

ระบบส่งภาพและเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

Video and Voice transmission via optical fiber system



โดย

นายชินทร์ เหมกมล

นายชาคริต ศรีบุญยามาศ

เลขหมู่..... 61805  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี 21 11.ค. 2549

b. 11586369  
i. ....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

นางสาว วรพารีย์  
*(Handwritten signature)*

ภาควิชา  
วิศวกรรมโทรคมนาคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบส่งภาพและเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง  
Video and Voice transmission via optical fiber system

โดย

นายชินนทร์ เหมกมล 44010088

นายชาคริต ศรีบุญญามาศ 44010109



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.อภิรักษ์ มัณยานนท์

ดร.สุทธิชัย นพนาถิพงษ์

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2547

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบส่งภาพและเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

**Video and Voice transmission via optical fiber system**

ผู้จัดทำ

1. นายชนินทร์ เหมกมล 44010088
2. นายชาคริต ศรีบุญมาศ 44010109

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ผศ.อภิรักษ์ มั่นยานนท์ )

*ผศ. สุทธิชัย นพนาถิพงษ์*  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ดร.สุทธิชัย นพนาถิพงษ์ )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้คนเดียวเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบส่งภาพและเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง  
Video and Voice transmission via optical fiber system

โดย นายชนินทร์ เหมกมล 44010088

นายชาคริต ศรีบุญยามาศ 44010109

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.อภิรักษ์ มัชฌานนท์

ดร.สุทธิชัย นพนาถิพงษ์

**บทคัดย่อ**

ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของคนเรา โดยเฉพาะการสื่อสารซึ่งให้ความสะดวกสบาย ตลอดจนความรวดเร็ว ดังนั้นเราจึงพยายามสร้างสิ่งต่างๆ เพื่อที่จะตอบสนองต่อความต้องการ โดยในส่วนของโครงการนี้เป็นการออกแบบระบบที่ใช้ในการส่งสัญญาณภาพและเสียง โดยผ่านตัวกลางเส้นใยแก้วนำแสง ไปยังผู้ใช้บริการ ซึ่งการสื่อสารด้วยแสงนั้นมีประโยชน์เป็นอย่างมาก เนื่องจากการสื่อสารด้วยแสงนั้นเป็นระบบที่มีการรบกวนต่ำ

