตติงอย่างเดียวเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 อุปกรณ์ตรวจวัดแสง

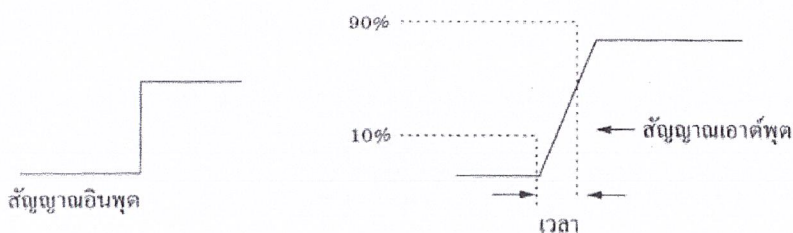
หลักการทั่วไปของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงอาศัยกลไก 2 แบบคือ เอกซ์เทอร์นัลโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (External Photoelectric Effect) ซึ่งเป็นกลไกซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากอิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยแสงจากผิวของโลหะเมื่อมีแสงหรือโฟตอนตกกระทบลงบนผิวโลหะนั้น ตัวอย่างของอุปกรณ์ชนิดนี้คือ โฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier) และอินเทอร์นัลโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (Internal Photoelectric Effect) เป็นกลไกซึ่งเกิดขึ้นที่ในรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Junction) โดยโฟตอนที่ถูกดูดกลืนที่บริเวณรอยต่อดังกล่าวทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล (Electron-Hole Pair) ขึ้น ตัวอย่างของอุปกรณ์รับแสงชนิดนี้คือ พีเอ็นจังก์ชันโฟโตไดโอด (PN Junction Photodiode, PIN Photodiode) และอวาแลนซ์โฟโตไดโอด (Avalanche Photodiode) ก่อนที่จะได้ทราบรายละเอียดของอุปกรณ์รับแสงแต่ละชนิดนั้นก็ควรจะได้ทราบถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญบางตัวของอุปกรณ์รับแสง โดยทั่วไปก่อนดังนี้

$$\text{Responsivity } (\rho) = \frac{I_o}{I_i} \quad (2.25)$$

เมื่อ ρ คือ ค่าตอบสนองที่หน่วยเป็นแอมแปร์ต่อวัตต์ I_i และ I_o คือกำลังแสงอินพุต และเอาต์พุต โดยสเปกตรัมเรสปอนส์ (Spectral Response) หมายถึง ช่วงความถี่ที่อุปกรณ์รับแสงสามารถตอบสนองแสงที่มาจากกระทบ ไรซ์ไทม์ (Rise Time, t_r) หมายถึง ช่วงเวลาที่เอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงจาก 10% ไปเป็น 90% ของค่าสุดท้ายของการเปลี่ยนแปลง กรณีที่กำลังทางด้านอินพุตมีลักษณะเป็นพัลส์นั้นจะมีค่าไรซ์ไทม์ของอุปกรณ์รับแสงจะมีความสัมพันธ์กับ 3 dB แบนด์วิดท์ตามสมการ

$$f_{3\text{-dB}} = 0.35/t_r \quad (2.26)$$

เมื่อ $f_{3\text{-dB}}$ คือ แบนด์วิดท์ของอุปกรณ์รับแสง

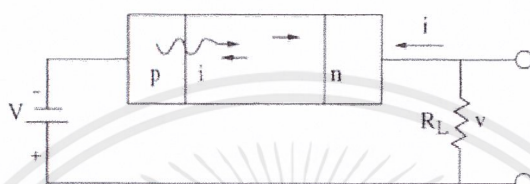


รูปที่ 2.19 แสดงไรซ์ไทม์ของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พินโฟโตไดโอด

เป็นอุปกรณ์รับแสงที่นิยมใช้กันเป็นอย่างมากในการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง หลักการทำงานของพินโฟโตไดโอดจะคล้ายคลึงกับของพีเอ็นโฟโตไดโอด แต่พินโฟโตไดโอดได้รับการปรับปรุงให้มีชั้นอินทรีนิก(ส่วนที่ไม่มีอนุภาคอยู่ภายใน) ที่กว้าง จึงเท่ากับเพิ่มโอกาสให้เกิดอนุภาคตัวนำ (Electron and Hole) หรือกระแสไหลในวงจรมายนอกได้มากขึ้นนั่นเอง ซึ่งนอกจากจะทำให้การตอบสนองสูงขึ้นแล้วยังทำไรซ์ไทม์ก็สั้นลงอีกด้วย

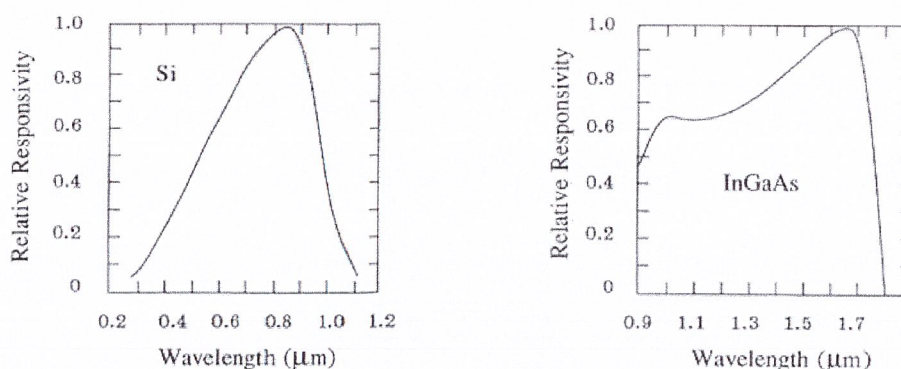


รูปที่ 2.20 แสดง โครงสร้างของพินโฟโตไดโอด

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าต่างๆ ของพินโฟโตไดโอด

Material	Wavelength Range (μm)	Wavelength of Peak Response (μm)	Peak Responsivity (A/W)
Silicon	0.3-1.1	0.8	0.5
Germanium	0.5-1.8	1.55	0.7
InGaAs	1.0-1.7	1.7	1.1

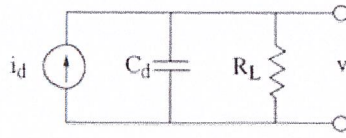
จากตารางแสดงสารชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทำงานพินโฟโตไดโอด โดยสารแต่ละชนิดจะเหมาะกับการรับสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันดูรูปที่ 2.21 ประกอบ



รูปที่ 2.21 แสดงสเปกตรัมเรสปอนส์ของพินโฟโตไดโอด ซึ่งทำมาจาก Si และ InGaAs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากโครงสร้างของฟิโนโตไดโอดสามารถเขียนแทนได้ด้วยวงจรสมมูล (Equivalent Circuit) ดังรูปที่ 2.22 ดังนั้นค่าไรซ์ไทม์ของฟิโนโตไดโอดอาจเขียนได้เป็น



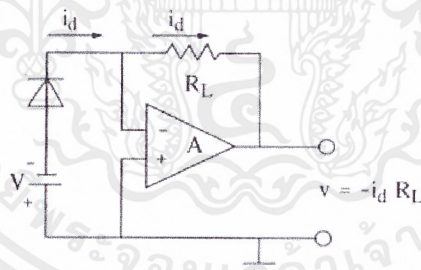
รูปที่ 2.22 แสดงวงจรสมมูล

$$t_r = 2.99R_L C_d \quad (2.27)$$

ซึ่งสัมพันธ์กับแบนด์วิธของอุปกรณ์รับแสงดังนี้

$$f_{3\text{-dB}} = 1/(2\pi R_L C_d) \quad (2.28)$$

จากสมการจะเห็นว่าความต้านทาน R_L และค่าความจุ C_d มีส่วนในการกำหนดค่าแบนด์วิธของอุปกรณ์รับแสง (ดูรูปที่ 2.23 ประกอบ)

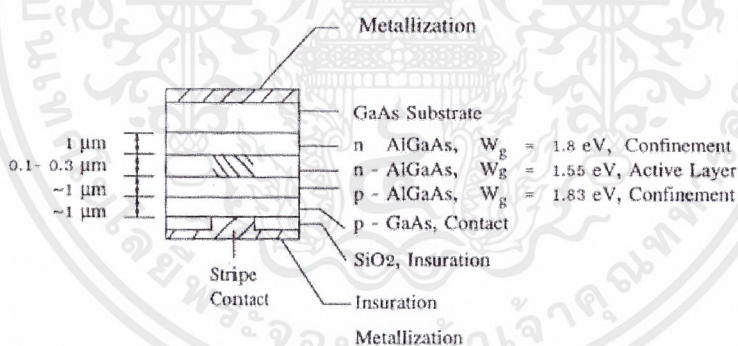


รูปที่ 2.23 แสดงวงจรของฟิโนโตไดโอด

หลักการทำงานก็คือ เมื่อฟิโนโตไดโอดถูกไบแอสแล้ว หลังจากนั้นเมื่อได้รับแสงก็จะทำให้เกิดกระแส I_d ไหลในวงจร โดยที่กระแสนี้จะถูกขยายโดยใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Op-amp) ที่สัมพันธ์กับค่าความต้านทานป้อนกลับ R_L

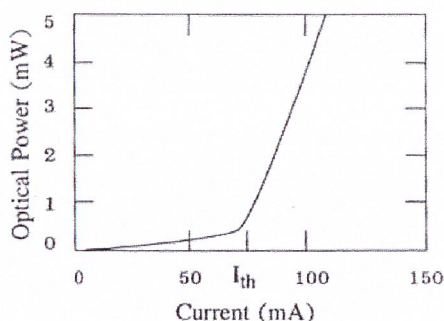
2.7 ไดโอดเลเซอร์

LD และ LED มีรูปทรงคล้ายคลึงกัน โครงสร้างของไดโอดเลเซอร์ชนิด AlGaAs แสดงดังรูป 2.24 เมื่อทำการไบแอสไปข้างหน้านั้นประจุจะถูกปลดปล่อยเข้าไปในชั้นแอคทีฟ (Active Layer) ที่ซึ่งเกิดการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้มีการปลดปล่อยโฟตอนออกมาทันที ประจุบางส่วนถูกกระตุ้นให้ปล่อยโฟตอน โดยโฟตอนตัวอื่น ถ้าความหนาแน่นของกระแสมีค่าสูงพอประจุจำนวนมากที่ปล่อยเข้าไปทำให้มีการกระตุ้น และทำให้เกิดการรวมแล้วอัตราการขยายทางด้านแสงจะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการขยายมากเพียงพอที่จะหักล้างการสูญเสียในไดโอดได้ก็จะทำให้เกิดกระแสขีดเริ่ม (Threshold Current) ถึงจุดนี้ก็จะเกิดการออสซิลเลตของเลเซอร์ เพื่อที่จะไม่ให้เกิดอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำเกินขีดจำกัด ดังนั้นจะต้องรักษาระดับของกระแสขีดเริ่มเปลี่ยนให้น้อยเข้าไว้โดยเฉพาะอย่างยิ่งจุดเริ่มเปลี่ยนที่มีค่าต่ำนั้นจะช่วยจำกัดการปล่อยประจุและคลื่นแสงเข้าไปในชั้นแอคทีฟ โดยเฮเทอโรจังก์ชัน (Heterojunction) โดยการจำกัดขอบเขตของประจุในทิศทางแนวตั้ง ส่วนการจำกัดขอบเขตในทิศทางที่ขนานกับรอยต่อทำโดยปล่อยประจุที่ความกว้างเล็กๆ ของสตริป (Stripe) ประมาณ 10-20 μm และขณะที่เคลื่อนที่เข้าไปในชั้นของการรวมตัว ความยาวคลื่นเอวท์พุทคำนวณได้จากช่องว่างพลังงานคือ 1.55 eV ของบริเวณแอคทีฟที่มีค่าเท่ากับ 0.8 μm สำหรับ LD แสดงได้ดังรูปที่ 2.24



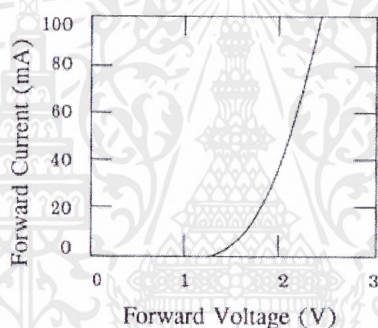
รูปที่ 2.24 แสดงไดโอดเลเซอร์ชนิด AlGaAs

คุณลักษณะของค่ากำลังทางด้านแสงเอวท์พุทกับกระแสอินพุทของไดโอดเลเซอร์ ดังรูปที่ 2.25 กระแสขีดเริ่มเปลี่ยนค่าเป็น 75 mA โดยที่ระดับต่ำกว่านี้ค่ากำลังจะเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย การแพร่กระจายของแสงไม่อาพันธ์ (Noncoherent) เกิดจากการปล่อยอย่างทันทีทันใดของประจุในชั้นของการรวมตัว (Recombination Layer) ไดโอดส่วนใหญ่จะมีกระแสขีดเริ่มเปลี่ยนเริ่มต้นจาก 30-35 mA



รูปที่ 2.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของไดโอดเลเซอร์สัมพันธ์กับกระแสไบแอส

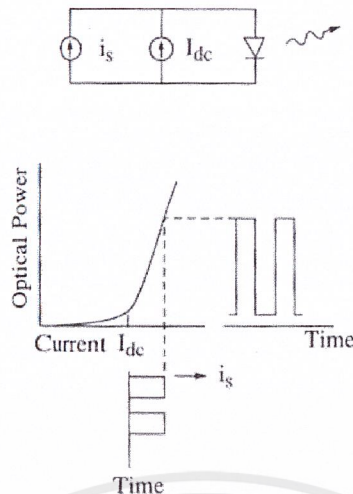
และค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนอยู่ในช่วง 1.2-2.0 V กระแสไบแอสข้างหน้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อแรงดันตกคร่อมไดโอดเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 3.25 ดังนั้น การเพิ่มแรงดันเพียงเล็กน้อยจากค่าขีดเริ่มเปลี่ยนจะทำให้มีกระแสเกิดขึ้นที่จุดทำงาน



รูปที่ 2.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ไปข้างหน้าของไดโอดเลเซอร์

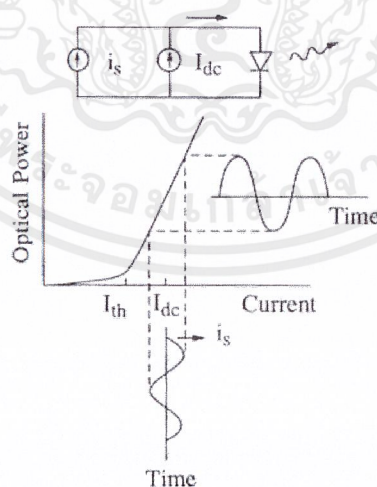
โดยทั่วไปกำลังเอาต์พุตของเลเซอร์ที่ทำงานอย่างต่อเนื่องมีค่าปกติในช่วง 1-10 mW พัลส์เลเซอร์ทำงานที่คิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ต่ำนั้นสามารถให้ค่ายอดของกำลังที่สูงกว่าเลเซอร์ต่อเนื่อง (CW) ที่สามารถเปิด-ปิดในอัตราสูงจะมีประโยชน์อย่างมากสำหรับระบบการใช้งาน ช่วงกระแสทำงานโดยปกติอยู่สูงกว่ากระแสขีดเริ่มเปลี่ยนประมาณ 20-40 mA การทำงานที่กระแสสูงกว่าที่กำหนดจะทำให้ไดโอดมีช่วงอายุการใช้งาน (Lift Time) ที่สั้น

ดิจิทัลมอดูเลชันของ ไดโอดเลเซอร์แสดงดังรูปที่ 2.27 ซึ่งแตกต่างจากของ LED ที่กล่าวมาแล้ว



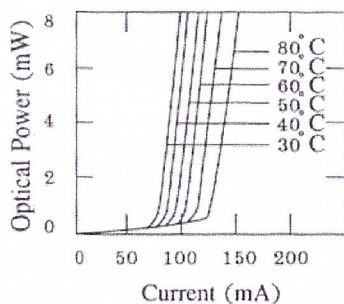
รูปที่ 2.27 แสดงการมอดูเลตแบบดิคิตอลนั้นมี I_{dc} เป็นกระแสจิดเริ่มเปลี่ยนเมื่อกระแส i_s เป็นศูนย์ สำหรับสำหรับแอนะล็อกมอดูเลชัน