**ABSTRACT**

At present, technologies play vital roles in our daily lives, especially communication that gives us convenience. So we try to develop communication system in the order to respond them. This project presents a design of video and voice transmission via optical fiber to subscribers. The optical communication is a new technology that very useful because it is a low noise system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	2
2.1 การสื่อสาร	2
2.1.1 แบบสัญญาณอนาลอก (Analog)	2
2.1.1.1 แอมพลิจูดมอดูเลชัน (Amplitude Modulation)	2
2.1.1.2 ฟรีแควนซีมอดูเลชัน (Frequency Modulation)	2
2.1.1.3 เฟสมอดูเลชัน (Phase Modulation)	2
2.1.2 แบบสัญญาณดิจิทัล (Digital)	3
2.2 แสงคืออะไร	3
2.2.1 คุณสมบัติที่สำคัญของแสง	5
2.2.2 ค่าดัชนีการหักเหของแสง	6
2.2.3 ปฏิกิริยาการสะท้อนกลับหมด	7
2.2.4 แสงเดินทางไปในเส้นใยแสง	7
2.3 อุปกรณ์ปล่อยแสง	8
2.3.1 โครงสร้างของการกำเนิดแสง	8
2.3.2 โครงสร้างและการทำงานของอุปกรณ์ปล่อยแสงของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)	10
2.3.3 สารที่ใช้ในการสร้างและโครงสร้างของอุปกรณ์ปล่อยแสง	14
2.3.3.1 สารที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ปล่อยแสง	14
2.3.3.2 โครงสร้างของอุปกรณ์ปล่อยแสง	15
2.3.3.2.1 P-N Junction	15
2.3.3.2.2 โครงสร้าง LD	16
2.3.3.2.3 โครงสร้างของ LED (Light Emitting Diode)	19
2.3.4 คุณสมบัติต่างๆของอุปกรณ์ปล่อยแสง	21
2.4 โฟโตไดโอด (Photodiode)	23
2.4.1 หลักการเบื้องต้นของโฟโตไดโอด	23
2.4.2 เวลาในการตอบสนอง (Response Time)	24
2.4.2.1 Transit Time ( $t_{cc}$ )	25
2.4.2.2 Diffusion Time ( $t_{diff}$ )	26
2.4.2.3 RC Time Constant ( $t_{rc}$ )	26
2.4.3 สัญญาณรบกวนในโฟโตไดโอด	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3.1 สัญญาณรบกวนควอนตัม (Quantum Noise)	26
2.4.3.2 สัญญาณรบกวนเชิงประทุ (Short Noise)	26
2.4.3.3 สัญญาณรบกวนเชิงความร้อน (Thermal Noise)	27
2.4.3.4 Dark Noise	27
2.4.3.5 สัญญาณรบกวนรวม (Total Noise)	27
2.4.4 โหมดการทำงานของโฟโตไดโอด (Photodiode Circuit Operating Modes)	27
2.4.4.1 Photovoltaic Mode	27
2.4.4.2 Photoconductive Mode	28
2.5 เส้นใยแสง	28
2.5.1 การป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยแสง	29
2.5.2 ชนิดของเส้นใยแสง	31
2.5.2.1 การแบ่งเส้นใยแสงตามชนิดของสาร Dielectric	31
2.5.2.2 การแบ่งชนิดของเส้นใยแสงตามจำนวน Propagation Mode	31
2.5.2.2.1 Single Mode (SM)	31
2.5.2.2.2 Multi Mode (MM)	31
2.5.2.3 การแบ่งชนิดของเส้นใยแสงตามลักษณะของดัชนีการหักเห	32
2.5.2.3.1 Step Index Optic Fiber (SI – Fiber)	32
2.5.2.3.2 Graded Index Optic Fiber (GI – Fiber)	32
2.5.3 การสูญเสียแสงในเส้นใยแสง	33
2.5.3.1 การสูญเสียแสงที่เกิดจากการดูดแสง (Absorption Loss)	34
2.5.3.2 การสูญเสียแสงที่เกิดจากการกระจัดกระจายแบบเรย์ลี (Rayleigh Scattering Loss)	34
2.5.3.3 การสูญเสียจากการกระจัดกระจายอันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในเส้นใยแสง (Ununiformity Loss)	35
2.5.3.4 การสูญเสียจากการกระจัดกระจายอันเนื่องมาจากการโค้งงอของเส้นใยแสง (Bending Loss)	35
2.5.3.5 การสูญเสียที่เกิดจากการโค้งงอแบบ Micro Bending	36
2.5.3.6 การสูญเสียที่เกิดจากการต่อเส้นใยแสง (Connection Loss)	36
2.5.3.7 การสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างเส้นใยแสง กับอุปกรณ์กำเนิดแสง และอุปกรณ์รับแสง (Coupling Loss)	36
2.5.4 การขยายกว้างออก (Dispersion) และ Transmission Bandwidth ของเส้นใยแสง	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.4.1 การขยายกว้างออก (Dispersion)	36
2.5.4.2 การขยายกว้างออกของความยาวคลื่น (Wavelength Dispersion)	37
2.5.4.3 ขนาดความกว้าง Bandwidth ของการส่ง (Transmission Bandwidth)	38
2.6 องค์ประกอบของสัญญาณภาพ	39
2.6.1 สัญญาณลูมิแนนซ์(Luminance Signal)	39
2.6.2 สัญญาณควบคุมตำแหน่งภาพ	40
2.6.3 สัญญาณเบิสท์(Burst Signal)	42
2.6.4 วงจรเฟสล็อกคูลูป	42
2.6.5 พารามิเตอร์ของระบบ	46
2.6.6 การประยุกต์ใช้งานของเฟสล็อกคูลูป (PLL)	49
<b>บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง</b>	51
3.1 เครื่องส่ง	51
3.1.1 วงจรพรีแอมป์ไฟเออร์ (Pre Amplifier)	51
3.1.2 วงจรมอดูเลตทางความถี่ (Frequency Modulator)	52
3.1.3 วงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Summing Circuit)	52
3.1.4 วงจรขับสัญญาณแสง (Driver Circuit)	53
3.2 เครื่องรับ	53
3.2.1 วงจรตรวจจับสัญญาณแสง (Photo Detector)	53
3.2.2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ( Low Pass Filter )	54
3.2.3 วงจรกรองย่านความถี่ผ่าน (Band Pass Filter)	54
3.2.4 วงจรดีมอดูเลตทางความถี่ (FM Demodulator)	55
3.2.5 วงจรขยายสัญญาณวิดีโอ	55
3.2.6 วงจรขยายสัญญาณเสียง (Audio Amplifier)	56
<b>บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง</b>	59
4.1 วงจรพรีแอมป์ไฟเออร์ (Pre Amplifier)	59
4.2 วงจรมอดูเลตทางความถี่ (FM Modulator)	59
4.3 วงจรรวมสัญญาณ (Summing Circuit)	60
4.4 วงจรขับสัญญาณแสง (Driver Circuit)	61
4.5 วงจรตรวจจับสัญญาณแสง (Photo Detector)	62
4.6 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter )	62
4.7 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter )	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.8 วงจรดีมอดูเลตทางความถี่ (FM Demodulator)	63
4.9 วงจรขยายสัญญาณเสียง (Audio Amplifier)	64
บทที่ 5 บทวิจารณ์และบทสรุป	65
ภาคผนวก	
หนังสืออ้างอิง	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงสัญญาณที่มอดูเลทแบบแอมพลิจูดมอดูเลชัน, เฟริควนซีมอดูเลชันและเฟสมอดูเลชัน	2
รูปที่ 2.2 แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	3
รูปที่ 2.3 แสดงแสงชนิดต่างๆและแสดงสีและค่าความยาวคลื่นของ Visible Light	4
รูปที่ 2.4 แสดงแสงที่ทะลุผ่านและแสงที่สะท้อนกลับที่รอยต่อของตัวกลาง 2 ชนิด	5
รูปที่ 2.5 แสดงการเกิด Interference ของคลื่น	6
รูปที่ 2.6 แสดงปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดของแสง	7
รูปที่ 2.7 แสดง โครงสร้างของเส้นใยแสง	7
รูปที่ 2.8 แสดงการให้พลังงานและการปล่อยพลังงาน	8
รูปที่ 2.9 แสดง โครงสร้างและระดับพลังงานของอะตอม	9
รูปที่ 2.10 แสดงระดับพลังงานและขั้นตอนของการ Transfer	9
รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างการจัดอิเล็กตรอนและ Nucleus ในสารกึ่งตัวนำ	11
รูปที่ 2.12 แสดงระดับพลังงานในสารกึ่งตัวนำ	11
รูปที่ 2.13 แสดงหลักการของ Oscillation ของแสง	12
รูปที่ 2.14 แสดงการเกิด Standing Wave ของแสง	13
รูปที่ 2.15 แสดงความยาวคลื่นต่างๆของ Laser	13
รูปที่ 2.16 แสดงช่วงความยาวคลื่นแสงของ LED	14
รูปที่ 2.17 แสดงความยาวคลื่นแสงที่ปล่อยออกมาของสารประกอบกึ่งตัวนำแต่ละชนิด	14
รูปที่ 2.18 แสดงระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำแบบ P-Type และ N-Type	15
รูปที่ 2.19 แสดงสนามไฟฟ้าภายในและระดับพลังงานของ P-N Junction	16
รูปที่ 2.20 แสดงโครงสร้างทั่วไปของ LD	16
รูปที่ 2.21 แสดง โครงสร้าง, ระดับพลังงานและลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีการหักเหของ LD	17
รูปที่ 2.22 แสดงโครงสร้างแบบ Planar Stripe	18
รูปที่ 2.23 แสดงโครงสร้างของ Embedding Stripe Type	19
รูปที่ 2.24 แสดงโครงสร้างและระดับพลังงานของ LED	20
รูปที่ 2.25 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของ LED แบบปล่อยแสงด้านหน้า	20
รูปที่ 2.26 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของ LED แบบปล่อยแสงทางด้านข้าง	21
รูปที่ 2.27 แสดง output waveform ของแสงและการผสมในการส่งสัญญาณดิจิทัล	21
รูปที่ 2.28 แสดงการผสมแบบ Light Intensity Modulation	22
รูปที่ 2.29 แสดงภาพหน้าตัดของโฟโตไดโอด	23
รูปที่ 2.30 แสดงโครงสร้างของ PIN Photodiode และ Energy Bandgap	24
รูปที่ 2.31 แสดง PIN Photodiode ขณะได้รับ ไป้อิสัย้อนกลับและ Profile ของสนามไฟฟ้า	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.32 การเปรียบเทียบพัลส์อินพุตและพัลส์เอาต์พุตเป็นผลเนื่องมาจาก Diffusion Time	26
รูปที่ 2.33 แสดงวงจรเทียบเคียงของกระแสที่เกิดขึ้นกับกระแส Noise	28
รูปที่ 2.34 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยแสง	29
รูปที่ 2.35 แสดงผลของ NA และขนาดของ Core ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเชื่อมต่อแสงระหว่างต้นกำเนิดแสงกับเส้นใยแสง	30
รูปที่ 2.36 แสดงลักษณะการเดินทางของแสงใน Core ของเส้นใยแสงแต่ละชนิด	33
รูปที่ 2.37 แสดงสาเหตุต่างๆที่ทำให้เกิดการสูญเสียแสง	33
รูปที่ 2.38 แสดงคุณสมบัติการสูญเสียแสงที่เกิดจากการดูดแสงของเส้นใยแสงที่ทำจากแก้ว	34
รูปที่ 2.39 แสดง Scattering ของแสงในบรรยากาศ	35
รูปที่ 2.40 แสดงการเกิด Dispersion ของเส้นใยแสง	38
รูปที่ 2.41 แสดงสัญญาณลุมิแนนซ์กับสัญญาณภาพสีรวม	39
รูปที่ 2.42 แสดงรูปร่างของสัญญาณซึ่งตั้งอยู่ในสัญญาณภาพโทรทัศน์	40
รูปที่ 2.43 การสร้างสัญญาณภาพสีรวม	41
รูปที่ 2.44 ลักษณะการสร้างสัญญาณโครมา	42
รูปที่ 2.45 บล็อกไดอะแกรมของเฟสล็อกลูป	43
รูปที่ 2.46 แสดงถึงการไม่เชิงโคโรไนซ์ของเออร์เรอร์บิตไนต์ในช่วงของขบวนการแคปเจอร์	45
รูปที่ 2.47 โมเดลเชิงเส้น PLL ในลักษณะของระบบป้อนกลับ	46
รูปที่ 2.48 รุทโลกัสของ PLL	47
รูปที่ 2.49 รุทโลกัสของ PLL	48
รูปที่ 2.50 แสดงถึง Transfer Characteristics ของความถี่กับ โวลต์เตจของ PLL	49
รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่ง	51
รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับ	51
รูปที่ 3.3 แสดงวงจรพีเอ็มอีเอ็ม	51
รูปที่ 3.4 วงจรมอดูเลตทางความถี่ 10.7 MHz	52
รูปที่ 3.5 แสดงวงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟส	53
รูปที่ 3.6 วงจรขับสัญญาณแสง	53
รูปที่ 3.7 แสดงวงจรตรวจจับสัญญาณแสง	54
รูปที่ 3.8 แสดงวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน	54
รูปที่ 3.9 วงจรกรองย่านความถี่ผ่าน 10.7 MHz	55
รูปที่ 3.10 วงจรคีมอดูเลตสัญญาณ FM	55
รูปที่ 3.11 วงจรขยายสัญญาณภาพ	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.12 วงจรขยายสัญญาณเสียง	56
รูปที่ 3.13 แสดงวงจรรวมของเครื่องส่ง	57
รูปที่ 3.14 แสดงวงจรรวมของเครื่องรับ	58
รูปที่ 4.1 แสดงสัญญาณสัญญาณเอาต์พุต (ch1) เทียบกับสัญญาณอินพุต (ch2) ของ วงจรพีแอมป์ไฟเออร์	59
รูปที่ 4.2 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรมอดูเลเตอร์ที่มีความถี่คลื่นพาห์ 10.75 MHz เมื่อยังไม่ได้ป้อนอินพุต	59
รูปที่ 4.3 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรมอดูเลเตอร์(ch1) ที่มีความถี่คลื่นพาห์ 10.75 MHz เมื่อป้อนอินพุตเป็นสัญญาณไซน์ 4 kHz (ch2)	60
รูปที่ 4.4 แสดงสัญญาณอินพุตทั้งสองสัญญาณของวงจรรวมสัญญาณ	60
รูปที่ 4.5 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรรวมสัญญาณ	61
รูปที่ 4.6 แสดงสัญญาณอินพุต (ch2) เทียบกับเอาต์พุต (ch1)	61
รูปที่ 4.7 แสดงสัญญาณด้านฝั่งส่ง (ch2) เทียบกับเอาต์พุตของวงจร (ch1)	62
รูปที่ 4.8 แสดงกราฟผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 10.75 MHz	62
รูปที่ 4.9 แสดงกราฟผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร กรองความถี่ต่ำผ่าน 5.5 MHz	63
รูปที่ 4.10 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรมอดูเลเตอร์ (ch2) เทียบกับสัญญาณอินพุต ของวงจร (ch1)	63
รูปที่ 4.11 แสดงสัญญาณเอาต์พุตเทียบกับสัญญาณป้อนเข้าที่ความถี่ 2 KHz	64
รูปที่ 4.12 แสดงสัญญาณเอาต์พุตเทียบกับสัญญาณป้อนเข้าที่ความถี่ 12 KHz	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