ในรูปที่ 2.28 พบว่ากระแสไบแอสอยู่สูงกว่ากระแสจิดเริ่มเปลี่ยนที่บริเวณเชิงเส้นของความสัมพันธ์กำลังและกระแสไบแอส ไดโอดเลเซอร์มีความไวต่ออุณหภูมิมากกว่า LED ดังแสดงในรูปที่ 2.29 ขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่ากระแสจิดเริ่มก็มากขึ้นด้วย (เพิ่มขึ้นประมาณ $1.5\% / ^\circ\text{C}$) ดังนั้นที่กระแสจิดที่กำลังเอาท์พุทจะลดลงถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 2.28 แสดงการมอดูเลตแบบแอนะล็อกของไดโอดเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเลเซอร์กับอุณหภูมิ

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณลักษณะของแหล่งกำเนิดแสงแบบสารกึ่งตัวนำ

Property	LED	Multimode Laser Diode	Single-Mode Laser Diode
Spectral Width (nm)	20-100	1-5	<0.2
Rise Time(ns)	2-2.5	0.1-1.0	0.05-1.0
Modulation Bandwidth (MHz)	<300	2000	6000
Coupling Efficiency	Very Low	Moderate	High
Compatible Fiber	Multimode Si Multimode GRIN	Multimode GRIN Single-mode	Single-mode
Temperature Sensitivity	Low	High	High
Circuit Complexity	Simple	Complex	Complex
Lift Time (Hours)	10^5	10^4 - 10^5	10^4 - 10^5
Costs	Low	High	Highest
Primary Use	Moderate Paths Moderate Data Rates	Long Path High Data Rates	Very Long Path Very High Rates

ในกรณีการเปลี่ยนแปลงกำลังอาจยอมรับไม่ได้ เพราะทำให้การรับข้อมูลผิดพลาดมากขึ้น ถ้ากำลังลดลงมากอาจรับสัญญาณไม่ได้ ในการแก้ปัญหาเหล่านี้มีอยู่ 2 วิธีคือ ควบคุมอุณหภูมิของไดโอดให้คงที่และเปลี่ยนกระแสไบแอสเพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงกระแสขีดเริ่มเปลี่ยน โดยวิธีการควบคุมอุณหภูมิจะใช้รอยต่อของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งการเปลี่ยนอุณหภูมิขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสที่ไหลผ่านไดโอดเทอร์มิสเตอร์ (Thermistor) เป็นส่วนหนึ่งของวงจรควบคุมที่ใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์โดยไม่ผ่านการอนุญาตจากผู้จัดทำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

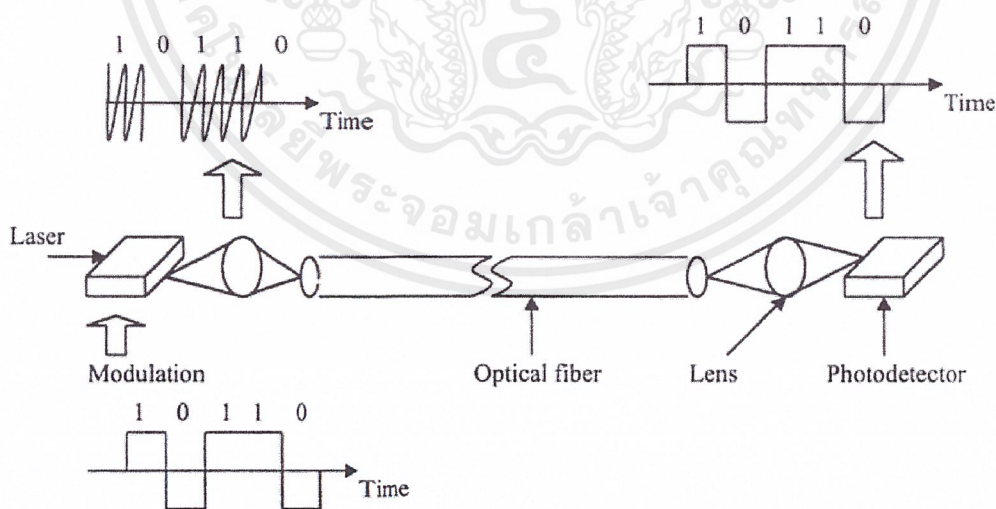
เปลี่ยนกระแสที่ไหลผ่านสารกึ่งตัวนำเพื่อให้อุณหภูมิของไดโอดเสถียร อีกวิธีการหนึ่งเพื่อให้กำลังเสถียรคือ อุปกรณ์รับแสงรับสัญญาณย้อนกลับมายังเลเซอร์แล้วทำการเปลี่ยนค่ากระแสตรงไปสู่ค่ากำลังที่ต้องการ

นอกจากแหล่งกำเนิดแสงไดโอดเลเซอร์ข้างต้นแล้ว ก็ยังมีไดโอดเลเซอร์อีกบางประเภทที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน แต่สามารถเพิ่มกำลังของแหล่งกำเนิดแสงได้ โดยปรับโครงสร้างของไดโอดเลเซอร์ให้มีชั้นอินทรินสิก (Intrinsic) ที่เจือปนสารกึ่งตัวนำ โดยเรียกว่าไดโอดเลเซอร์ประเภทฉีดไอแอลดี (Injection Laser Diode,ILD) ซึ่งจะมีกำลังเอาต์พุตมากขึ้น อีกกรณีนั้นทำให้ลำแสงเอาต์พุตของไดโอดเลเซอร์นั้นออกซิเลตในแควิตี้ฟาบรี-เพอร์โรต์ เพื่อทำการกรองสัญญาณที่มีความยาวคลื่นหรือความถี่เปลี่ยนไป

2.8 การประมวลสัญญาณทางแสง (Optical signal processing)

2.8.1 การตรวจจับแบบตรง (Direction detection,DD)

วิธีตรวจจับสัญญาณแสงเลเซอร์แบบตรงจะใช้งาน เมื่อสัญญาณข้อมูลถูกส่งในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง ดังนั้นการตรวจจับสัญญาณ คือ การตรวจจับกำลังแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงเหล่านั้นเป็นรูปสัปดาห์ของการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดัน หรือกระแสสามารถผ่านกระบวนการคิมอลดูเลตสัญญาณด้วยตัวตรวจจับสัญญาณทั้งแบบอุณหภูมิ หรือแบบควอนตัม แสดงได้ดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 แสดงการตรวจจับแบบตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.30 แสดงการตรวจจับแบบตรง โดยสัญญาณดิจิทัลจะถูกลดเลทเข้ากัน แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์โดยตรง ซึ่งจะทำให้กำลังแสงเลเซอร์เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของสัญญาณที่มอดูเลตแล้วส่งกำลังแสงเข้าสู่เส้นใยนำแสง และปลายทางถูกรับด้วยตัวตรวจจับแสง (Photodetector) ซึ่งเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าโดยตรงตามการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของกำลังแสง การตรวจจับแบบตรงนั้นเกี่ยวข้องกับการนับปริมาณโฟตอนที่ตกกระทบตัวรับแสง โดยตรวจจับแสงจะประกอบด้วยโฟโตไดโอด (Photodiode) ซึ่งเป็นส่วนที่รับแสงโดยตรงและภาคขยายสัญญาณ โดยตัวโฟโตไดโอดนั้นมีพารามิเตอร์ที่สำคัญ ดังนี้

1. ประสิทธิภาพทางควอนตัม (Quantum efficiency)

$$\eta = r_e / r_p \quad (2.29)$$

เมื่อ r_e และ r_p คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่เก็บสะสมได้ และจำนวนโฟตอนของแสงที่ตกกระทบ ตามลำดับ สมการนี้จะบอกถึงประสิทธิภาพในการแปลงกำลังแสงที่ตกกระทบโฟโตไดโอดเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยปกติจะให้หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

2) ความไวในการตอบสนองสัญญาณ (Responsivity)

$$R = I_p / P_o = \eta e / hf \quad A \cdot W^{-1} \quad (2.30)$$

เมื่อ e คือ อิเล็กตรอนมีค่า 1.602×10^{-19} คูลอมป์ h คือ ค่าคงที่ของพลังค์มีค่า 6.626×10^{-34} จูล.วินาที f คือ ความถี่แสงที่ตกกระทบ I_p คือ กระแสเอาต์พุต และ P_o คือ กำลังแสงตกกระทบ สมการนี้จะบอกถึงความไวในการตอบสนองต่อแสงที่ตกกระทบ

สำหรับโฟโตไดโอดชนิด APD จะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญอีก คือ มัลติเพิชั่นแฟกเตอร์ (Multiplication factor, M) ซึ่งจะเป็นตัววัดอัตราขยายกระแสภายใน ดังนี้

$$M = I / I_p \quad (2.31)$$

เมื่อเอาต์พุตรวม I_p คือ กระแสเริ่มแรก (Initial or primary photocurrent) ก่อเกิดการทวีคูณของพาหะ (Carrier Multiplication)

2.8.2 สัญญาณรบกวน (Noise)

สัญญาณรบกวนในระบบสื่อสาร โดยทั่วไปอาจจำแนกออกได้เป็น 2 แบบด้วยกัน คือ แบบที่เกิดจากภายนอกของระบบ เช่น ฟาผ่า สัญญาณรบกวนจากเครื่องใช้ไฟฟ้าภายนอก และแบบที่เกิดจากภายในของระบบคือเกิดจากชิ้นส่วนต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อสารนั้นไม่สามารถป้องกันได้ สัญญาณรบกวนชนิดต่างๆ ของตัวตรวจจับสัญญาณทางแสง โดยสัญญาณรบกวนที่สำคัญ และนำมาใช้ในการพิจารณาในงานวิจัย มีดังนี้

1. สัญญาณรบกวนความร้อน (Thermal noise)

ที่อุณหภูมิห้องนั้นชิ้นส่วนของอุปกรณ์ตัวตรวจจับสัญญาณแสง เช่น ความต้านทานไฟฟ้า ลวดตัวนำ จะเกิดการสั่นกระเพื่อมของอิเล็กตรอนอิสระ หรือ โครงสร้างผลึกด้วยความร้อนเกิดแรงดันทางไฟฟ้าเป็นสัญญาณรบกวนขึ้น หาได้ในรูปค่ากำลังสองเฉลี่ย ดังนี้

$$\bar{i}_t^2 = \frac{4KTB}{R} \quad (2.32)$$

เมื่อ K คือค่าคงที่โบลต์ซมานน์มีค่าเท่ากับ 1.381×10^{-23} จูล.เคลวิน⁻¹ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ หรือเคลวิน R คือ ความต้านทานโหลดของตัวตรวจจับสัญญาณหน่วยโอห์ม B คือ แบนด์วิดท์ของตัวตรวจจับสัญญาณมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2\pi RC}$ เมื่อ C คือ ค่าประจุไฟฟ้าของตัวตรวจจับสัญญาณแสง

2. สัญญาณรบกวนจากกระแสมืด (Dark current noise)

โดยปกติเมื่อไม่มีแสงตกกระทบบตัวรับแสง จะเกิดกระแสค่าหนึ่งซึ่งเกิดจากอุณหภูมิกายใน ทำให้พาหะตัวนำถูกกระตุ้นให้กระโดดจากแถบอิเล็กตรอนอิสระไปยังแถบการนำ เกิดกระแสขึ้นเป็นสัญญาณรบกวนหาได้ดังนี้

$$\bar{i}_d^2 = 2eBI_d \quad (2.33)$$

เมื่อ I_d คือ กระแสมืด (Dark current)

3. สัญญาณรบกวนช็อตตอนอยส์ (Shot noise)

ช็อตตอนอยส์เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นทั่วไปในชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหลาย ซึ่งสาเหตุของการเกิดช็อตตอนอยส์ ก็คือความไม่แน่นอนในการปล่อยอิเล็กตรอนชิ้นส่วนนั่นเอง

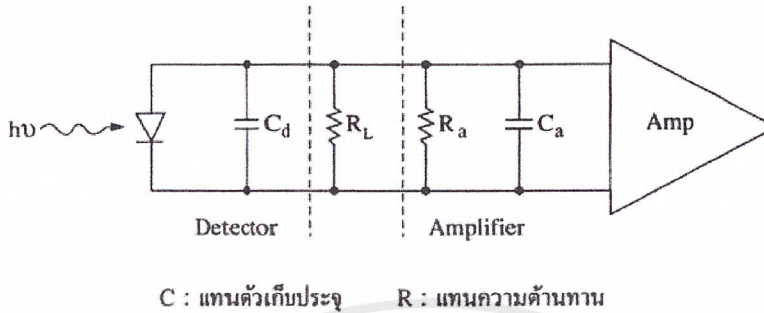
$$\bar{i}_s^2 = 2eBI_p \quad (2.34)$$

เมื่อ I_p คือ กระแสเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สัญญาณรบกวนจากภาคขยายสัญญาณ (Amplifier noise)

เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการขยายสัญญาณไฟฟ้าจากโฟโตไดโอด สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 2.31 แสดงวงจรสมมูลด้านหน้าของภาคขยายสัญญาณ

จากรูปที่ 2.31 แสดงมีพลังงานปริมาณ hf ตกกระทบโฟโตไดโอด โดยมี R_a และ C_a คือ ความต้านทาน และตัวเก็บประจุเข้าของภาคขยายสัญญาณ ตามลำดับ C_d คือ ความต้านทานของโฟโตไดโอด และ R_L คือ ความต้านทานของโหลดของระบบ ซึ่งอุปกรณ์ชนิดแอคทีฟ และพาสซีฟทั้งหลายในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ สามารถรวบรวมกันเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน โดยให้ \bar{V}_a^2 คือ แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนชนิดแรงดัน (Series voltage noise sources) และ \bar{i}_a^2 คือ แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนชนิดกระแส (Shunt current noise source) สามารถหาสัญญาณรบกวนได้ ดังนี้

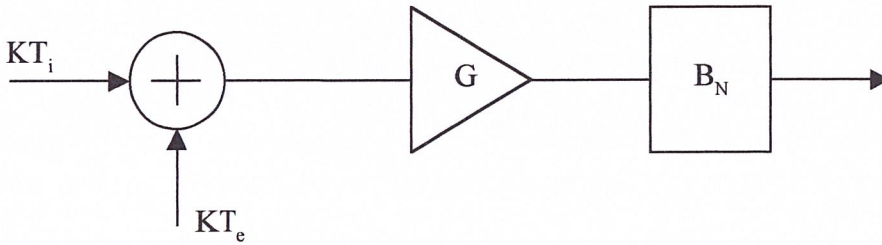
$$\bar{i}_{amp}^2 = \int_0^B (\bar{i}_a^2 + \bar{V}_a^2 |Y|^2) df \quad (2.35)$$

เมื่อ Y คือ ชันแอดมิตแตนซ์ (Shunt admittance) และ f คือ ความถี่ โดยมีความสัมพันธ์กับสัญญาณรบกวนความร้อน ดังนี้

$$\bar{i}_t^2 + \bar{i}_{amp}^2 = \frac{4KTB F_n}{R_L} \quad (2.36)$$

เมื่อ F_n คือ นอยส์ฟิกเจอร์ของระบบ (Noise figure) R_L คือ โหลดของระบบ วงจรขยายโดยทั่วไปจะมีการสร้างสัญญาณรบกวนเพิ่มเติมขึ้นมา และจำเป็นต้องกำหนดวิธีวัดคุณสมบัติใน

เชิงสัญญาณของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ นอยส์ฟีกเกอร์ และอุณหภูมิที่เป็นสัญญาณรบกวนเป็นตัวเลขที่ใช้เพื่อวัดนี้ สามารถพิจารณาหานอยส์ฟีกเกอร์ได้ ดังนี้ โดยพิจารณาจากรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 แสดงวงจรขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนอยู่ภายใน