ความซับซ้อนในสังคมปัจจุบันทำให้ความต้องการข่าวสารความรู้ต่างๆ เพิ่มขึ้นเพื่อประโยชน์ในการดำเนินชีวิตประจำวัน รวมทั้งความเคลื่อนไหวในทางธุรกิจ อุตสาหกรรม การเมืองการปกครอง ความต้องการข่าวสารจำนวนมากมายเช่นนี้ทำให้เทคโนโลยีของการสื่อสารต้องมีการพัฒนาอย่างสอดคล้อง และในท่ามกลางพัฒนานั้น แสงได้ถูกเลือก นำมาใช้เป็นตัวกลางการในการสื่อสารเนื่องจากได้เปรียบดังนี้

1. ช่วงกว้าง (Bandwidth) ของความถี่ที่ใช้จำนวนมาก ทำให้ส่งข้อมูลข่าวสารได้มาก รวมทั้งสามารถให้บริการสื่อสารข้อมูลที่มีความเร็วสูง

2. ความยาวคลื่นต่ำ ทำสายอากาศหรือแหล่งกำเนิดคลื่นแสงมีขนาดเล็กมาก รวมถึงขนาดของท่อนำคลื่น (Waveguide) เป็นผลให้ระบบมีขนาดเล็กและส่งข่าวสารไปได้มากโดยที่สายส่งจำเป็นต้องมีขนาดใหญ่

นอกจากนี้ การสูญเสียในท่อนำคลื่นหรือเส้นใยแก้ว (Optical Fiber) ที่ต่ำและอุปกรณ์รับแสงที่มีความไว (Sensitivity) สูง ซึ่งมีผลทำให้ข่าวสารไปได้ไกล ทำให้ระบบการสื่อสารด้วยแสงเริ่มนำมาใช้อย่างกว้างขวาง และมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว

การส่งสัญญาณแสงผ่านอากาศไปโดยไม่ใช้เส้นใย ก็สามารถทำได้ แต่เนื่องจาก แสงมีความเร็วสูง จึงทำให้เกิดการลดทอน (Attenuate) โดยชั้นบรรยากาศสูง และถูกรบกวนจาก เมฆ ฝน และฝุ่นละอองได้ง่าย การนำไปใช้งานในการสื่อสารระยะไกลจึงเป็นไปได้ยาก แต่สามารถนำไปใช้ในการส่งข่าวสารระยะใกล้ๆ ได้เช่น ภายในห้องทำงาน ซึ่งการเส้นใยแสงเป็นการสิ้นเปลืองเกินไป

การติดต่อสื่อสารสัญญาณโดยการใช้คลื่นแสงเป็นคลื่นแสงเป็นคลื่นพาหะในการนำพาข้อมูลข่าวสารไปยังปลายทางนั้นเป็นการสื่อสารที่ประสิทธิภาพ ซึ่งมีเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ คือ

1. การเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นแสง เช่น ไดโอดเปล่งแสง (LED) และ เลเซอร์ไดโอด (Laser Diode)

2. การนำพาสัญญาณแสงไปยังปลายทาง เช่น การส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

3. การเปลี่ยนสัญญาณแสงให้กลับเป็นสัญญาณไฟฟ้า เช่น โฟโตไดโอด (Photo Diode) ในปัจจุบันทั้งเครื่องส่งและเครื่องรับใช้การแบบไดเรกตีเทคชันอินเทนซิติมีอดูเลชัน (Direct Detection Intensity Modulation) ซึ่งเป็นการทำให้กำลังของแสงเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณข้อมูลข่าวสาร ซึ่งประสิทธิภาพของการส่งและการรับจะขึ้นอยู่กับกำลังของแสงเป็นหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การสื่อสาร

การสื่อสารคือ การส่งข่าวสารจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง การสื่อสารประกอบด้วย 3 ส่วนคือ

- แหล่งกำเนิด หรือผู้ส่ง
- สื่อกลาง หรือตัวกลาง
- แหล่งรับ หรือผู้รับ

เนื่องจาก สัญญาณข่าวสารโดยทั่วไปนั้นจะไม่เหมาะสมที่จะส่งผ่านตัวกลางโดยตรง จึงต้องมีการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมกับตัวกลางแต่ละชนิด โดยทำการมอดูเลชัน (Modulation) เราสามารถแบ่งชนิดของระบบสื่อสารได้เป็น 2 แบบ ตามลักษณะสัญญาณที่ใช้ในระบบคือ

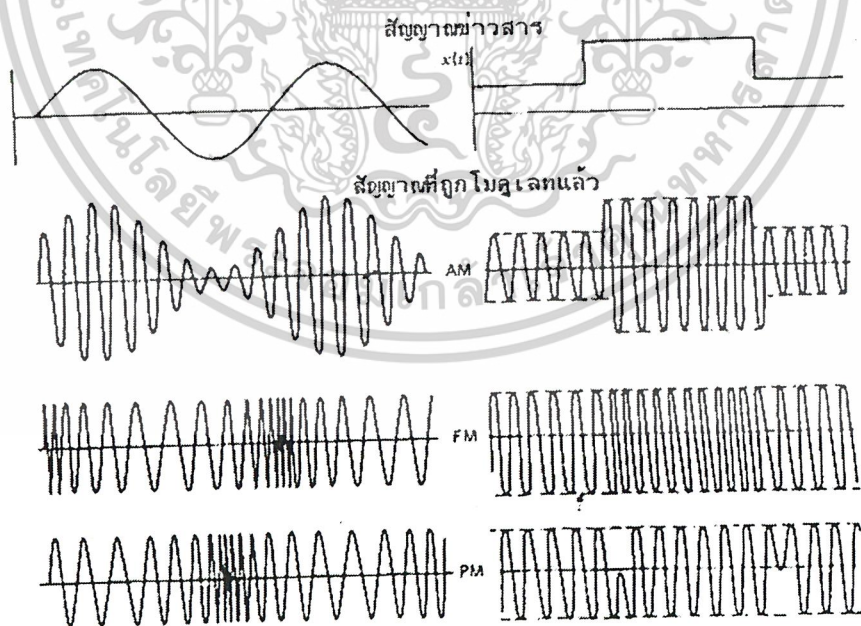
#### 2.1.1 แบบสัญญาณอนาลอก (Analog)