จากรูปที่ 2.32 นั้นสัญญาณรบกวนถูกสร้างขึ้นส่วนอุปกรณ์ภายใน เมื่อ B_N คือแบนด์วิดท์ของวงจร G คือ อัตราขยายของวงจร T_e คือ อุณหภูมิของสัญญาณรบกวน T_i คือ อุณหภูมิของสัญญาณรบกวนอินพุต K คือ ค่าคงที่โบลต์สมานน์มีค่าเท่ากับ 1.381×10^{23} จูล.เคลวิน สัญญาณรบกวนที่ออกมาจากวงจรขยายจะมีกำลัง ดังนี้

$$N_o = GB_N KT_i + GB_N KT_e = GB_N K(T_i + T_e) \quad (2.37)$$

การเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนอินพุต SNR_o และสัญญาณรบกวนเอาต์พุต SNR_i นั้น เราจะนิยามนอยส์ฟีกเกอร์ F ได้ดังนี้

$$SNR_o = \frac{1}{F} \cdot SNR_i \quad (2.38)$$

โดยทั่วไป T_e จะขึ้นกับ T_i และนอยส์ฟีกเกอร์ F จะหาได้ ดังนี้

$$F = 1 + \frac{T_e}{T_i} \quad (2.39)$$

2.8.3 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio , SNR)

อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน หรือ SNR สามารถเขียนเป็นสมการดังนี้

$$SNR = \frac{S}{N} \quad (3.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$\text{SNR (dB)} = 10 \log (S/N) \quad (3.41)$$

ในการตรวจจับแบบตรงนั้นจะพิจารณาค่า SNR ได้ดังต่อไปนี้ สำหรับการใส่โฟโตไดโอดชนิด PIN ในการรับแสง สัญญาณที่รับได้ คือ

$$S = I_p^2 \quad (2.42)$$

เมื่อ I_p หาได้จากสมการ (3.8) และสัญญาณรบกวนทั้งหมด คือ

$$\bar{i}_{TS}^2 = \bar{i}_s^2 + \bar{i}_t^2 + \bar{i}_d^2 + \bar{i}_{amp}^2 \quad (2.43)$$

เมื่อ \bar{i}_t^2 \bar{i}_d^2 \bar{i}_s^2 และ \bar{i}_{amp}^2 มาจากสมการ (2.32) (2.33) (2.34) และ (2.35) ตามลำดับ โดยที่ \bar{i}^2 คือ ค่ากำลังสองเฉลี่ย และจากสมการ (2.32) (2.33) (2.34) และ (2.35) จะได้

$$\bar{i}_{TS}^2 = 2eB(I_p + I_d) + \frac{4KTBF_n}{R_L} \quad (2.44)$$

และจะได้

$$\text{SNR} = \frac{I_p^2}{\bar{i}_{TS}^2} = \frac{I_p^2}{2eB(I_p + I_d) + \frac{4KTBF_n}{R_L}} \quad (2.45)$$

สำหรับการใส่โฟโตไดโอดชนิด APD ในการรับแสง จะได้ SNR เป็น

$$\text{SNR} = \frac{M^2 I_p^2}{2eB(I_p + I_d)M^{2+X} + \frac{4KTBF_n}{R_L}} \quad (2.46)$$

เมื่อ X คือ เอ็กเซสโนยส์แฟกเตอร์ (Excess noise factor) โดยที่ X มีค่าในช่วง 0.3 ถึง 0.5 สำหรับ APD ชนิดซิลิกอน และในช่วง 0.7 ถึง 1.0 สำหรับ APD ชนิดเจอร์มันเนียม

เมื่อพิจารณาเฉพาะสัญญาณรบกวนช็อคนอยส์ โดยไม่พิจารณาสัญญาณรบกวนชนิดอื่นๆ ซึ่งเป็นโฟโตไดโอดในอุดมคติ สัญญาณรบกวนในกรณีนี้เรียกว่า สัญญาณรบกวนควอนตัม

(Quantum noise) หรือสัญญาณรบกวนปริมาณน้อยที่สุดที่เป็นไปได้ และจะมีค่า SNR ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$SNR = \frac{S}{\bar{i}_s^2} = \frac{RP_s}{2eB} = \frac{RP_s}{eB_T} \quad (2.47)$$

เมื่อ R คือความไวในการตอบสนองสัญญาณจากสมการที่ (2.30) P_s คือกำลังแสงอินพุท และ B_T คือแบนด์วิคท์ของสัญญาณซึ่งในการใช้งานนั้นแบนด์วิคท์ของอุปกรณ์รับสัญญาณควรมีค่าเป็นสองเท่าของแบนด์วิคท์ใช้งาน

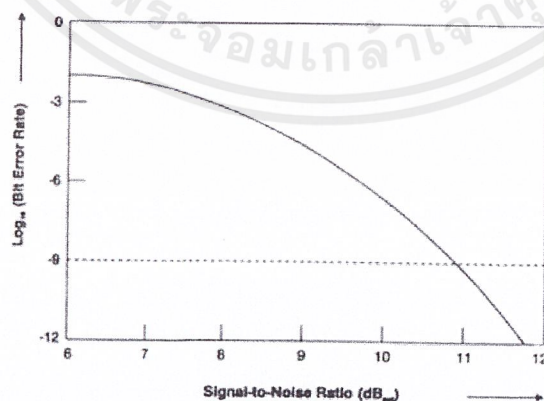
2.8.4 อัตราการส่งบิตผิดพลาด (Bit Error Rate , BER)

สำหรับระบบการส่งสัญญาณแบบดิจิทัลนั้นการสังเกตถึงคุณภาพจะอยู่ในรูปของ BER แทนที่จะเป็น SNR โดยทั่วไปสามารถเขียนนิยามของ BER ได้ดังนี้

$$BER = \frac{\Delta B}{B} \quad (2.48)$$

เมื่อ ΔB และ B คือบิตที่ผิดพลาดและจำนวนบิตทั้งหมด ตัวอย่างเช่น ถ้าระบบส่งสัญญาณแบบดิจิทัลหนึ่งมี BER เท่ากับ 10^{-9} ค่า BER ขนาดนี้หมายความว่า ทุกๆ 10^9 บิต ที่อุปกรณ์รับแสงได้จะมี 1 บิต ที่เกิดการผิดพลาดซึ่ง BER นี้จะมีมาตรฐานต่างๆกันขึ้นอยู่กับงาน เช่น โดยทั่วไป BER สำหรับส่งข้อมูลคอมพิวเตอร์ย่อมต่ำกว่า BER สำหรับการส่งผ่านเสียงทางโทรศัพท์

BER และ SNR จะมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกัน กล่าวคือถ้า SNR มีผลที่ดีก็จะส่งผลทำให้ BER มีผลที่ดีด้วย โดยที่ค่า SNR 11 dB จะมีค่า BER ประมาณ 10^{-9} โดยความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับ SNR ได้แสดงดังรูปที่ 2.33 และตารางที่ 3.5



รูปที่ 2.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับ SNR

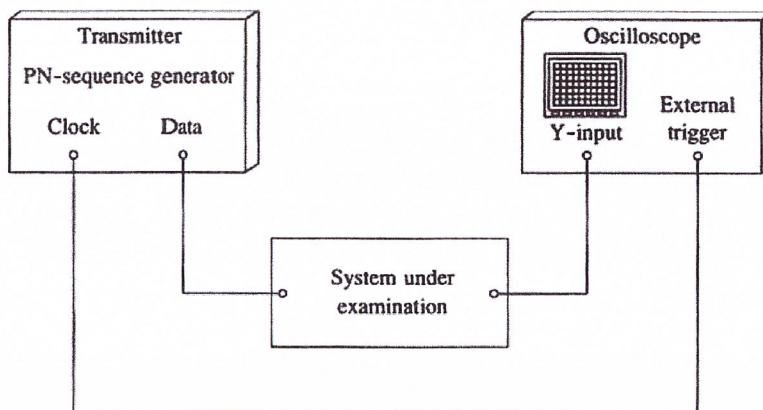
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับ SNR

SNR (dB)	BER
6.0	2.13×10^{-2}
6.5	9.80×10^{-3}
7.0	3.49×10^{-3}
7.5	9.61×10^{-4}
8.0	2.05×10^{-4}
8.5	3.38×10^{-5}
9.0	4.32×10^{-6}
9.5	4.27×10^{-7}
10.0	3.27×10^{-8}
10.5	1.94×10^{-9}
11.0	8.87×10^{-11}
11.5	3.15×10^{-12}
12.0	8.64×10^{-14}
12.5	1.84×10^{-15}
13.0	3.02×10^{-17}

2.8.5 แพทเทิร์นรูปดวงตา (Eye pattern)

ในการส่งสัญญาณดิจิทัลแบบเบสแบนด์นี้ ถ้าสัญญาณที่ส่งจากต้นทางเป็นสัญญาณแบบสุ่ม (Random) หรือแบบกึ่งสุ่ม (Semi-random) เมื่อทำการมอนิเตอร์ (Monitor) สัญญาณที่ภาครับตรงตำแหน่งก่อนเข้าวงจรตัดสินใจระดับสัญญาณ (Decision circuit) ซึ่งสามารถรับได้โดยใช้ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) โดยทั่วไปเราจะพบว่าการผิดเพี้ยนของสัญญาณ การรบกวนกันระหว่างสัญญาณ และเฟสจิสเตอร์ (Phase jitter) ที่เกิดขึ้น จะทำให้ขอบของสัญญาณดิจิทัลที่มาซ้อนกันบนจอเกิดเป็นแพทเทิร์นรูปดวงตาขึ้นมา และสามารถที่จะใช้แพทเทิร์นรูปดวงตาขึ้นมา และสามารถที่จะใช้แพทเทิร์นรูปดวงตานี้ในการพิจารณาความผิดพลาดของบิต (Bit error rate : BER) โดยประมาณได้ ตัวอย่างการจัดระบบเพื่อให้เกิดแพทเทิร์นรูปดวงตาแสดงดังรูปที่ 2.34

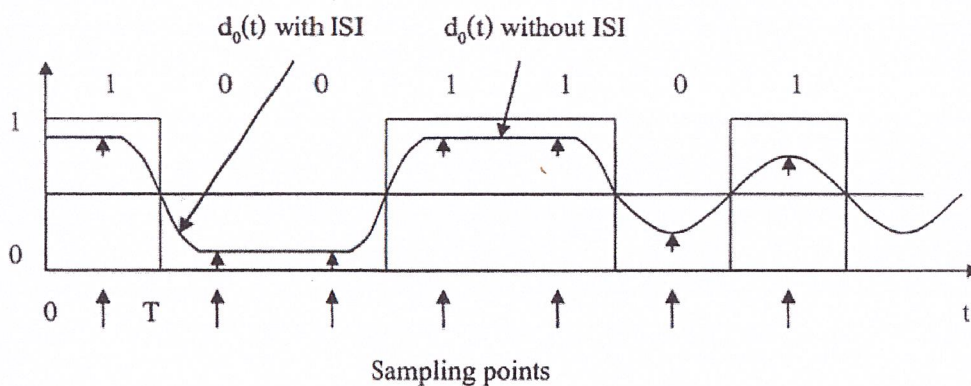


รูปที่ 2.34 แสดงการจัดระบบเพื่อบันทึกแพทเทิร์นรูปดวงตา

จากรูปที่ 2.34 ข้อมูล (Data) จะถูกส่งผ่านระบบที่ต้องการตรวจสอบอัตราการส่งบิตผิดพลาด (System under examination) และนำสัญญาณนาฬิกา (Clock) จากตัวส่ง (Transmitter) ไปทำการทริก (Trigger) หรือซิงโครไนซ์สัญญาณ (Synchronise) ที่ออสซิลโลสโคปเพื่อทำให้เกิดแพทเทิร์นรูปดวงตาขึ้น ซึ่งปกติจะเกิดปัญหาจากการซิงโครไนซ์สัญญาณนาฬิกาเข้ากับสัญญาณนาฬิกาของภาครับ โดยผลที่เกิดขึ้นรวมๆว่า เฟสจิสเตอร์ พัลส์ที่ส่งไปในตัวนำจะเกิดการพัวพันและแบนด์วิดท์จะถูกจำกัด ทำให้พัลส์มีขนาดกว้างขึ้นตามแกนเวลาขณะที่ทำการตรวจจับที่ด้านรับนั้น โดยปกติพัลส์ที่กว้างขึ้นนี้จะไม่ผลกระทบต่อจุดตรวจจับสัญญาณข้างเคียง แต่ในทางปฏิบัตินั้นจะเกิดผลกระทบขึ้นเสมอหรือเกิดการรบกวนระหว่างสัญลักษณ์หรืออินเตอร์ซิมบอลอินเตอร์เฟียเรนซ์ (Intersymbol Interference : ISI) โดยปกติสัญญาณที่ตรวจจับได้จะเป็นตามสมการดังนี้

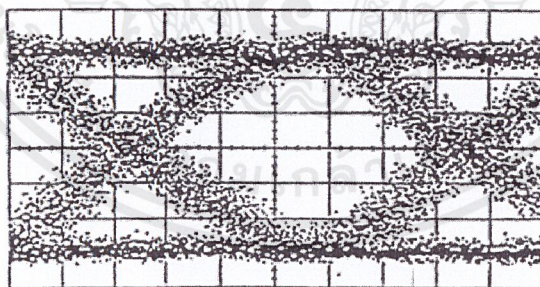
$$d(t) = d_0(t) + n(t) \quad (2.49)$$

เมื่อ $d(t)$ คือสัญญาณที่รับได้ $d_0(t)$ คือสัญญาณที่เกิด ISI และ $n(t)$ คือ สัญญาณรบกวน โดยสัญญาณ $d_0(t)$ ที่จุดต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.35



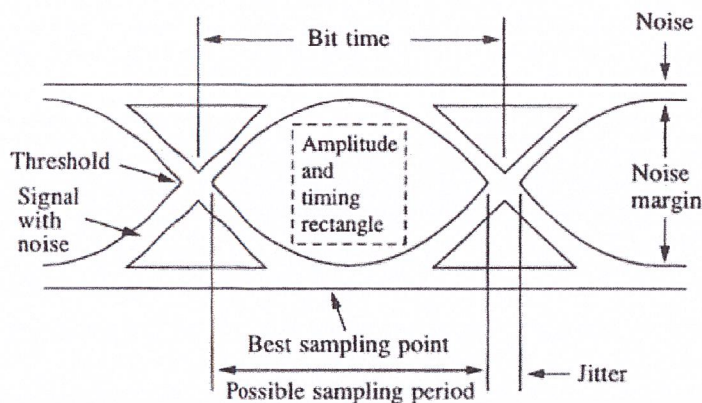
รูปที่ 2.35 แสดงสัญญาณ $d_0(t)$

จากรูปที่ 2.35 แสดงสัญญาณปกติที่เกิดและไม่เกิด ISI เมื่อ T คือช่วงเวลาในการตรวจจับสัญญาณ (Sampling time) โดยสัญญาณที่เกิด ISI นั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด และรูปร่างสัญญาณ ซึ่งมีผลต่อการอ่านค่าบิตจากบิตที่ทำการส่งมาจากต้นทางในระยะทางไกลๆ สัญญาณ $d_0(t)$ จะถูกส่งเข้าสู่ออสซิลโลสโคปเพื่อทำการทริกสัญญาณให้เกิดแพทเทิร์นรูปดวงตาขึ้น ซึ่งสัญญาณดิจิทัลที่ผ่านระบบที่พิจารณาจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ เช่น ช่วงเวลาขาขึ้นและขาลงของสัญญาณ หรือเกิดการลทอนสัญญาณ โดยระดับการตัดสินสัญญาณจะอยู่ที่ครึ่งหนึ่งของสัญญาณจริง หลังจากการปรับอัตราการกวาด และทริกสัญญาณของออสซิลโลสโคปให้มาซ้อนทับกันแล้วจะเกิดแพทเทิร์นรูปดวงตาที่เกิดบนออสซิลโลสโคป ดังรูป 2.36



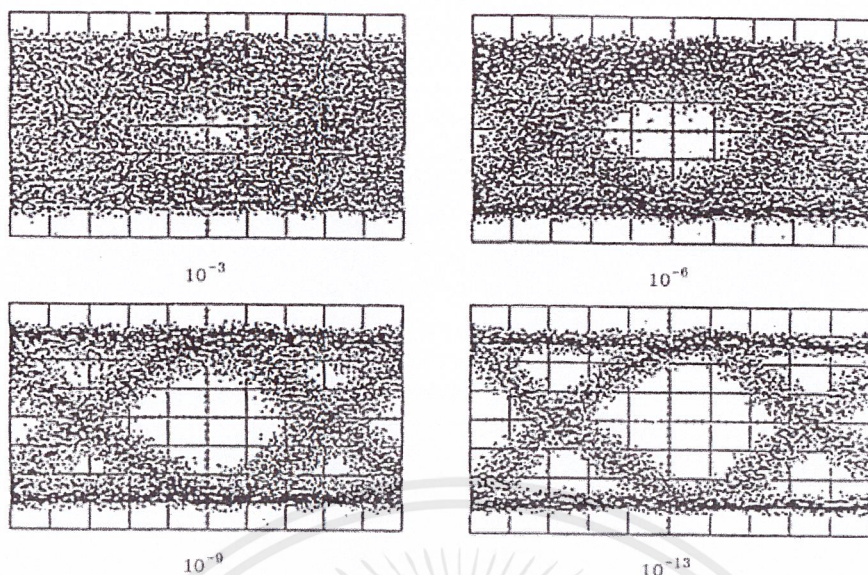
รูปที่ 2.36 แสดงแพทเทิร์นรูปดวงตาที่เกิดบนออสซิลโลสโคป

จากรูปที่ 2.36 ส่วนที่เป็นแถบของจุดประรวมกันอยู่นั้นเป็นบริเวณที่มีสัญญาณมาปรากฏอยู่ซึ่งมีลักษณะคล้ายดวงตา โดยเป็นการรวมส่วนของสัญญาณที่เกิด ISI ทุกส่วนมารวมกัน และเมื่อทำการเขียนขอบเขตของบริเวณต่างๆ ก็จะได้ดังรูปที่ 3.37



รูปที่ 2.37 แสดงแพทเทิร์นรูปดวงตากับความหมายของส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 2.37 แสดงรายละเอียดของส่วนต่างๆ ซึ่งสัญญาณและสัญญาณรบกวน (Signal with noise) จะปรากฏรวมกับอยู่ในแถบของดวงตา ส่วนที่เป็นแถบอยู่ด้านบนสุด และล่างสุดจะเป็นผลกระทบจาก ISI และบอกขนาดของสัญญาณรบกวน (Noise) นอยส์มาร์จิ้น (Noise margin) คือ ความกว้างของดวงตาในแนวกว้าง ความกว้างของดวงตาในแนวนอนนั้นจะบอกช่วงเวลาของบิตข้อมูล หรือบิตไทม์ (Bit time) ส่วนไทม์มิงจิตเตอร์ (Timing jitter) คือ ระยะห่างของดวงตาในแนวนอนซึ่งจะบอกการคลาดเคลื่อน ไปของพัลส์ เมื่อทำการตรวจจับสัญญาณจากปัญหาการซิงโครไนซ์ ในการตัดสินใจระดับสัญญาณนั้นจะใช้ระดับขีดเริ่ม (Threshold) ซึ่งอยู่ตรงกลางตามแนวนอนของดวงตาเป็นระดับสำหรับกำหนดบิตข้อมูล โดยช่วงที่อาจจะใช้ในการสุ่มสัญญาณ (Possible sampling period) นั้นจะอยู่ในช่วงครึ่งบน หรือครึ่งล่างของดวงตา และตำแหน่งที่การสุ่มตัวอย่างที่เหมาะสมที่สุด (Best sampling point) คือ ตำแหน่งตรงกลางดวงตาซึ่งเป็นส่วนที่กว้างที่สุดเพราะเป็นระดับที่ทำให้นอยส์มาร์จิ้น (Noise margin) ทางด้านบิต “1” และ “0” เท่ากัน ซึ่งจะส่งผลให้ความน่าจะเป็นของการตัดสินใจผิดพลาดเนื่องจากสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน (Gaussian) ต่ำสุด สำหรับความชันของเส้นรอบดวงตาจะบ่งความไวที่มีต่อการคลาดเคลื่อนของจังหวะในการสุ่มตัวอย่าง โดยทั่วไปสัญญาณที่มีอัตราการส่งข้อมูลสูงมักจะมี ความชันสูงด้วย ซึ่งหมายถึงผลกระทบของจังหวะการสุ่มตัวอย่างที่คลาดเคลื่อนไปก็มีสูงไปด้วย และจะบ่งบอกคุณสมบัติของช่องสัญญาณที่ทำการส่ง โดยแพทเทิร์นรูปดวงตาที่มีดวงตากว้างทั้งในแนวตั้ง และแนวนอนจะหมายถึงคุณสมบัติที่ดีของช่องสัญญาณ ซึ่งจะทำให้การตัดสินใจระดับสัญญาณมีโอกาสผิดพลาดน้อยลง ความสัมพันธ์ของความกว้างของดวงตาบิตกับอัตราการส่งบิตผิดพลาด แสดงดังรูป 2.38



รูปที่ 2.38 แสดงความสัมพันธ์ของแพทเทิร์นรูปดวงตากับอัตราการส่งบิตผิดพลาด

จากรูปที่ 2.38 แสดงให้เห็นว่าแพทเทิร์นรูปดวงตาที่ปรากฏบนออสซิลโลสโคปนั้นสามารถบอกความผิดพลาดในการส่งบิตโดยประมาณได้

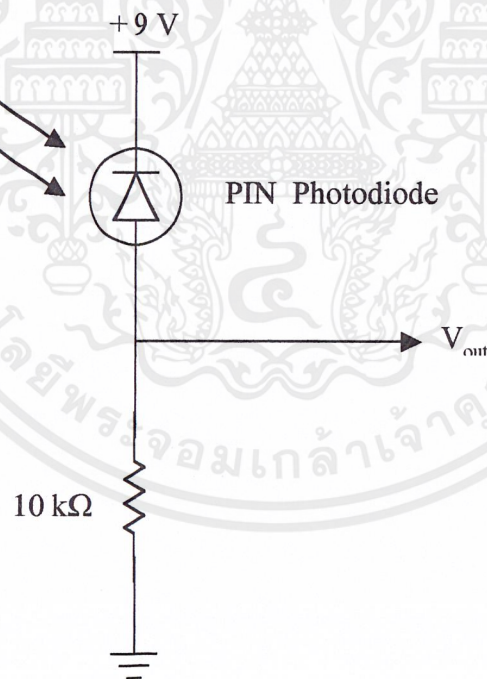
บทที่ 3

การวิจัยและการดำเนินงาน

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการมัลติเพิล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นสำหรับการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูง ซึ่งมีขั้นตอนในการศึกษาต่างๆ โดยเริ่มจากการสร้างอุปกรณ์รับสัญญาณแสง การทำการสร้างระบบการมัลติเพิล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น การศึกษาค่าการสูญเสียกำลังทางแสง การศึกษาค่าสัญญาณรบกวนข้ามช่อง การศึกษาอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน และการศึกษาอัตราการใช้พื้นที่ผิวดิจิตอล ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

3.1 การสร้างอุปกรณ์รับสัญญาณแสง

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการสร้างอุปกรณ์รับสัญญาณที่จะใช้ในระบบการมัลติเพิล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น ซึ่งวงจรที่ของอุปกรณ์รับแสงมีไดอะแกรมแสดงดังรูปที่ 3.1



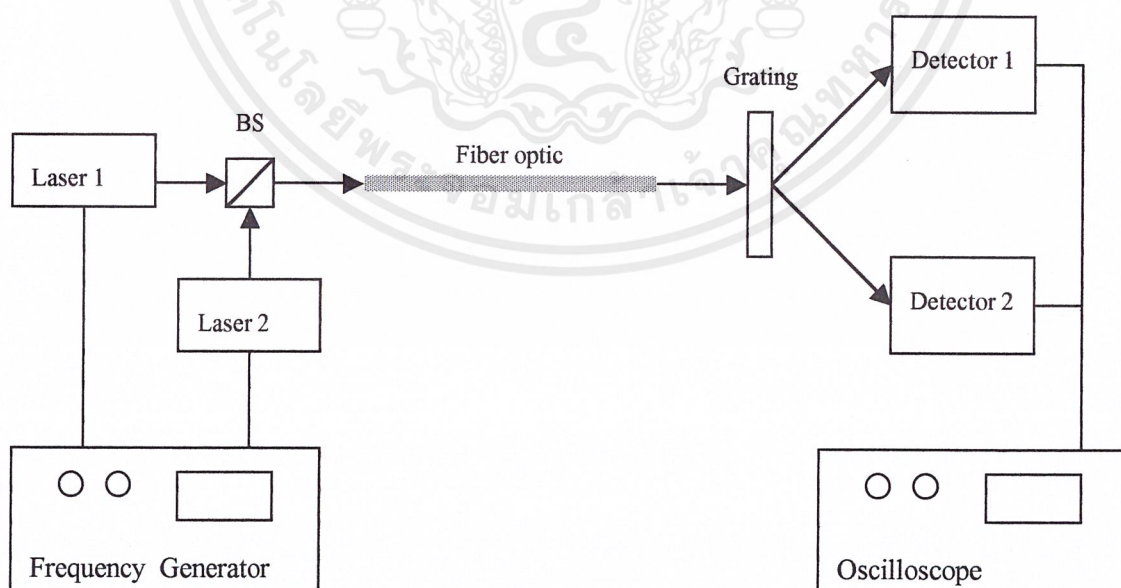
รูปที่ 3.1 แสดงวงจรของอุปกรณ์รับสัญญาณแสง

จากรูปที่ 3.1 เป็นวงจรของอุปกรณ์รับสัญญาณแสงที่ใช้พินโฟโตไดโอด (PIN Photodiode) ต่อแบบโฟโตคอนดักทีฟโหมด (Photoconductive mode) หรือแบบย้อนกลับ (Reverse bias) ซึ่งจะเปลี่ยนสัญญาณแสงที่ตรวจจับได้เป็นสัญญาณไฟฟ้า คือเมื่อมีแสงมาตกกระทบที่โฟโตไดโอดจะทำให้เขตปลอดพาหะกว้างขึ้น ส่งผลให้พินโฟโตไดโอดมีการนำกระแส ซึ่งทำให้เกิดกระแสไหลผ่านตัวต้านทานและทำให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมตัวต้านทาน โดยความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทานนี้คือสัญญาณเอาต์พุทของอุปกรณ์รับแสง

ในการออกแบบวงจรรับสัญญาณ เราได้เลือกใช้พินโฟโตไดโอด เบอร์ BPX65 เนื่องจากมีความสามารถในการตอบสนองต่อสัญญาณแสงที่มีความถี่สัญญาณมอดูเลตได้ถึง 500 MHz และมีช่วงการตอบสนองต่อความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับไดโอดเลเซอร์ที่ใช้เป็นตัวกำเนิดสัญญาณแสง โดยที่ความยาวคลื่น 670 nm พินโฟโตไดโอดจะมีค่าการตอบสนองอยู่ที่ 0.4 A/W และที่ความยาวคลื่น 785 nm พินโฟโตไดโอดจะมีค่าการตอบสนองอยู่ที่ 0.5 A/W จากวงจรที่ได้ทำการออกแบบทำให้อุปกรณ์รับแสงนี้มีความสามารถในการตอบสนองต่อสัญญาณแสงที่มีความถี่สัญญาณมอดูเลตได้สูงสุดที่ 100 MHz

3.2 การสร้างระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น

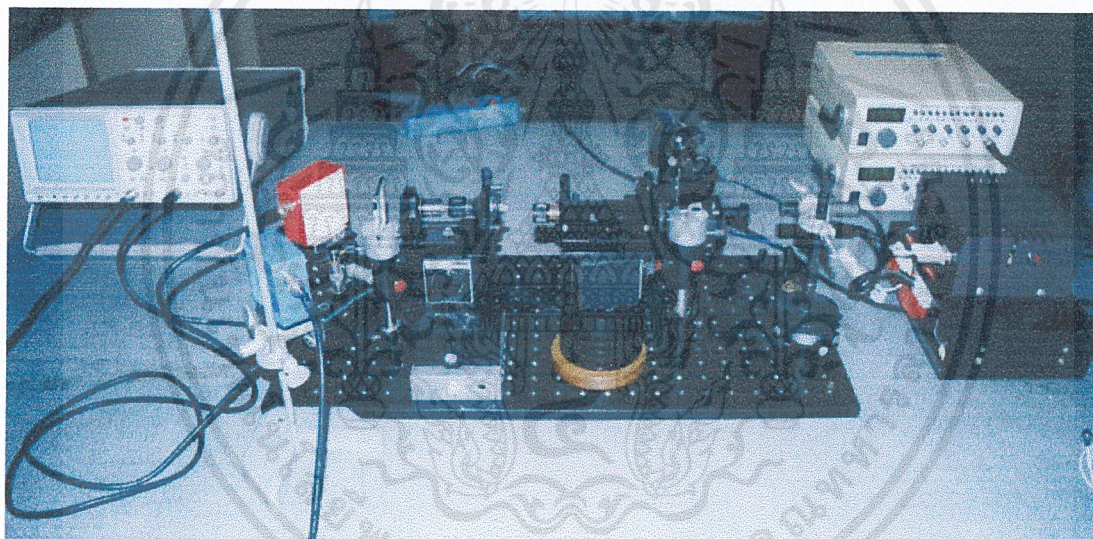
ในขั้นตอนนี้จะเป็นการสร้างระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น ซึ่งระบบที่จะทำการสร้างนี้มีแผนผังแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงโคะแกรมของระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นที่ใช้ในการทดลอง

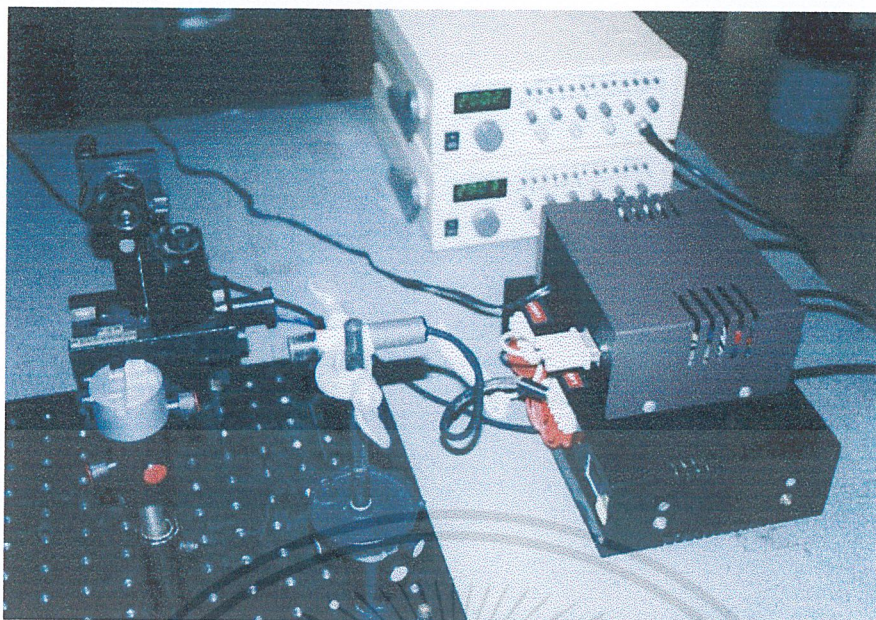
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.2 เป็นไดอะแกรมจำลองระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น โดยในการทดลองนี้จะใช้ไดโอดเลเซอร์จำนวน 2 ตัวเป็นแหล่งกำเนิดแสง ที่มีความยาวคลื่น 670 nm และ 785 nm ซึ่งจะถูกรวมออกด้วยสัญญาณข้อมูลซึ่งในที่นี้จะใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Frequency generator) สร้างสัญญาณที่มีความถี่รูปแบบต่างๆ ซึ่งจะใช้แทนสัญญาณเบสแบนด์ของข้อมูลในระบบการสื่อสาร จากนั้นจะทำการมัลติเพล็กซ์ (Multiplex) สัญญาณแสงจากทั้ง 2 แหล่งเข้าด้วยกัน โดยการใช้ปริซึมรวมแสง (BS) แล้วทำการส่งสัญญาณแสงดังกล่าวเข้าไปในเส้นใยนำแสง หลังจากที่แสงออกจากเส้นใยนำแสงแล้ว สัญญาณแสงทั้งสองความยาวคลื่นจะถูกแยกออกจากกันโดยเกรตติง หลังจากนั้นจะใช้อุปกรณ์สัญญาณแสง (Detector) จำนวน 2 ตัว ทำการรับสัญญาณทางแสงและส่งสัญญาณเอาท์พุทในรูปของแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) แสดงผลของสัญญาณออกทางหน้าจอแสดงผลต่อไป โดยในการทดลองได้จัดอุปกรณ์ทดลองดังรูปที่ 3.3