เป็นการนำสัญญาณข่าวสารมามอดูเลชัน กับสัญญาณคลื่นพาห์ที่มีความถี่สูงกว่า แบ่งได้เป็น

2.1.1.1 แอมพลิจูดมอดูเลชัน (Amplitude Modulation) เป็นการใช้นาของสัญญาณข่าวสารมาทำให้แอมพลิจูดของคลื่นพาห์เปลี่ยนแปลงตามระดับของสัญญาณข่าวสาร

2.1.1.2 ฟรีเควนซีมอดูเลชัน (Frequency Modulation) เป็นการใช้นาของสัญญาณข่าวสารมาทำให้ความถี่ของคลื่นพาห์เปลี่ยนแปลงตามระดับของสัญญาณข่าวสาร

2.1.1.3 เฟสมอดูเลชัน (Phase Modulation) เป็นการใช้นาของสัญญาณข่าวสารมาทำให้เฟสของคลื่นพาห์เปลี่ยนแปลงตามระดับของสัญญาณข่าวสาร



รูปที่ 2.1 แสดงสัญญาณที่มอดูเลทแบบแอมพลิจูดมอดูเลชัน, ฟรีเควนซีมอดูเลชันและเฟสมอดูเลชัน

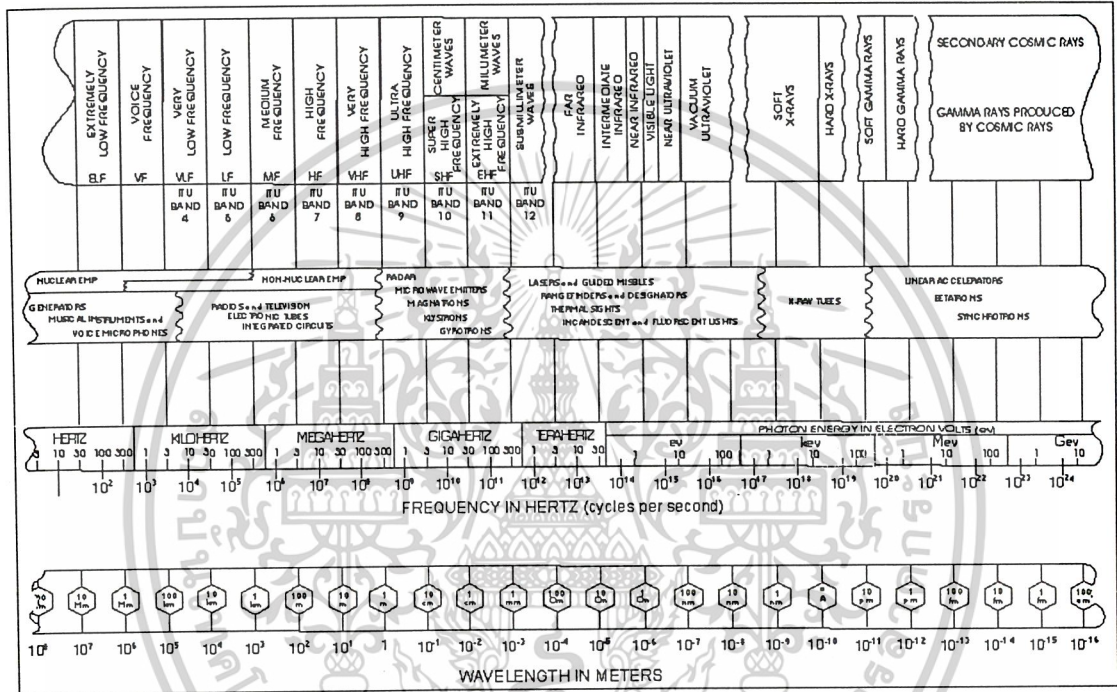
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 แบบสัญญาณดิจิทัล (Digital)

เป็นการนำสัญญาณข่าวสารที่มีลักษณะเป็นอนาลอกมาแปลงเป็นรหัสเลขฐานสองหรือฐานสิบหก โดยการนำข่าวสารที่เป็นสัญญาณอนาลอก มาสุ่มตัวอย่าง แล้วนำค่าที่ได้ไปแปลงเป็นรหัสไบนารี

### 2.2 แสงคืออะไร

ในทางฟิสิกส์ถือว่า แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง เช่นเดียวกับคลื่นที่ใช้ในการส่งโทรทัศน์ วิทยุ แสง X-Ray ที่ใช้ในทางการแพทย์สำหรับตรวจร่างกาย แสง Gamma-Ray ที่ใช้ในการรักษาโรคต่างๆ ก็เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งนั้น หรืออีกนัยหนึ่งก็คือเป็นคลื่นประเภทเดียวกันกับแสง



รูปที่ 2.2 แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

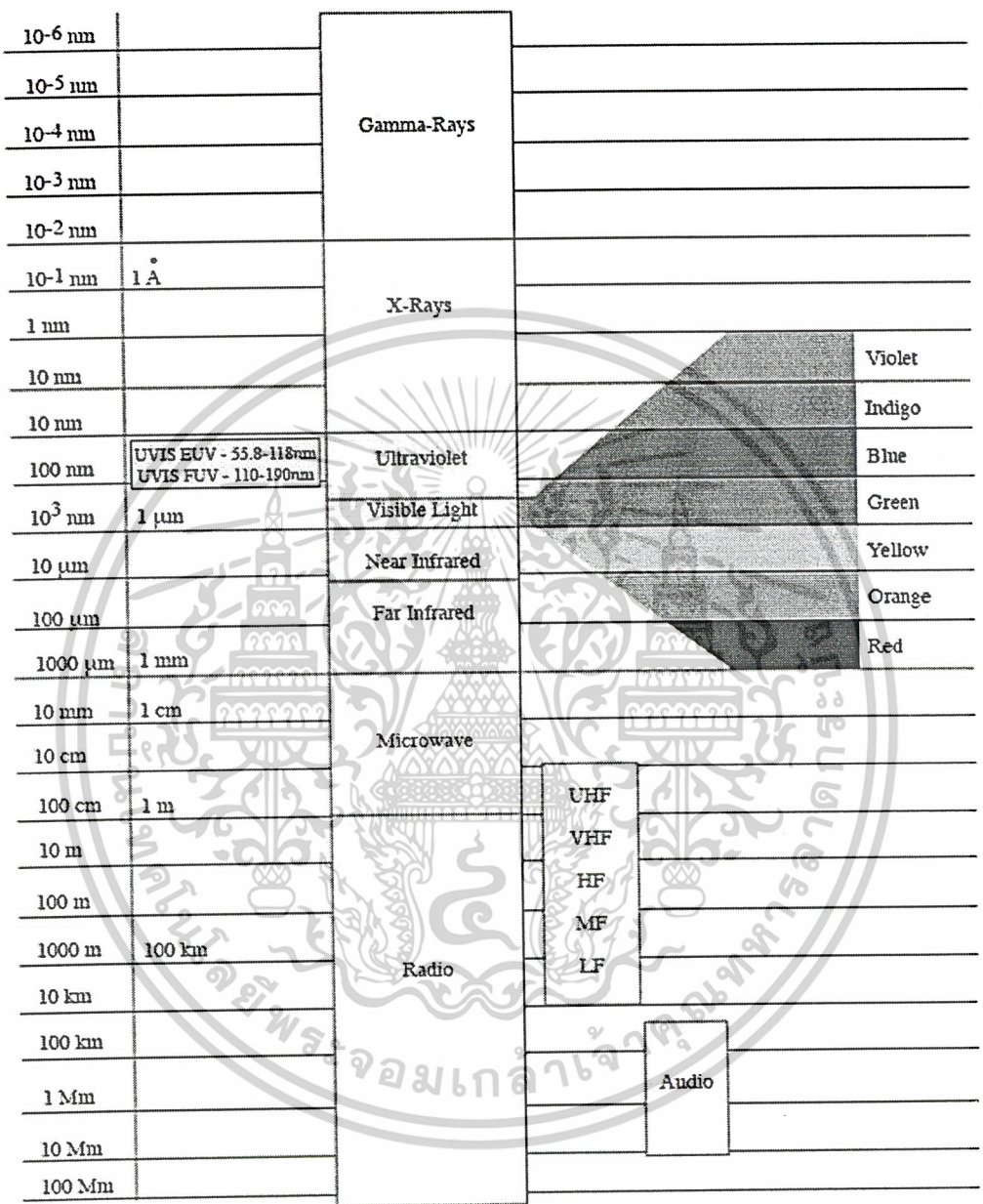
สำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีความถี่ หรือความยาวคลื่นค่าต่างๆกันดังแสดงในรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีช่วงความยาวคลื่นจากหลายร้อย Micrometer ( $\mu\text{m} : 10^{-6}\text{m}$ ) ไปจนถึงหลาย Nanometer ( $\text{nm} : 10^{-9}\text{m}$ ) นั้นเรียกว่าแสง (Light, Optic) ส่วนคลื่นวิทยุเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นมากกว่าแสง