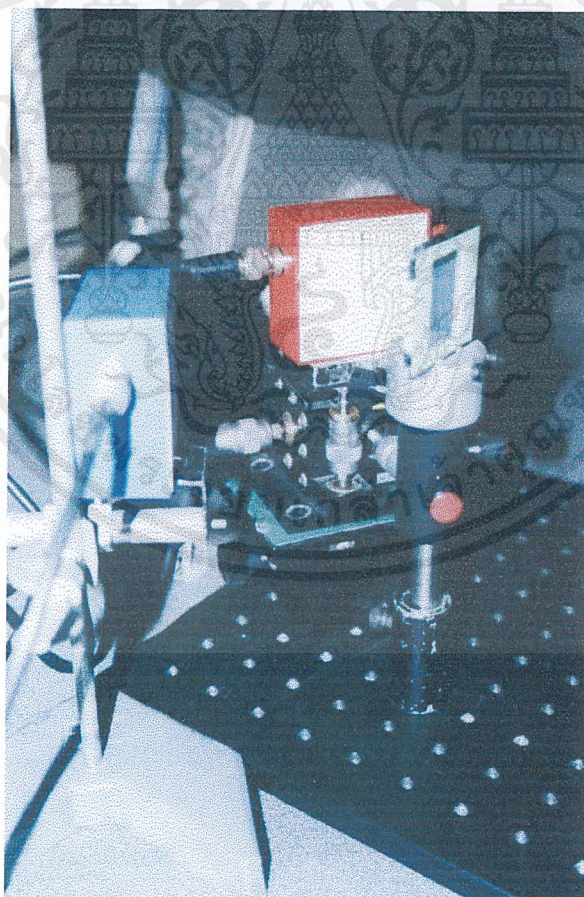


รูปที่ 3.3 แสดงระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นที่ใช้ในการทดลอง

การมัลติเพล็กซ์ที่ใช้ในการทดลองการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นนี้ได้ใช้ปริซึมรวมแสง (BS) เป็นตัวทำหน้าที่มัลติเพล็กซ์สัญญาณทางแสงจากแหล่งกำเนิดแสงไดโอดเลเซอร์ทั้งสองความยาวคลื่นเข้าด้วยกัน ซึ่งในการมัลติเพล็กซ์สัญญาณที่ตื้นนั้นจะต้องปรับปริซึมปริซึมรวมแสง (BS) และไดโอดเลเซอร์ทั้งสอง เพื่อให้สัญญาณทางแสงที่ได้จากการมัลติเพล็กซ์นี้มีตำแหน่งและทิศทางเดียวกันพอดี โดยชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงได้แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงการมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสง



รูปที่ 3.5 แสดงการตีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.5 นั้นเป็นการตีมัลติเพล็กซ์ ที่ใช้ในการทดลองการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น โดยใช้เกรตติง (Grating) เป็นตัวทำหน้าที่ที่มัลติเพล็กซ์สัญญาณทางแสงที่ได้จากการมัลติเพล็กซ์สัญญาณทางแสงออกจากกันสัญญาณทางแสงที่แยกได้จากเกรตติงนี้จะเป็นแถบสว่างที่หนึ่ง ซึ่งแต่ละความยาวคลื่นจะมีตำแหน่งของแถบสว่างที่หนึ่งไม่ต่างกัน สำหรับเกรตติงที่ใช้ในการทดลองนี้มีจำนวนช่วง 1886 ช่วงต่อนิ้ว

3.3 การศึกษาการสูญเสียกำลังทางแสง

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาการสูญเสียกำลังทางแสงของสัญญาณแสงจากระบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นที่ได้ทำการสร้างขึ้น โดยจะทำการวัดกำลังทางแสงอินพุท และเอาท์พุทของช่องสัญญาณที่1 (670nm) และช่องสัญญาณที่2 (785nm) ในขณะที่ยังไม่มีการมอดูเลตสัญญาณให้กับไดโอดเลเซอร์ แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าสูญเสียกำลังทางแสงของแต่ละช่องสัญญาณ และค่าการสูญเสียกำลังทางแสงรวมของระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นที่ได้ทำการสร้างขึ้นมาในการทดลองนี้

3.4 การศึกษาค่าสัญญาณรบกวนข้ามช่อง

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาค่าสัญญาณรบกวนข้ามช่องของระบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น โดยในการหาค่าสัญญาณรบกวนข้ามช่องที่ช่องสัญญาณที่หนึ่ง (670 nm) จะทำการวัดค่ากำลังแสงเอาท์พุทของช่องสัญญาณที่หนึ่ง กับสัญญาณรบกวนข้ามช่องที่เกิดจากสัญญาณของช่องที่สอง (785 nm) เข้าไปรบกวนสัญญาณช่องที่หนึ่ง ในการวัดนั้นจะทำการวัดสัญญาณของช่องสัญญาณที่หนึ่งก่อนที่จะใส่สัญญาณช่องที่สองเข้าไปในระบบ หลังจากนั้นจึงทำการใส่สัญญาณช่องที่สองเข้าไปในระบบแล้วจึงจะทำการวัดสัญญาณที่ช่องสัญญาณที่หนึ่งอีกครั้ง สัญญาณของช่องสัญญาณที่หนึ่งที่เปลี่ยนแปลงไปจะเกิดจากการรบกวนของช่องสัญญาณที่สอง และในการหาค่าสัญญาณรบกวนข้ามช่องที่ช่องสัญญาณที่สอง (785 nm) จะทำการวัดค่ากำลังแสงเอาท์พุทของช่องสัญญาณที่สอง กับสัญญาณรบกวนข้ามช่องที่เกิดจากสัญญาณของช่องที่หนึ่ง (670 nm) เข้าไปรบกวนสัญญาณช่องที่สอง ในการวัดนั้นจะทำการวัดสัญญาณของช่องสัญญาณที่สองก่อนที่จะใส่สัญญาณช่องที่หนึ่งเข้าไปในระบบ หลังจากนั้นจึงทำการใส่สัญญาณช่องที่หนึ่งเข้าไปในระบบแล้วจึงจะทำการวัดสัญญาณที่ช่องสัญญาณที่สองอีกครั้ง สัญญาณของช่องสัญญาณที่สองที่เปลี่ยนแปลงไปจะเกิดจากการรบกวนของช่องสัญญาณที่หนึ่ง แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ค่าสัญญาณการรบกวนข้ามช่อง

3.5 การศึกษาสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นที่ได้ทำการสร้างขึ้น โดยในการหาค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ของช่องสัญญาณที่หนึ่ง (670nm) จะทำการวัดสัญญาณของช่องสัญญาณที่หนึ่ง กับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณที่หนึ่ง ในการหาค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ของช่องสัญญาณที่สอง (785nm) จะทำการวัดสัญญาณของช่องสัญญาณที่สอง กับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณที่สอง แล้วนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเปรียบเทียบระหว่างช่องสัญญาณที่หนึ่งกับช่องสัญญาณที่สอง

3.6 การศึกษาอัตราการส่งผิดพลาด

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาอัตราการส่งผิดพลาดของระบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นที่ได้ทำการสร้างขึ้น โดยใช้หลักความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) กับอัตราการส่งผิดพลาด (BER) เพื่อวิเคราะห์ค่าอัตราการส่งผิดพลาดเปรียบเทียบระหว่างช่องสัญญาณที่หนึ่งกับช่องสัญญาณที่สอง

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์

ในบทนี้จะแสดงผลการทดลองตามขั้นตอนต่างๆที่นำเสนอในบทที่ 3 โดยเริ่มจากอุปกรณ์รับสัญญาณแสง ระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น ผลการศึกษาค่าการสูญเสียกำลังทางแสง ผลการศึกษาค่าสัญญาณรบกวนข้ามช่อง ผลการศึกษาอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน และผลการศึกษาอัตราการส่งบิตผิดพลาด ตามหัวข้อในบทที่ 3 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

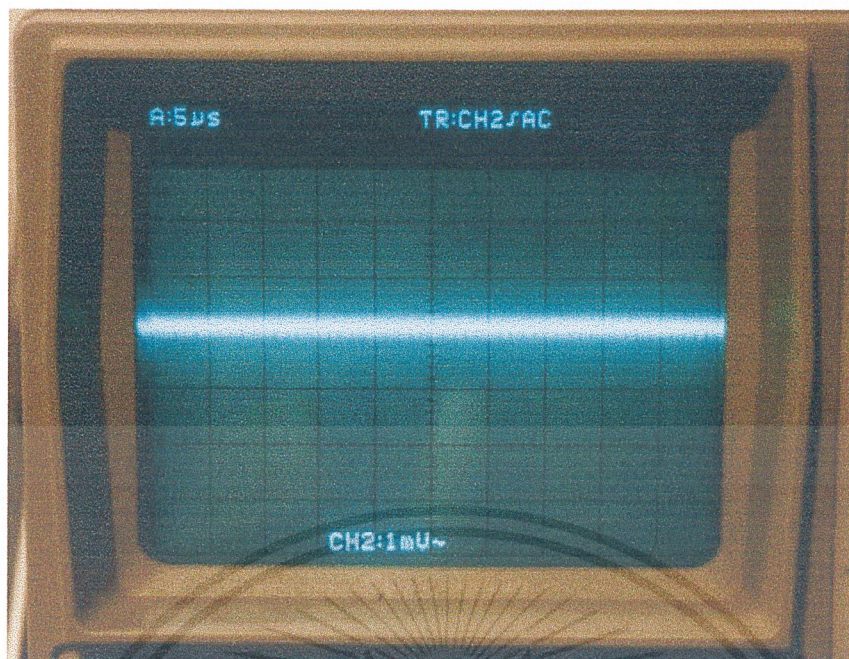
4.1 อุปกรณ์รับสัญญาณแสง

จากวงจรของอุปกรณ์รับสัญญาณในรูปแบบที่ 3.1 ได้นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์รับสัญญาณที่ใช้ในระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นนี้ จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาสัญญาณรบกวนต่างๆของอุปกรณ์รับสัญญาณแสง โดยค่าสัญญาณรบกวนความร้อนสามารถหาได้จากสมการที่ (2.32) และค่าสัญญาณรบกวนจากกระแสมีดสามารถหาได้จากสมการที่ (2.33) ซึ่งตัวแปรต่างๆในสมการมีค่าดังนี้ K คือ ค่าคงที่โบลต์ซมานน์มีค่า 1.381×10^{-23} จูล.เคลวิน⁻¹ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ในขณะทำการทดลองมีค่า 25 องศาเซลเซียสหรือ 298 เคลวิน R คือ ความต้านทานโหลดของตัวตรวจจับสัญญาณมีค่า 10 กิโลโอห์ม B คือ แบนด์วิดท์ของตัวตรวจจับสัญญาณมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2\pi RC}$ ซึ่งค่าประมาณ 7.6 เมกะเฮิรตซ์ C คือ ค่าประจุไฟฟ้าของตัวตรวจจับสัญญาณแสงมีค่า 2.1 พิกโคฟารัด I_d คือ กระแสมีดของโฟโตไดโอดมีค่า 0.5 นาโนแอมแปร์ e คือ ประจุของอิเล็กตรอนมีค่า 1.602×10^{-19} คูลอมบ์ โดยค่าสัญญาณรบกวนที่คำนวณได้แสดงอยู่ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสัญญาณรบกวนที่ได้จากการคำนวณ

สัญญาณรบกวนความร้อน	3.0 nA
สัญญาณรบกวนจากกระแสมีด	0.035 nA

สัญญาณรบกวนที่แสดงในตารางเป็นสัญญาณรบกวนในรูปแบบของกระแส ส่วนสัญญาณรบกวนรวมของอุปกรณ์รับสัญญาณแสงก่อนทำการวัดสัญญาณจะอยู่ในรูปของแรงดัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1

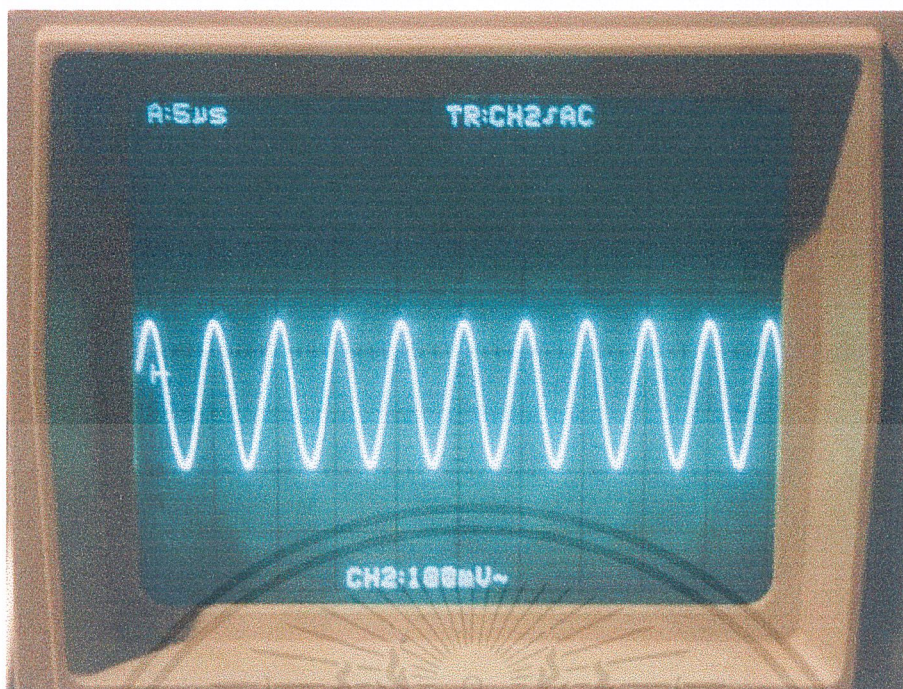


รูปที่ 4.1 แสดงสัญญาณรบกวนรวมของอุปกรณ์รับสัญญาณแสง

จากรูปที่ 4.1 แขนอนคือเวลาส่วนแกนตั้งคือแรงดัน ค่าสัญญาณรบกวนที่วัดได้มีค่าประมาณ 0.3 mV_{p-p} ซึ่งสัญญาณแสงเอาต์พุทของระบบต่ำที่สุดที่รับได้ควรจะมีค่าเป็นสองเท่าของสัญญาณรบกวน ดังนั้นสัญญาณแสงเอาต์พุทของระบบต่ำที่สุดควรเป็น 0.6 mV_{p-p}

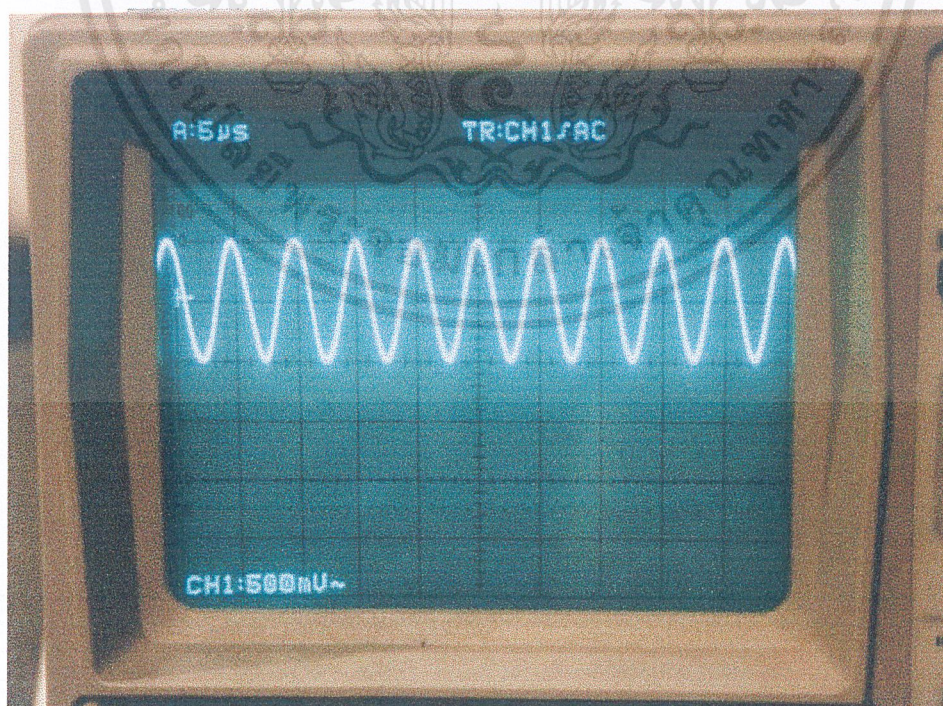
4.2 ระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น