สำหรับแสงนั้นยังแบ่งชนิดตามค่าความยาวคลื่นได้เป็น

- Far Infrared
- Infrared
- Near Infrared
- Visible Light
- Near Ultra Violet
- Ultraviolet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังแสดงในรูปที่ 2.3 แต่มีข้อสังเกตคือ ไม่มีการแบ่งช่วงของแสงต่างๆชัดเจน แสงที่ตามนุษย์เรามองเห็นได้นั้นจะอยู่ในช่วง 380 – 400 nm ไปจนถึง 760 – 800 nm แสงที่อยู่ในช่วงนี้เรียกว่า Visible Light



nm=nanometer, Å=angstrom, μm=micrometer, mm=millimeter, cm=centimeter, m=meter, km=kilometer, Mm=Megameter

รูปที่ 2.3 แสดงแสงชนิดต่างๆและแสดงสีและค่าความยาวคลื่นของ Visible Light

อนึ่งแสง Visible Light ที่มีความยาวคลื่นต่างกันนั้นจะมีสีต่างกันออกไป กล่าวคือแสงที่มีความยาวคลื่นยาวจะมีสีแดง ส่วนแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นจะมีสีออกไปทางสีน้ำเงินดังแสดงในรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

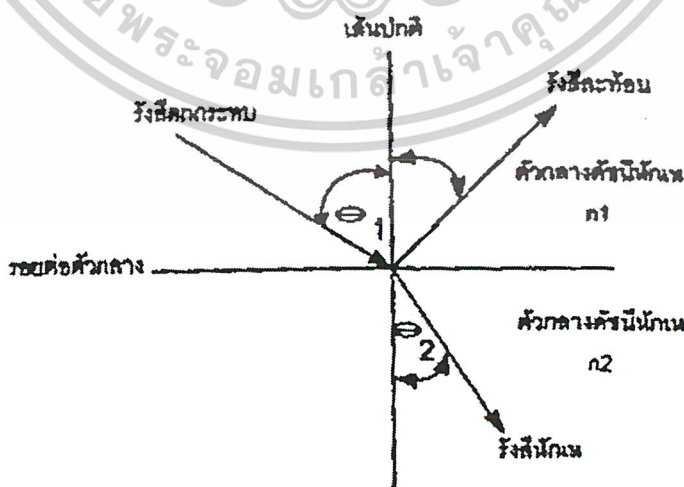
### 2.2.1 คุณสมบัติที่สำคัญของแสง

คุณสมบัติที่สำคัญของแสงมี 3 ประการคือ

1. เดินทางเป็นเส้นตรง กล่าวคือในตัวกลางเดียวกันนั้นแสงจะเดินทางเป็นเส้นตรง ตัวอย่างที่เราคุ้นเคยได้แก่ เงา, การฉายหนังตะลุง เป็นต้น
2. การสะท้อนกลับ กล่าวคือตรงรอยต่อของตัวกลางต่างชนิดกันส่วนหนึ่งของแสงที่ตกกระทบ จะเกิดการสะท้อน ตัวอย่างที่เราคุ้นเคยได้แก่ เงาของต้นไม้และวิวทิวทัศน์ที่ทอดลงในสระน้ำ หรือทะเลสาบ เป็นต้น ซึ่งเกี่ยวกับการสะท้อนกลับนั้นมีกฎของการสะท้อนกลับกล่าวว่า แสงตกกระทบกับแสงสะท้อนในตัวกลางเดียวกันนั้นมุมตกกระทบของมันจะเท่ากับมุมสะท้อนกลับเสมอ
3. การหักเห กล่าวคือ ตรงรอยต่อของตัวกลางต่างชนิดกันนั้น หลังจากที่แสงตกกระทบแล้ว ส่วนที่ไม่สะท้อนกลับจะเดินทางไปในตัวกลางอีกชนิดหนึ่งแต่ทิศทางการเดินทางจะเปลี่ยนไป ตัวอย่างที่เราคุ้นเคยได้แก่ ปรากฏการณ์ที่เราเห็นส่วนล่างของช้อนชาที่จุ่มอยู่ในแก้วบรรจุน้ำบิดงอ เกี่ยวกับการหักเหของแสงนี้มีกฎที่สำคัญอันหนึ่งคือ Snell's Law จากรูปที่ 2.4 สมมติว่ามีตัวกลาง 2 อัน โดยตัวกลางอันที่ 1 มีค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็น  $n_1$  และตัวกลางที่ 2 มีค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็น  $n_2$  ถ้ามีแสงตกกระทบที่ตัวกลางอันที่ 1 ด้วยมุมตกกระทบ  $\theta_1$  และหักเหเข้าไปในตัวกลางอันที่ 2 ด้วยมุมหักเห  $\theta_2$  ในกรณีนี้จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\theta_1, \theta_2, n_1, n_2$  ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

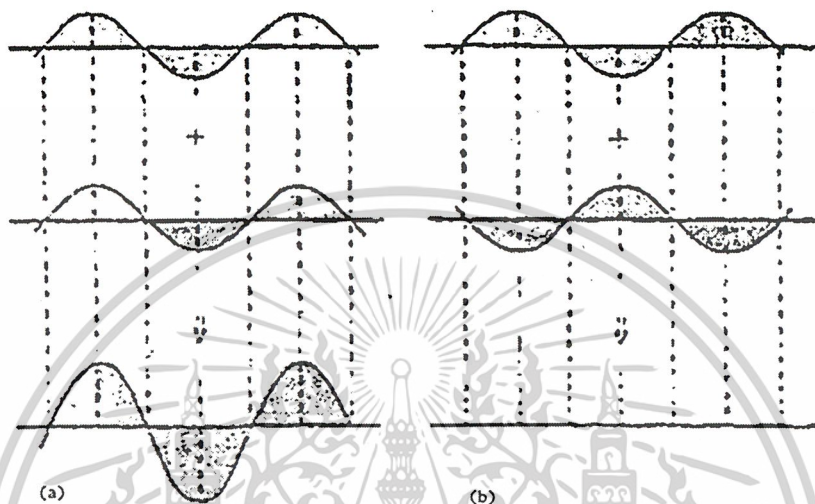
สมการนี้เรียกว่า Snell's Law จากสมการนี้จะเห็นได้ว่าเมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำไปยังที่มีค่าดัชนีการหักเหสูงนั้นทิศทางมักเบนออกจากรอยต่อของตัวกลางทั้ง 2 ในทางตรงกันข้ามถ้าหากแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหสูงไปยังที่มีค่าดัชนีการหักเหต่ำทิศทางมักจะเบนเข้าหารอยต่อของตัวกลางทั้ง 2