จากระบบการทดลองที่แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยจะเริ่มจากการใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณสร้างสัญญาณอินพุททางไฟฟ้าให้กับระบบ ในการทดลองนี้จะใช้สัญญาณรูปไซน์ความถี่ 200 kHz มีแรงดันไฟฟ้า 5 V_{p-p} จ่ายให้กับวงจรจับที่ทำหน้าที่มอดูเลตสัญญาณไฟฟ้าเข้ากับสัญญาณทางแสงของไดโอดเลเซอร์ทั้งสองตัว โดยช่องสัญญาณที่หนึ่งได้ใช้ไดโอดเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 670 nm และช่องสัญญาณที่สองได้ใช้ไดโอดเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 785 nm ซึ่งสัญญาณแสงอินพุทของช่องสัญญาณที่หนึ่งและสอง ในรูปของแรงดันได้แสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.2 แสดงสัญญาณแสงอินพุทของช่องสัญญาณที่ 1 (670 nm)

จากรูปที่ 4.2 แขนอนคือเวลาส่วนแกนตั้งคือแรงดัน ค่าสัญญาณทางไฟฟ้าจากสัญญาณแสงอินพุทของช่องสัญญาณที่หนึ่ง (670 nm) ที่ได้มีแรงดัน $250 \text{ mV}_{\text{p-p}}$

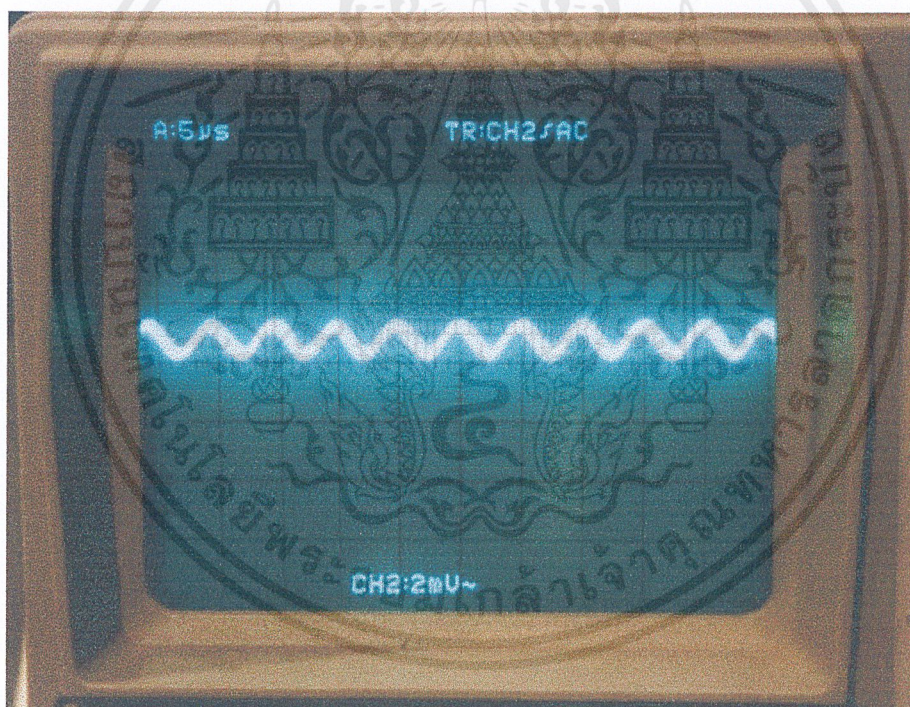


รูปที่ 4.3 แสดงสัญญาณแสงอินพุทของช่องสัญญาณที่ 2 (785 nm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 แขนงนอนคือเวลาส่วนแกนตั้งคือแรงดัน ค่าสัญญาณทางไฟฟ้าจากสัญญาณแสงอินพุทของช่องสัญญาณที่สอง (785 nm) ที่ได้มีแรงดัน $1.0 V_{p-p}$

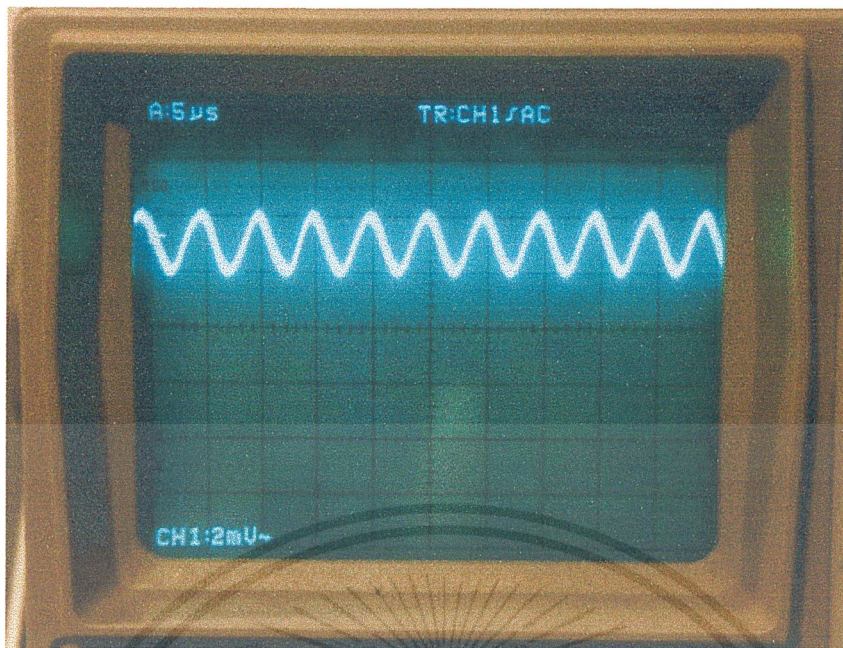
หลังจากนั้นสัญญาณแสงอินพุทดังกล่าวจะถูกทำการมัลติเพล็กซ์เข้าด้วยกันโดยปริซึมรวมแสงแล้วจึงทำการส่งผ่านเข้าไปในเส้นใยนำแสง หลังจากทีสัญญาณแสงออกจากเส้นใยนำแสงแล้ว จะถูกทำการดีมัลติเพล็กซ์ด้วยเกรตติงเพื่อแยกช่องสัญญาณแสงออกจากกัน สัญญาณแสงที่แยกได้จากเกรตติงนั้น จะเป็นสัญญาณแสงที่เกิดจากการเลี้ยวเบนอันดับที่หนึ่งของเกรตติง ซึ่งแสงแต่ละความยาวคลื่นจะมีตำแหน่งของการเลี้ยวเบนที่ต่างกัน จึงทำให้แต่ละช่องสัญญาณแสงมีตำแหน่งของอุปกรณ์รับสัญญาณที่ต่างกัน สัญญาณแสงเอาท์พุทของช่องสัญญาณที่หนึ่งและสอง ในรูปของแรงดันได้แสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 แสดงสัญญาณแสงเอาท์พุทของช่องสัญญาณที่ 1 (670 nm)

จากรูปที่ 4.4 แขนงนอนคือเวลาส่วนแกนตั้งคือแรงดัน ค่าสัญญาณทางไฟฟ้าจากสัญญาณแสงเอาท์พุทของช่องสัญญาณที่หนึ่ง (670 nm) ที่ได้มีแรงดัน $1.8 mV_{p-p}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงสัญญาณแสงเอาต์พุตของช่องสัญญาณที่ 2 (785 nm)

จากรูปที่ 4.5 แกนนอนคือเวลาส่วนแกนตั้งคือแรงดัน ค่าสัญญาณทางไฟฟ้าจากสัญญาณแสงเอาต์พุตของช่องสัญญาณที่สอง (785 nm) ที่ได้มีแรงดัน 2.0 mV_{p-p}

4.3 ผลการศึกษาการสูญเสียกำลังทางแสง

ในการหาการสูญเสียกำลังทางแสงของระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น ในการหาค่าการสูญเสียกำลังทางแสงของช่องสัญญาณที่หนึ่ง (670 nm) จะทำการวัดค่ากำลังทางแสงอินพุตของช่องสัญญาณที่หนึ่งและค่ากำลังทางแสงเอาต์พุตของช่องสัญญาณที่หนึ่งแล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าการสูญเสียกำลังทางแสงของช่องสัญญาณที่หนึ่ง ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองได้แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการสูญเสียกำลังทางแสงของช่องสัญญาณที่หนึ่ง (670 nm)

ครั้งที่	P_{input} (mW)	P_{output} (mW)	กำลังแสงที่สูญเสีย (dB)
1	2.054	0.028	-18.7
2	2.137	0.033	-18.1
3	2.098	0.030	-18.4
เฉลี่ย	2.096	0.030	-18.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการหาค่าการสูญเสียกำลังทางแสงของช่องสัญญาณที่สอง (785 nm) จะทำการวัดค่ากำลังทางแสงอินพุทของช่องสัญญาณที่สองและค่ากำลังทางแสงเอาต์พุทของช่องสัญญาณที่สอง แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าการสูญเสียกำลังทางแสงของช่องสัญญาณที่สอง ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองได้แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการสูญเสียกำลังทางแสงของช่องสัญญาณที่สอง (785 nm)

ครั้งที่	P_{input} (mW)	P_{output} (mW)	กำลังแสงที่สูญเสีย (dB)
1	2.310	0.036	-18.1
2	2.223	0.033	-18.3
3	2.285	0.034	-18.3
เฉลี่ย	2.273	0.034	-18.3

4.4 ผลการศึกษาค่าสัญญาณรบกวนข้ามช่อง

ในการหาค่าสัญญาณรบกวนข้ามช่องที่ช่องสัญญาณที่หนึ่ง (670 nm) จะทำการวัดค่ากำลังแสงเอาต์พุทของช่องสัญญาณที่หนึ่ง กับสัญญาณรบกวนข้ามช่องที่เกิดจากสัญญาณของช่องที่สอง (785 nm) เข้าไปรบกวนสัญญาณช่องที่หนึ่ง ในการวัดนั้นจะทำการวัดสัญญาณของช่องสัญญาณที่หนึ่งก่อนที่จะใส่สัญญาณช่องที่สองเข้าไปในระบบ หลังจากนั้นจึงทำการใส่สัญญาณช่องที่สองเข้าไปในระบบแล้วทำการวัดสัญญาณที่ช่องสัญญาณที่หนึ่ง สัญญาณของช่องสัญญาณที่หนึ่งที่เปลี่ยนแปลงไปจะเกิดจากการรบกวนของช่องสัญญาณที่สอง โดยในการทดลองได้ใส่กำลังแสงอินพุทของสัญญาณช่องที่หนึ่งและสองของระบบมีค่าคงที่ 2.0 มิลลิวัตต์ ผลของสัญญาณรบกวนข้ามช่องแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าสัญญาณรบกวนข้ามช่องที่ช่องสัญญาณที่หนึ่ง (670 nm)

การวัดสัญญาณ ครั้งที่	สัญญาณเอาต์พุทที่วัดได้ (μW)		สัญญาณรบกวนข้ามช่อง (dB)
	จากช่องสัญญาณที่หนึ่ง	จากช่องสัญญาณที่สอง	
1	26.2	0.007	-35.7
2	31.5	0.009	-35.4
3	29.4	0.008	-35.6
เฉลี่ย	29.0	0.008	-35.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการหาค่าสัญญาณรบกวนข้ามช่องที่ช่องสัญญาณที่สอง (785 mm) จะทำการวัดค่ากำลังแสงเอาต์พุตของช่องสัญญาณที่สอง กับสัญญาณรบกวนข้ามช่องที่เกิดจากสัญญาณของช่องที่หนึ่ง (670 nm) เข้าไปรบกวนสัญญาณช่องที่สอง ในการวัดนั้นจะทำการวัดสัญญาณของช่องสัญญาณที่สองก่อนที่จะใส่สัญญาณช่องที่หนึ่งเข้าไปในระบบ หลังจากนั้นจึงทำการใส่สัญญาณช่องที่หนึ่งเข้าไปในระบบแล้วทำการวัดสัญญาณที่ช่องสัญญาณที่สอง สัญญาณของช่องสัญญาณที่สองที่เปลี่ยนแปลงไปจะเกิดจากการรบกวนของช่องสัญญาณที่หนึ่ง โดยในการทดลองได้ใส่ค่ากำลังแสงอินพุตของสัญญาณช่องที่หนึ่งและสองของระบบมีค่าคงที่ 2.0 มิลลิวัตต์ ผลของสัญญาณรบกวนข้ามช่องแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าสัญญาณรบกวนข้ามช่องที่ช่องสัญญาณที่สอง (785 nm)

การวัดสัญญาณ ครั้งที่	สัญญาณเอาต์พุตที่วัดได้ (μW)		สัญญาณรบกวนข้ามช่อง (dB)
	จากช่องสัญญาณที่หนึ่ง	จากช่องสัญญาณที่สอง	
1	32.8	0.011	-34.7
2	30.5	0.009	-35.3
3	29.7	0.008	-35.7
เฉลี่ย	31.0	0.009	-35.4

4.5 ผลการศึกษาสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

ในการหาค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ของช่องสัญญาณที่หนึ่ง (670nm) จะทำการวัดสัญญาณของช่องสัญญาณที่หนึ่ง กับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณที่หนึ่ง ในการวัดนั้นจะทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตของช่องสัญญาณที่หนึ่งในขณะที่ยังไม่มีใส่สัญญาณอินพุตให้กับช่องสัญญาณที่หนึ่ง หลังจากนั้นจึงทำการใส่สัญญาณอินพุตให้กับช่องสัญญาณที่หนึ่ง แล้วจึงทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ช่องสัญญาณที่หนึ่ง โดยในการทดลองได้ใส่สัญญาณแสงอินพุตของสัญญาณช่องที่หนึ่งมีค่า $250 \text{ mV}_{\text{p-p}}$ ผลของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน แสดงผลได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ช่องสัญญาณที่หนึ่ง (670 nm)

การวัดสัญญาณ ครั้งที่	สัญญาณเอาต์พุตที่วัดได้ (mV_{p-p})		SNR (dB)
	สัญญาณข้อมูล	สัญญาณรบกวน	
1	1.8	0.3	7.78
2	2.4	0.3	9.03
3	2.2	0.3	8.65
เฉลี่ย	2.13	0.3	8.51

ในการหาค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ของช่องสัญญาณที่สอง (785nm) จะทำการวัดสัญญาณของช่องสัญญาณที่สอง กับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณที่สอง ในการวัดนั้นจะทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตของช่องสัญญาณที่สองในขณะที่ยังไม่มีกระแสสัญญาณอินพุตให้กับช่องสัญญาณที่สอง หลังจากนั้นจึงทำการใส่สัญญาณอินพุตให้กับช่องสัญญาณที่สอง แล้วจึงทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ช่องสัญญาณที่สอง โดยในการทดลองได้ใส่สัญญาณแสงอินพุตของสัญญาณช่องที่สองมีค่า $1.0 V_{p-p}$ ผลของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน แสดงผลได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ช่องสัญญาณที่สอง (785 nm)

การวัดสัญญาณ ครั้งที่	สัญญาณเอาต์พุตที่วัดได้ (mV_{p-p})		SNR (dB)
	สัญญาณข้อมูล	สัญญาณรบกวน	
1	2.0	0.3	8.24
2	2.4	0.3	9.03
3	2.6	0.3	9.38
เฉลี่ย	2.33	0.3	8.90