รูปที่ 2.4 แสดงแสงที่ทะลุผ่านและแสงที่สะท้อนกลับที่รอยต่อของตัวกลาง 2 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนั้นเนื่องจากแสงนั้นเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งเหมือนกันดังนั้นมันจึงมีคุณสมบัติพิเศษของคลื่นอยู่ด้วยนั่นคือ Interference ระหว่างคลื่น 2 คลื่น คำว่า Interference นั้นหมายความว่า ณ บริเวณหนึ่ง ถ้ามีคลื่น 2 คลื่นมาถึงในเวลาเดียวกันแล้ว ความแรงของคลื่นณบริเวณนั้นจะเกิดจากปรากฏการณ์ที่ความแรงของคลื่นทั้งสองรวมกัน หรือหักล้างกัน ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Interference ตัวอย่างเช่นดังรูป 2.5(a) คลื่นทั้งสองมีเฟสตรงกันพอดี ผลก็คือ คลื่นทั้งสองจะหักล้างกัน ปรากฏการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นกับแสงเหมือนกัน



รูปที่ 2.5 แสดงการเกิด Interference ของคลื่น

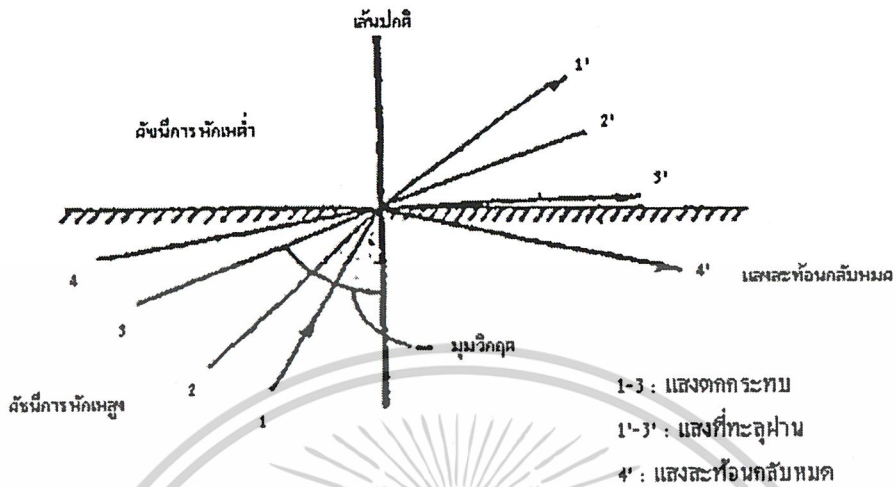
### 2.2.2 ค่าดัชนีการหักเหของแสง

ที่รอยต่อของตัวกลางต่างชนิดกัน เช่น อากาศกับน้ำ อากาศกับแก้ว แสงจะหักเหและเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ การหักเหของแสงนี้จะมากขึ้นหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าที่แตกต่างกันไปตามชนิดของตัวกลางที่ประกอบกันตรงรอยต่อ ถ้าหากทราบชนิดของตัวกลางทั้งสองที่ประกอบกันตรงรอยต่อ เราจะสามารถรู้หรือกำหนดขนาดของการหักเหของแสงได้ การแสดงขนาดของการหักเหของแสงเมื่อแสงเดินทางจากอากาศเข้าไปยังตัวกลางใดตัวกลางหนึ่ง ปรากฏการณ์การหักเหของแสงนี้เกิดจากการที่ความเร็วในการเดินทางของแสงจะแตกต่างกันตามชนิดของตัวกลาง กล่าวคือความเร็วของแสงในอากาศ  $3 \times 10^8$  m/sec แต่ถ้าเป็นตัวกลางอื่นความเร็วของแสงจะมีค่าน้อยลง เช่น ในน้ำแสงจะมีความเร็วประมาณ  $3/4$  ของความเร็วแสงในอากาศ ในแก้วจะมีความเร็วเป็น  $2/3$  ในเพชรจะมีความเร็วลดลงเป็น  $2/5$  ความจริงแล้วค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นการแสดงอัตราส่วนความเร็วแสงในอากาศกับความเร็วของแสงในตัวกลางชนิดใดชนิดหนึ่ง ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$n = \text{ความเร็วแสงในอากาศ} / \text{ความเร็วแสงในตัวกลางใดๆ}$$

2.2.3 ปรากฏการณ์การสะท้อนกลับหมด

สมมติว่าแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหสูง ไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำ แสงที่เดินทางเข้าไปในตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหต่ำจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.6



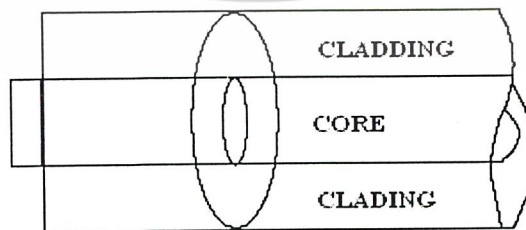
รูปที่ 2.6 แสดงปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดของแสง

กล่าวคือ แสงจะหักเหออกจากเส้นปกติและค่อยๆ เข้าหารอยต่อของตัวกลางทั้งสอง ดังนั้น ถ้าทำให้มุมตกกระทบ  $\theta_1$  มีค่ามากขึ้นๆ จนกระทั่งค่าหนึ่งแสงจะเดินทางขนานไปกับแนวรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง มุมตกกระทบที่ทำให้แสงเดินทางขนานไปกับแนวรอยต่อของตัวกลางทั้งสองเรียกว่า มุมวิกฤต (Critical Angle ใช้สัญลักษณ์  $\theta_c$ ) ในกรณีที่ทำให้มุมตกกระทบมีค่ามากกว่ามุมวิกฤตขึ้นไปจะทำให้แสงหยุดเดินทางผ่านไปยังตัวกลางที่สองแต่แสงที่ตกกระทบทั้งหมดจะเกิดการสะท้อนกลับหมดปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การสะท้อนกลับหมด

สรุปได้ว่า การสะท้อนกลับหมดเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเฉพาะในกรณีที่แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหสูงไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหต่ำเท่านั้น และในกรณีที่แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหสูงนั้นจะไม่เกิดการสะท้อนกลับหมด

2.2.4 แสงเดินทางไปในเส้นใยแสง

อันดับแรกเรามาดูโครงสร้างของเส้นใยก่อน ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7แสดง โครงสร้างของเส้นใยแสง

จากรูปจะเห็นได้ว่า เส้นใยแสงประกอบด้วยโครงสร้าง 2 ชั้น คือส่วนในเรียกว่า Core ทำหน้าที่เป็นสายส่งสัญญาณแสงเดินทางผ่าน กับส่วนนอกเรียกว่า Cladding ซึ่งห่อหุ้มอยู่ด้านนอกของ Core ทำ

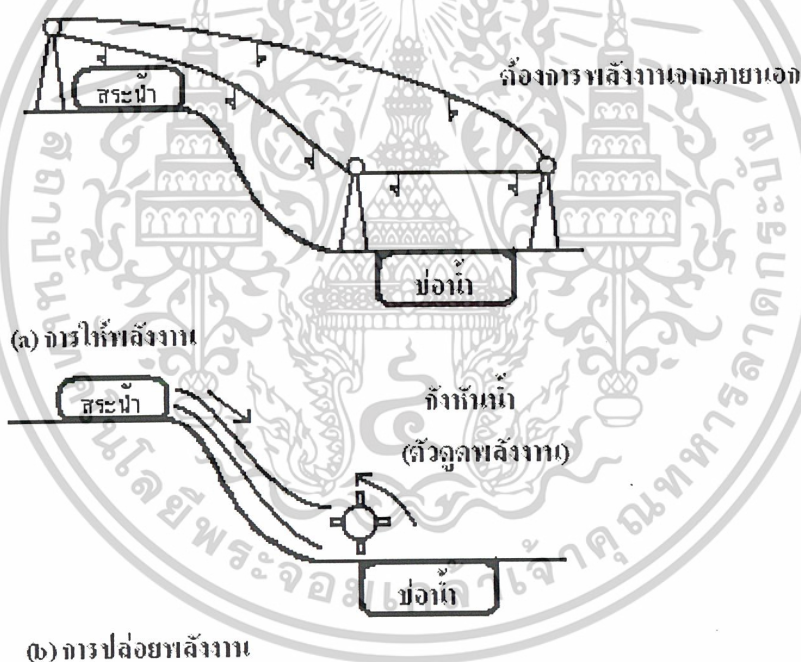
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าที่บังคับให้แสงนั้นเดินทางอยู่ใน Core และสร้างความแข็งแรงทางเมคานิกส์แก่เส้นใยแสง อนึ่งค่าดัชนีการหักเหของแสงของ Core นั้นโดยทั่วไปจะมีค่า 1.463 – 1.467 (แตกต่างกันตามชนิดของเส้นใยแสง) และค่าดัชนีการหักเหของแสงของ Cladding มีค่า 1.45 – 1.46 นั่นคือค่าดัชนีการหักเหของแสงของ Core จะมีค่ามากกว่าดัชนีการหักเหของแสงของ Cladding เล็กน้อย ดังนั้นเมื่อแสงใน Core มีค่ามุมตกกระทบที่รอยต่อของ Core กับ Cladding มากกว่ามุมวิกฤติ แสงจะเกิดปรากฏการณ์การสะท้อนกลับหมด ทำให้แสงเดินทางไปใน Core เป็นระยะทางไกล โดยไม่รู้ว่ออกไปในส่วนที่เป็น Cladding เลย

## 2.3 อุปกรณ์ปล่อยแสง

### 2.3.1 โครงสร้างของการกำเนิดแสง

เป็นที่ทราบกันทั่วไปแล้วว่า การที่กระแสไหลนั้นเป็นปรากฏการณ์ที่อิเล็กตรอนภายในสารที่ประกอบเป็นตัวกลางนั้นเคลื่อนที่ไปนั่นเอง แต่ทว่าอิเล็กตรอนนี้หากไม่มีแรงภายนอกมากระทำแล้วมันจะอยู่ในตำแหน่งที่มันคงไม่มีการเปลี่ยนแปลง เช่นเดียวกับกระแสในแม่น้ำที่ไหลจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

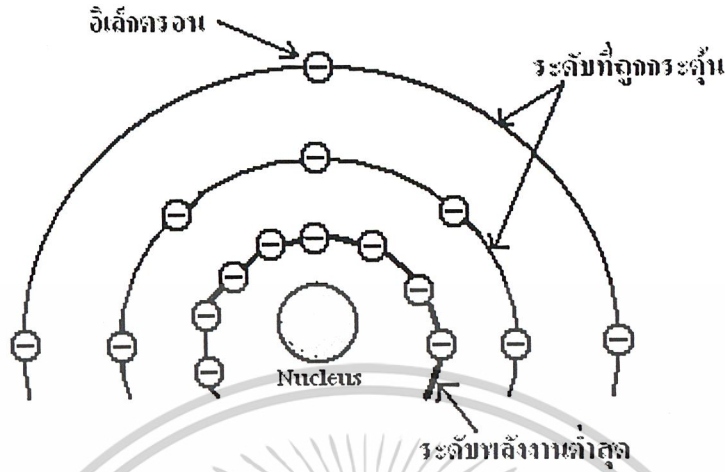


รูปที่ 2.8 แสดงการให้พลังงานและการปล่อยพลังงาน

สมมติว่าเราต้องการที่จะขนน้ำในบ่อขึ้นไปเก็บเอาไว้ในอ่างเก็บน้ำบนภูเขาดังแสดงในรูปที่ 2.8a เราจำเป็นต้องใช้รถ, ลิฟต์ หรืออุปกรณ์อย่างอื่นซึ่งเป็นพลังงานจากภายนอกให้แก่ น้ำจึงจะขนน้ำขึ้นไปยังอ่างเก็บน้ำบนภูเขาได้ ในทางตรงกันข้ามหากต้องการขนน้ำจากอ่างเก็บน้ำบนภูเขาไปยังบ่อน้ำด้านล่างดังแสดงในรูปที่ 2.8b นั้นไม่จำเป็นต้องให้แรงจากภายนอกมากระทำเลย น้ำสามารถที่จะไหลลงมาเองตามธรรมชาติ และยังถ่ายเทพลังงานที่สะสมเอาไว้ (Gravity : แรงดึงดูดจากศูนย์กลาง) ให้แก่กังหันน้ำทำให้งังหันน้ำหมุน จากหลักการดังกล่าวสามารถนำมาใช้อธิบายโครงสร้างและการทำงานของอุปกรณ์ปล่อยแสงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

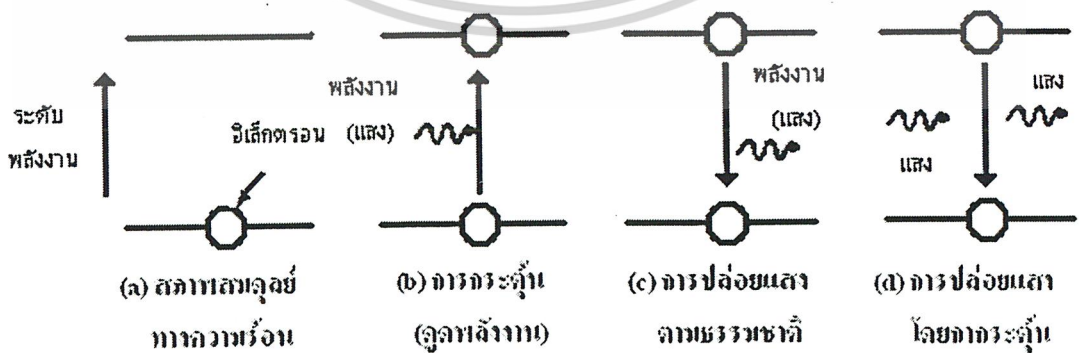
โดยทั่วไปแล้ว อะตอม (Atom) ที่ประกอบอยู่ในสารต่างๆจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.9 นั่นคือมีส่วนที่เรียกว่า Nucleus อยู่ตรงกลางและรอบๆ Nucleus จะมีอิเล็กตรอน (Electron) จำนวนหนึ่งหมุนอยู่รอบ Nucleus โดยมีระยะห่างที่แน่นอน



รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างและระดับพลังงานของอะตอม

อิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีพลังงานที่เป็นสัดส่วนกับระยะห่างจาก Nucleus (พลังงานนี้เรียกว่า ระดับพลังงานหรือ Energy Level) ระดับพลังงานที่ต่ำที่สุดเรียกว่า Ground State Level และระดับพลังงานที่สูงกว่านี้เรียกว่า Stimulated Level จำนวนอิเล็กตรอนที่มีอยู่ในระดับพลังงานนั้นจะมีจำนวนที่แน่นอนขึ้นอยู่กับชนิดของสาร แต่โดยปกติแล้วอิเล็กตรอนจะอยู่ที่ระดับพลังงานต่ำมาก ซึ่งเป็นคุณสมบัติตามธรรมชาติของอิเล็กตรอน

สมมติว่าอิเล็กตรอนอยู่ในระดับพลังงาน 1 (ระดับพลังงานต่ำ) และไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ในระดับพลังงาน 2 (ระดับพลังงานสูง) ดังแสดงในรูปที่ 2.10a ในสภาพนี้ถ้าหากเราให้พลังงานที่มีค่าเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานทั้งสอง (นั่นคือถ้า  $E_1$  เป็นพลังงานของระดับพลังงาน 1 และ  $E_2$  เป็นพลังงานของระดับพลังงาน 2 จะได้ผลต่างเป็น  $E_2 - E_1$ ) แล้วอิเล็กตรอนจะดูดพลังงานนี้และเคลื่อนตัวจากระดับพลังงาน 1 ไปยังระดับพลังงาน 2 ดังแสดงในรูปที่ 2.10b การให้พลังงานจากภายนอกแก่อิเล็กตรอนเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานนั้นเรียกว่า การกระตุ้น (Stimulation) และการที่อิเล็กตรอนเลื่อนไปยังระดับพลังงานอื่นเรียกว่า การถ่ายเท (Transfer)