4.6 ผลการศึกษาอัตราการส่งบิตผิดพลาด

ในการหาค่าอัตราการส่งบิตผิดพลาด (BER) ในการทดลองนี้จะเป็นการหาค่าอัตราการส่งบิตผิดพลาด โดยทางอ้อม โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน กับอัตราการส่งบิตผิดพลาด ซึ่งวิธีนี้จะเป็นวิธีการหาค่าอัตราการส่งบิตผิดพลาดที่ให้ค่าอย่างหยาบๆเท่านั้น จากการทดลองพบว่าค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ช่องสัญญาณที่หนึ่ง (670 nm) มีค่า 8.51 dB ทำให้สามารถประมาณค่าอัตราการส่งบิตผิดพลาดของช่องสัญญาณที่หนึ่งมีค่าประ-

มาณ 3.0×10^{-5} และค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ช่องสัญญาณที่สอง (785 nm) มีค่า 8.90 dB ทำให้สามารถประมาณค่าอัตราการส่งบิตผิดพลาดของช่องสัญญาณที่สองมีค่าประมาณ 5.0×10^{-6}



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นแบบหนาแน่น (Dense Wave Division Multiplexing, DWDM) ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้เป็นวิธีที่ใช้โดยทั่วไปในระบบการสื่อสารด้วยแสงเนื่องจากเป็นวิธีที่คุ้มค่าในการเพิ่มอัตราการส่งผ่านข้อมูล โดยที่ยังสามารถใช้โครงข่ายเส้นใยนำแสงเดิมได้ ในการทดลองนี้ได้ออกแบบระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นขนาดสองช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่หนึ่งใช้สัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร และช่องสัญญาณที่สองใช้สัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น 785 นาโนเมตร จากระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นที่ได้ทำสร้างขึ้นมานั้นมีค่าแบนด์วิดท์สูงสุดของแต่ละช่องสัญญาณอยู่ที่ 1.5 MHz ซึ่งทำให้ค่าแบนด์วิดท์สูงสุดของระบบอยู่ที่ 3MHz ซึ่งจากค่าแบนด์วิดท์ดังกล่าวจะทำให้แต่ละช่องสัญญาณสามารถส่งผ่านข้อมูลได้ 2.68 Mbps ซึ่งทำให้ระบบสามารถส่งผ่านข้อมูลได้ 5.36 Mbps

จากการทดลองพบว่าระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นที่ได้ทำสร้างขึ้นมานั้นมีการสูญเสียกำลังทางแสง สัญญาณรบกวนข้ามช่อง สัญญาณต่อสัญญาณรบกวน และอัตราการส่งบิตผิดพลาด ของทั้งสองช่องสัญญาณมีค่าในระดับใกล้เคียงกัน โดยช่องสัญญาณที่สองจะมีค่าที่ต่ำกว่าช่องสัญญาณที่หนึ่งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งทำให้สรุปได้ว่าไม่มีความแตกต่างกัน

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น

ปัญหาที่เกิดขึ้นในโครงการพิเศษเพื่อการปรับปรุงและพัฒนาที่มีดังต่อไปนี้

1. เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Frequency Generator) ซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้แทนสัญญาณเบสแบนด์ของข้อมูล มีความสามารถในการกำเนิดสัญญาณได้ไม่ดีเพียงพอ เนื่องจากเครื่องกำเนิดสัญญาณมีความสามารถในการกำเนิดสัญญาณความถี่ได้สูงสุดเพียง 2 MHz ซึ่งในการทดลองต้องการเครื่องกำเนิดสัญญาณที่มีความสามารถในการกำเนิดสัญญาณความถี่สูงถึง 100 MHz

2. วงจรมอดูเลตสัญญาณไม่สามารถควบคุมสัญญาณแสงของไดโอดเลเซอร์ได้ดีเท่าที่ควร ในช่วงที่ใช้ความถี่สัญญาณสูงๆ ทำให้กำลังแสงของไดโอดเลเซอร์ในช่วงความถี่สัญญาณสูงๆมีค่าต่ำลงทำให้ไม่สามารถส่งสัญญาณความถี่สูงๆผ่านระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นที่ได้ทำการสร้างไว้ได้

3. อุปกรณ์รับสัญญาณแสงที่ได้สร้างขึ้นมีการขยายสัญญาณที่ต่ำ ทำให้ระดับสัญญาณเอาท์พุทมีค่าที่ต่ำ
4. ไม่สามารถสร้างระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นแบบหนาแน่นขนาด 32 ช่องสัญญาณได้ เนื่องจากการสร้างมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นที่มีจำนวนช่องสัญญาณมาก ๆ นั้น จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์รับสัญญาณแสง อุปกรณ์ในการมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสง วงจรมอดูเลตสัญญาณและไดโอดเลเซอร์ที่มีจำนวนมากเท่ากับจำนวนช่องสัญญาณนั้นๆ ดังนั้นจึงต้องใช้งบประมาณที่สูงมาก
5. การจัดวางอุปกรณ์เพื่อการมัลติเพล็กซ์ การนำเข้าสู่เส้นใยนำแสง การดีมัลติเพล็กซ์ และการนำเข้าสู่อุปกรณ์รับสัญญาณแสง ยังทำได้ไม่แน่นอนเหมือนเดิมตลอดทุกครั้ง หรือดีที่สุด ทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณแสง และทำให้ในการวัดสัญญาณทางแสงในแต่ละครั้งมีค่าไม่แม่นยำเท่าที่ควร
6. ระบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นที่สร้างขึ้นมานี้มีค่าการสูญเสียกำลังทางแสงที่สูง ทำให้ไม่สามารถส่งผ่านสัญญาณแสงในระยะทางที่ไกลได้

5.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป

1. ควรใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Frequency Generator) ที่มีความสามารถในการกำเนิดสัญญาณให้เหมาะสมกับการทดลอง
2. ปรับปรุงวงจรมอดูเลตสัญญาณให้สามารถควบคุมสัญญาณแสงของไดโอดเลเซอร์ได้ดีตลอดในช่วงที่ใช้ความถี่สัญญาณสูงๆ
3. ปรับปรุงอุปกรณ์รับสัญญาณแสงให้มีการขยายสัญญาณที่ดีขึ้น โดยการออกแบบวงจรถ่ายสัญญาณให้กับอุปกรณ์รับสัญญาณแสง
4. พัฒนาและลดต้นทุนในการสร้างระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นแบบหนาแน่น ให้สามารถสร้างได้ด้วยงบประมาณที่ต่ำได้
5. ต้องปรับปรุงและพัฒนาการจัดวางอุปกรณ์เพื่อการมัลติเพล็กซ์ การนำเข้าสู่เส้นใยนำแสง การดีมัลติเพล็กซ์ และการนำเข้าสู่อุปกรณ์รับสัญญาณแสง ให้มีความแม่นยำมากขึ้นเพื่อให้ความถูกต้องในการวัดและเปรียบเทียบ
6. ปรับปรุงและแก้ไขการสูญเสียสัญญาณในส่วนต่างของระบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น เพื่อที่จะสามารถส่งผ่านสัญญาณแสงในระยะทางที่ไกลได้

เอกสารอ้างอิง

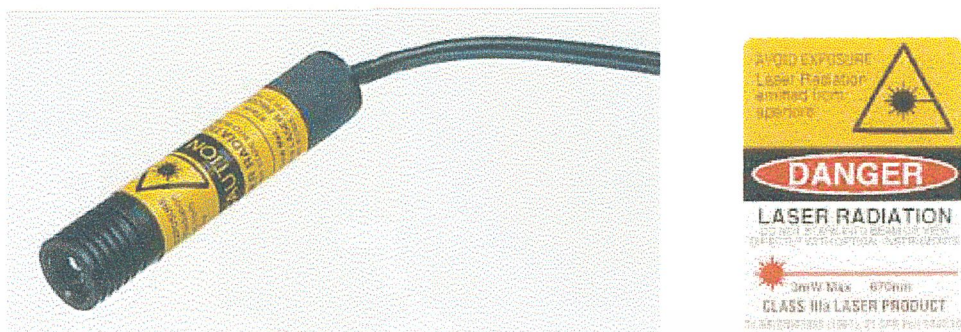
- [1] <http://www.cableu.net>
- [2] J.P. Laude , **Wavelength Division Multiplexing** , Prentice Hall , London , 1993.
- [3] สุวรรณ คุุสัารานู , **ทัศนศาสตร์กายภาพ** , คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , กรุงเทพฯ , 2537.
- [4] ปรีชา ยูพาพิน , **วิศวกรรมใยแก้วนำแสง** , สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) , กรุงเทพฯ , 2544.
- [5] ปรีชา ยูพาพิน , **เครือข่ายใยแก้วนำแสง** , สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) , กรุงเทพฯ , 2543.
- [6] อภินันท์ มัฒยานนท์ , **การสื่อสารเส้นใยแสง** , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , กรุงเทพฯ , 2536.
- [7] Goff, David R. , **Fiber optic reference guide** , Force Incorporated , Washington , 1996.
- [8] พรอนันต์ มีศรี , **การศึกษาาระบบส่งสัญญาณทางแสงและสัญญาณรบกวนข้ามช่อง** , วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต วิทยานิพนธ์ , คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , กรุงเทพฯ , 2543.

ภาคผนวก ก

ไดโอดเลเซอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 แสดงมอดูลไดโอดเลเซอร์ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร



รูปที่ 2 แสดงมอดูลไดโอดเลเซอร์ความยาวคลื่น 785 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติไดโอดเลเซอร์

Parameter	Value RS stock no.		Unit
	194-004	111-368	
Nominal wavelength	670	785	nm
Maximum power output	3	3	mW
Beam size	4.5 × 2.5		mm
Spot size at minimum focus	100		micron
Typical power output stability (at 20°C)	2		%
Output aperture diameter	6.0		mm
Typical power output temperature dependence	15		μW/°C
Operating voltage	-8 to -12		V
Operating temperature	-10 to +40	-10 to +50	°C
Intensity variation with supply voltage	0.6		%/V
Modulation type	analog or digital		
Modulation frequency bandwidth (-3dB point)	100 Hz to 50 MHz		
Modulation input voltage	-1 to 7		V
Frequency range	100 Hz to 100 MHz		
Modulation depth (pulse)	90		%
Mean time to failure (MTTF) at 30°C	20,000	32,000	hours

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

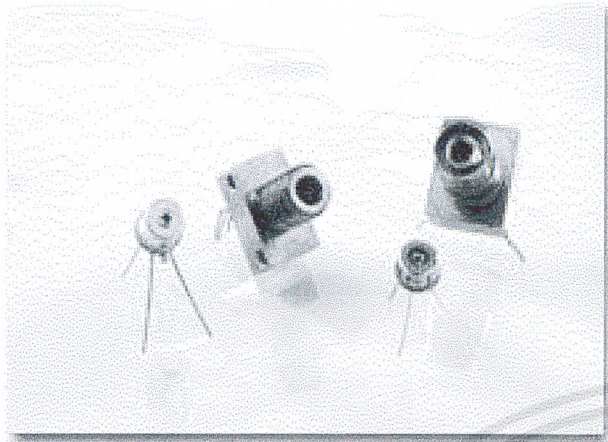
ภาคผนวก ข

พินโพโตไดโอด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FIBER OPTIC SERIES



APPLICATIONS

FEATURES

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Fiber Optic Communication Links • Video Systems • Laser Monitoring Systems • Computers and Peripherals • Industrial Controls • Guidance Systems • FDDI Local Area Networks • High Speed Optical Communications | <ul style="list-style-type: none"> • Speeds in sub ns • High gain • Low dark current • Low capacitance • TO-46 metal can
With lensed cap |
|---|---|

UDT Sensors offers a variety of fiber optic detectors. They include:

Fiber Optic Series-Silicon: are several families of small active area silicon photodiodes divided into High Responsivity Series (HR), High Speed Series (HS) and Ultra High Speed (UHS) series.

Fiber Optic Series-Silicon / Hybrid: is a 90 MHz integrated silicon photodetector / transimpedance amplifier hybrid with a single power supply and linear differential output voltage for applications such as Ethernet and token ring systems. This detector is available with a micro lens cap.

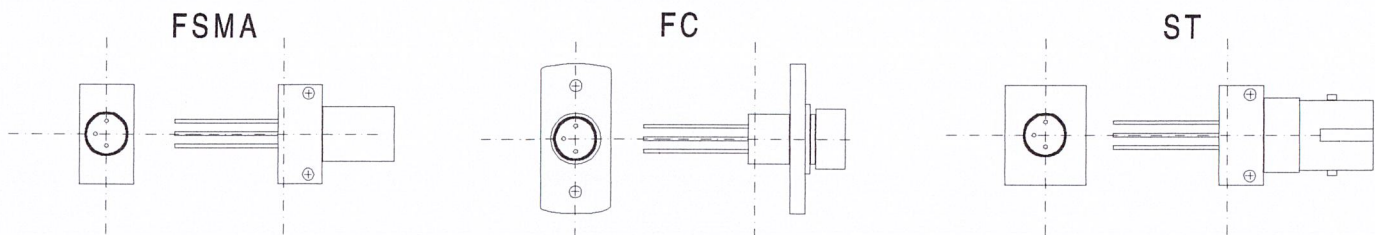
Fiber Optic Series-Silicon APD: is a small active area Silicon Avalanche Photodiode with gains up to a few hundred with a typical reverse bias of

only 325 V. It provides high gain bandwidth product and high responsivity compared to detector/transimpedance amplifier combination.

Fiber Optic Series-Silicon BPX-65: is a 1 x 1 mm active area high speed silicon photodetector for high modulation bandwidth applications where a large active area is needed.

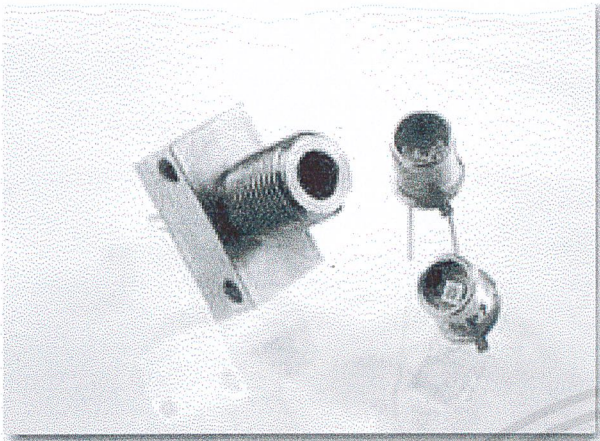
Fiber Optic Series-InGaAs: devices are high speed InGaAs detectors exhibiting a spectral range of 850 to 1700 nm. These detectors are specially designed for NIR optical communication, providing high responsivity, low capacitance and high speed. They are available with micro lens cap.

All of the above detectors and /or hybrids are also available with a spherical micro lens cap to enhance fiber optic coupling efficiency. They can also be provided with any of the standard receptacles such as SMA, ST, FC, etc., for direct optical fiber coupling.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FIBER OPTIC series



APPLICATIONS

- Fiber Optic Communications
- Laser Warning Systems
- Encoders

FEATURES

- TO-18 Flat Glass Pkg
- High Speed
- 1 X 1 mm active area

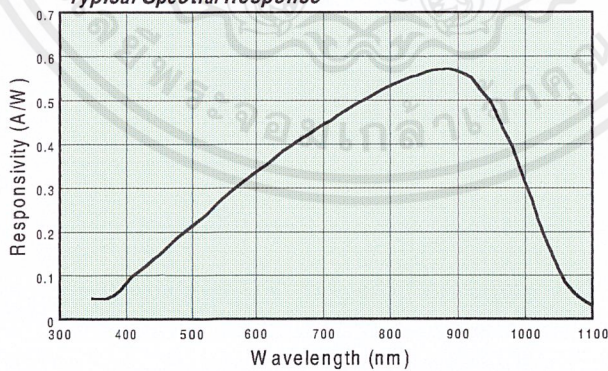
BPX65 is a high speed 1 x 1 mm active area photodiode designed for applications with high modulation bandwidth including fiber optics. A TO-18 with a flat window houses this low dark current device. It is also available with a micro lens cap as well as standard fiber optic receptacles such as SMA, FC and ST, for fiber coupling enhancement and higher efficiency.

TYPICAL ELECTRO-OPTICAL SPECIFICATION AT TA=23°C

Model No.	Active Area		Peak Wavelength (nm)	Responsivity (A/W)		Capacitance (pF) 1 MHz		Dark Current (nA)		NEP (W/√Hz)	Reverse Voltage (V)	Rise Time (ns)		Temp Range (°C)		Package Style ¶1
	Area (mm ²)	Dimension (mm)		peak		-20 V 1 MHz		-20 V		-20V 970 nm	max	-20 V 830 nm 50 Ω		Operating	Storage	
				min	typ	typ	max	typ	max	typ		max	typ			
BPX65	1.0	1.0 sq	900	0.50	0.55	3.0	4	0.50	5.0	2.3 e-14	50	2.0	3.0	-25 ~ +85	-40 ~ +100	7/TO-18

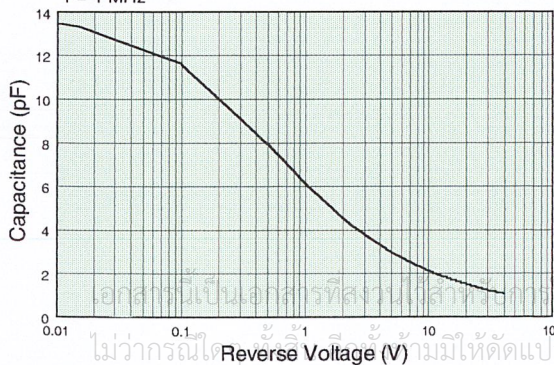
[MECHANICAL DRAWING Click Here](#)

Typical Spectral Response

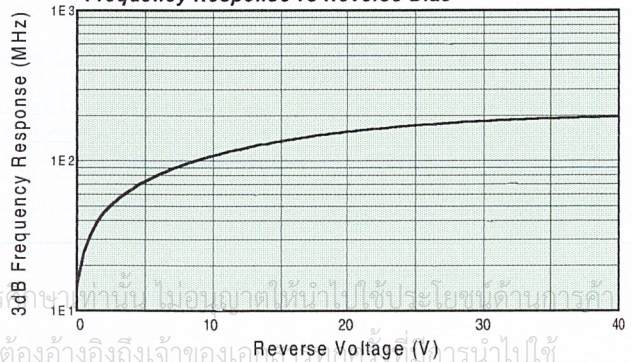


Typical Capacitance vs Reverse

f = 1 MHz

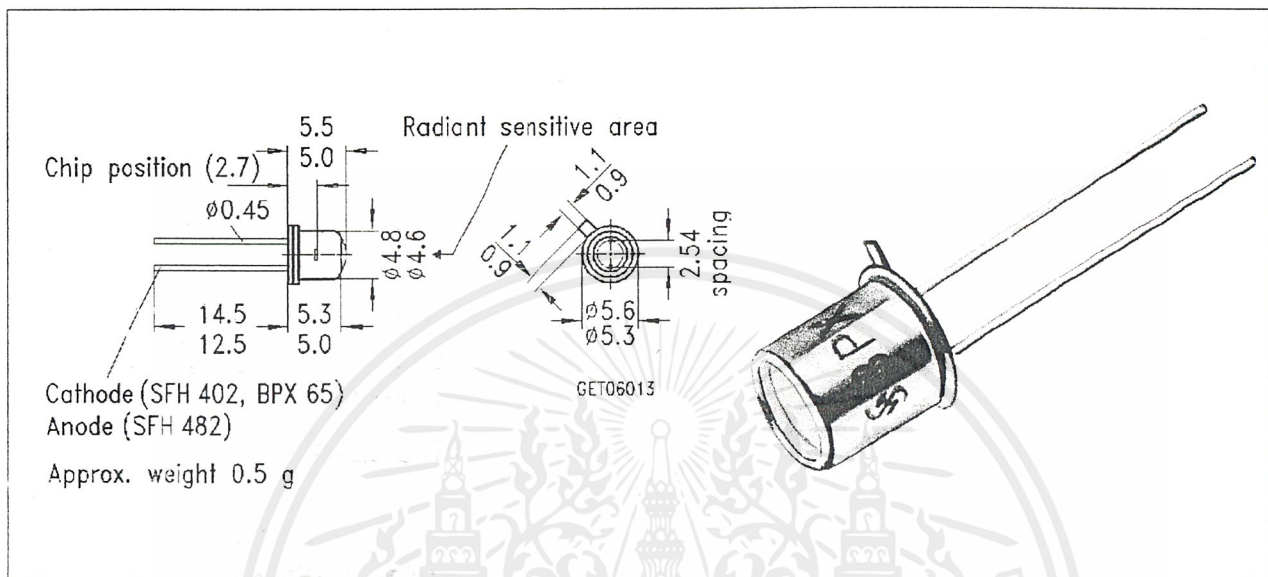


Frequency Response vs Reverse Bias



Silizium-PIN-Fotodiode Silicon PIN Photodiode

BPX 65
BPX 66



Maße in mm, wenn nicht anders angegeben/Dimensions in mm, unless otherwise specified.

Wesentliche Merkmale

- Speziell geeignet für Anwendungen im Bereich von 350 nm bis 1100 nm
- BPX 65: Hohe Fotoempfindlichkeit
- BPX 66: Sperrstromarm (typ. 150 pA)
- Hermetisch dichte Metallbauform (TO-18), geeignet bis 125 °C¹⁾

Anwendungen

- schneller optischer Empfänger mit großer Modulationsbandbreite

Features

- Especially suitable for applications from 350 nm to 1100 nm
- BPX 65: high photosensitivity
- BPX 66: low reverse current (typ. 150 pA)
- Hermetically sealed metal package (TO-18), suitable up to 125 °C¹⁾

Applications

- Fast optical sensor of high modulation bandwidth

Typ Type	Bestellnummer Ordering Code	Gehäuse Package
BPX 65	Q62702-P27	18 A3 DIN 41870, planes Glasfenster, hermetisch dichtes Gehäuse, Lötspieße im 2.54-mm-Raster (² / ₁₀ "), Anodenkennzeichnung: Nase am Gehäuseboden
BPX 66	Q62702-P80	18 A3 DIN 41870, flat glass lens, hermetically sealed package, solder tabs 2.54 mm (² / ₁₀ ") lead spacing, anode marking: projection at package bottom

¹⁾ Eine Abstimmung der Einsatzbedingungen mit dem Hersteller wird empfohlen bei $T_A > 85$ °C

¹⁾ For operating conditions of $T_A > 85$ °C please contact us.

Grenzwerte
Maximum Ratings

Bezeichnung Description	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Betriebs- und Lagertemperatur Operating and storage temperature range	$T_{op}; T_{stg}$	-40 ... +80	°C
Löttemperatur (Lötstelle 2 mm vom Gehäuse entfernt bei Lötzeit $t \leq 3s$) Soldering temperature in 2 mm distance from case bottom ($t \leq 3s$)	T_S	230	°C
Sperrspannung Reverse voltage	V_R	50	V
Verlustleistung, $T_A = 25\text{ °C}$ Total power dissipation	P_{tot}	250	mW

Kennwerte ($T_A = 25\text{ °C}$, Normlicht A, $T = 2856\text{ K}$)
Characteristics ($T_A = 25\text{ °C}$, standard light A, $T = 2856\text{ K}$)

Bezeichnung Description	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Fotoempfindlichkeit, $V_R = 5\text{ V}$ Spectral sensitivity	S	10 (≥ 5.5)	nA/lx
Wellenlänge der max. Fotoempfindlichkeit Wavelength of max. sensitivity	$\lambda_{S\max}$	850	nm
Spektraler Bereich der Fotoempfindlichkeit $S = 10\%$ von S_{\max} Spectral range of sensitivity $S = 10\%$ of S_{\max}	λ	350 ... 1100	nm
Bestrahlungsempfindliche Fläche Radiant sensitive area	A	1.00	mm ²
Abmessung der bestrahlungsempfindlichen Fläche Dimensions of radiant sensitive area	$L \times B$ $L \times W$	1 x 1	mm
Abstand Chipoberfläche zu Gehäuseoberfläche Distance chip front to case surface	H	2.25 ... 2.55	mm
Halbwinkel Half angle	φ	± 40	Grad deg.

Kennwerte ($T_A = 25\text{ °C}$, Normlicht A, $T = 2856\text{ K}$)Characteristics ($T_A = 25\text{ °C}$, standard light A, $T = 2856\text{ K}$)

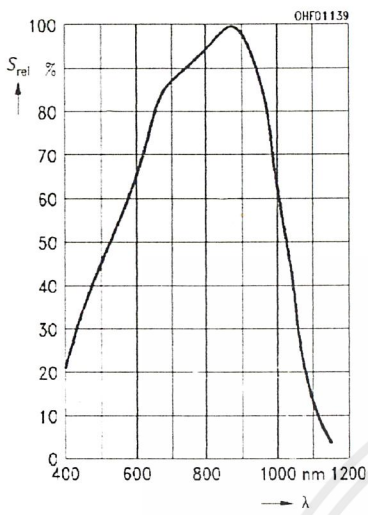
Bezeichnung Description	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Dunkelstrom Dark current BPX 65: $V_R = 20\text{ V}$ BPX 66: $V_R = 1\text{ V}$	I_R	1 (≤ 5) 0.15 (≤ 0.3)	nA
Spektrale Fotoempfindlichkeit, $\lambda = 850\text{ nm}$ Spectral sensitivity	S_λ	0.55	A/W
Quantenausbeute, $\lambda = 850\text{ nm}$ Quantum yield	η	0.80	Electrons Photon
Leerlaufspannung, $E_V = 1000\text{ lx}$ Open-circuit voltage	V_L	320 (≥ 270)	mV
Kurzschlußstrom, $E_V = 1000\text{ lx}$ Short-circuit current	I_K	10	μA
Anstiegs und Abfallzeit des Fotostromes Rise and fall time of the photocurrent $R_L = 50\ \Omega$; $V_R = 5\text{ V}$; $\lambda = 850\text{ nm}$; $I_p = 800\ \mu\text{A}$	t_r, t_f	12	ns
Durchlaßspannung, $I_F = 100\text{ mA}$, $E = 0$ Forward voltage	V_F	1.3	V
Kapazität, $V_R = 0\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$, $E = 0$ Capacitance	C_0	11	pF
Temperaturkoeffizient von V_L Temperature coefficient of V_L	TC_V	-2.6	mV/K
Temperaturkoeffizient von I_K Temperature coefficient of I_K	TC_I	0.2	%/K
Rauschäquivalente Strahlungsleistung Noise equivalent power $V_R = 20\text{ V}$, $\lambda = 850\text{ nm}$	NEP	3.3×10^{-14}	$\frac{\text{W}}{\sqrt{\text{Hz}}}$
Nachweisgrenze, $V_R = 20\text{ V}$, $\lambda = 850\text{ nm}$ Detection limit	D^*	3.1×10^{12}	$\frac{\text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}}}{\text{W}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

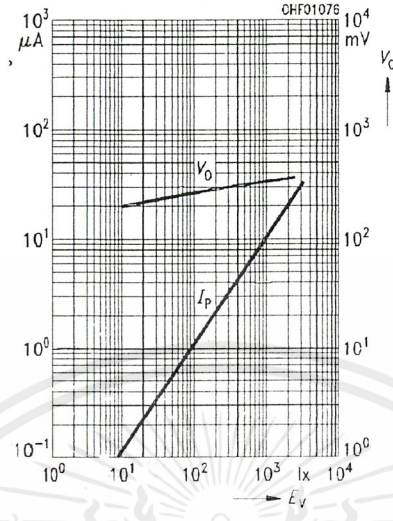
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Relative spectral sensitivity

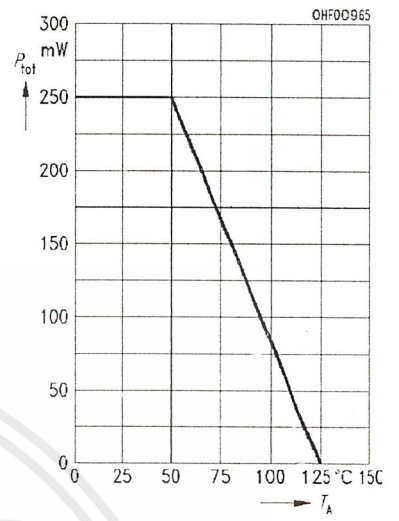
$$S_{rel} = f(\lambda)$$



Photocurrent $I_P = f(E_V), V_R = 5 V$ Open-circuit-voltage $V_L = f(E_V)$

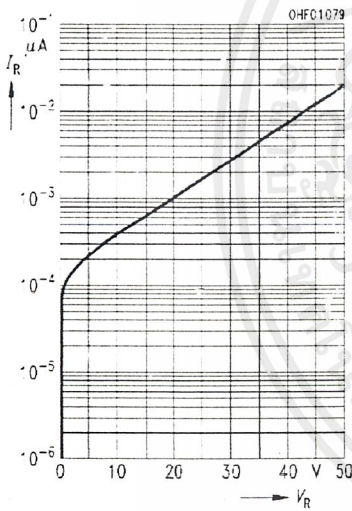


Total power dissipation $P_{tot} = f(T_A)$



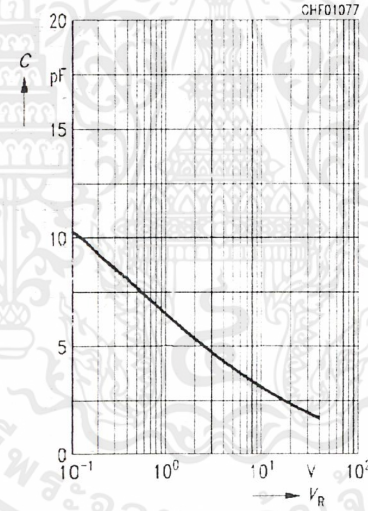
Dark current

$$I_R = f(V_R), E = 0$$



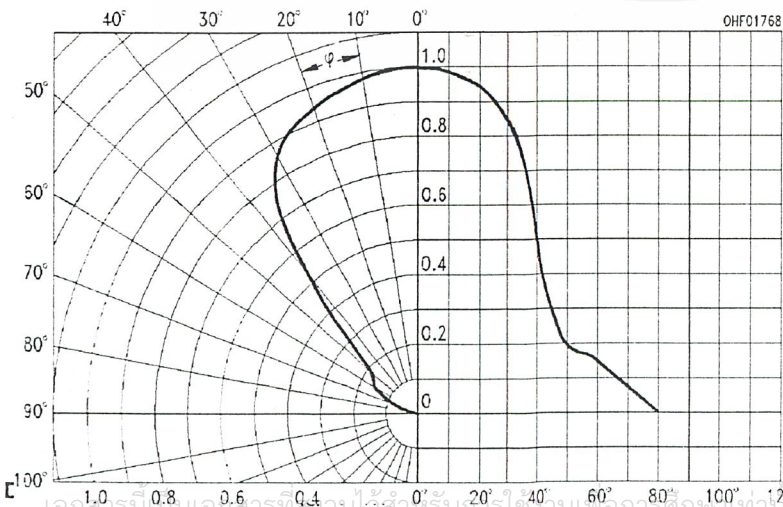
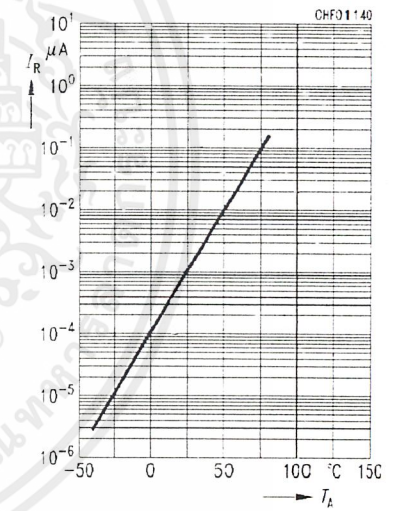
Capacitance

$$C = f(V_R), f = 1 \text{ MHz}, E = 0$$



Dark current

$$I_R = f(T_A), V_R = 20 V, E = 0$$



ประวัติผู้เขียนปริญญาบัตร

นางสาวณัฐ ศรีวิบูลย์ชัย เกิดเมื่อวันที่ 25 มิถุนายน พุทธศักราช 2522 ที่จังหวัดระยอง สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนระยองวิทยาคม จังหวัดระยอง เมื่อปีการศึกษา 2540 จากนั้นได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาตรีที่ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2541

นาง พุทธิพงษ์ เหมะวณิช เกิดเมื่อวันที่ 7 พฤษภาคม พุทธศักราช 2523 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนทวีธาภิเศก จังหวัดกรุงเทพฯ เมื่อปีการศึกษา 2539 จากนั้นได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาตรีที่ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2541