รูปที่ 2.10 แสดงระดับพลังงานและขั้นตอนของการ Transfer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อปล่อยอิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาพเลื่อนขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานสูงไว้อย่างนั้นอิเล็กตรอนจะถูก NUCLEUS ดึงกลับลงมาอยู่ในระดับพลังงานเดิมซึ่งเรียกว่า Stable State ดังแสดงในรูปที่ 2.10a ซึ่งการที่อิเล็กตรอนกลับลงมาอยู่ในสภาพเดิม นั่นคือการเปลี่ยนจากระดับพลังงานสูงมายังระดับพลังงานต่ำ จะเหมือนกับการที่กระแสน้ำไหลลงจากที่สูงไปยังที่ต่ำตามที่กล่าวข้างต้น เพราะฉะนั้นอิเล็กตรอนจะปลดปล่อยพลังงาน (Emission) เท่ากับ  $E_2 - E_1$  ออกมาดังรูปที่ 2.10c ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การปล่อยพลังงานออกมาตามธรรมชาติ (Natural Emission) กรณีที่ปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงจะเรียกว่า Natural Light Emission เนื่องจากว่าสารต่างๆแบ่งออกเป็นพวกที่เกิดแสงได้ง่าย และพวกที่เกิดแสงได้ยาก ดังนั้น จึงไม่สามารถกำหนดลงไปได้ว่าสารทุกชนิดจะทำให้เกิดแสงขึ้นได้จากทฤษฎีของ Quantum Dynamic ความยาวคลื่นแสงที่ได้จากการปล่อยแสงออกมานี้หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\lambda = \frac{cgh}{(E_2 - E_1)}$$

ในที่นี้

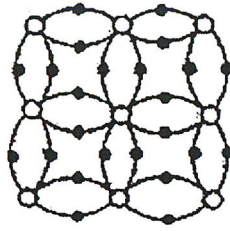
$\lambda$	:	ความยาวคลื่นแสง
$c$	:	ความเร็วของแสงในอากาศ ( $3 \times 10^8$ m/sec)
$h$	:	Plank's Constant (มีค่าเท่ากับ $6.625 \times 10^{-34}$ Joule.sec)

นั่นคือ ความยาวคลื่นแสงจะเป็นสัดส่วนกลับผลต่างของพลังงาน และผลต่างของพลังงานนี้กำหนดจาก ชนิดของอะตอมที่ประกอบเป็นอุปกรณ์กำเนิดแสงด้วย ดังนั้นความยาวคลื่นแสงที่ปล่อยออกมาจึงมีค่าจำเพาะ อุปกรณ์กำเนิดแสงที่ใช้การปล่อยแสงตามธรรมชาติได้แก่ หลอดนีออน และ ไดโอดกำเนิดแสง (Light Emitting Diode : LED)

ต่อมาสมมติว่าเราป้อนแสงที่มีพลังงานเท่ากับ  $E_2 - E_1$  ใช้ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนให้เลื่อนไปอยู่ในระดับพลังงานสูง อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานสูง จะกลับลงมาสู่ระดับพลังงานเดิมในลักษณะบังคับให้ลงมาเร็วกว่าปกติ ดังแสดงในรูปที่ 2.10d ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการกระตุ้นให้ปล่อยแสง (Stimulation Emission) และพลังงานแสงที่เกิดขึ้นในกรณีนี้จะมีค่ามากกว่ากรณี Natural Emission และแสงที่ได้เรียกว่า Stimulated Emission Light ความยาวคลื่นแสงที่ได้จาก Stimulated Emission จะเหมือนกันกับกรณีของการปล่อยแสงตามธรรมชาติ นั่นคือ เป็นสัดส่วนกลับกันกับผลต่างของพลังงาน  $E_2 - E_1$  อุปกรณ์กำเนิดแสงที่ใช้หลักการนี้ได้แก่ Laser

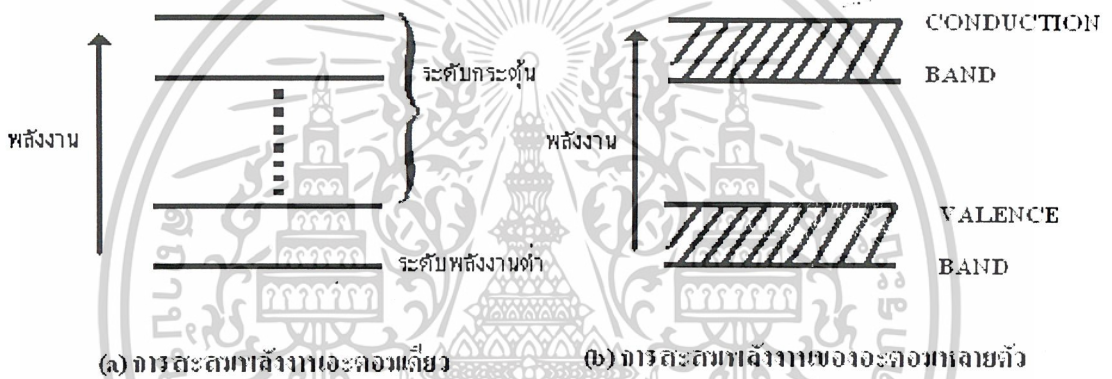
### 2.3.2 โครงสร้างและการทำงานของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)

ที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้นเป็นหลักการพื้นฐานของการปล่อยแสง คราวนี้เรามาพิจารณาโครงสร้างการปล่อยแสงของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor : ซึ่งเป็นสารที่มีคุณสมบัติต่างกับโลหะ กล่าวคือเป็นสารที่ไม่ค่อยยอมให้กระแสไหลผ่านได้มากนัก)



รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างการจัดอิเล็กตรอนและ Nucleus ในสารกึ่งตัวนำ

สำหรับสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีอะตอมจำนวนมากจัดเรียงกันอย่างมีระเบียบดังรูปที่ 2.11 ด้วยเหตุนี้ อิเล็กตรอนของแต่ละอะตอมจะทำหน้าที่เชื่อมโยงกับอะตอมข้างเคียง และมีตำแหน่งอยู่ระหว่างอะตอมทั้งสอง นั่นคือจะรับผลการดึงดูดจากอะตอมข้างเคียงสภาพพลังงานสูงเรียกว่า Valence Band และ Conduction Band สภาพทั้งสองนี้ต่างก็มีความกว้างของพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.12

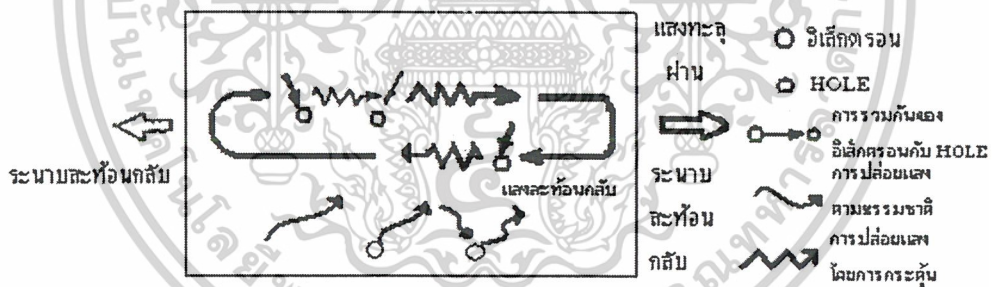


รูปที่ 2.12 แสดงระดับพลังงานในสารกึ่งตัวนำ

โดยปกติแล้วอิเล็กตรอนจำนวนมากจะรวมตัวกันอยู่ที่ Valence Band ซึ่งมีระดับพลังงานต่ำและจะมีอิเล็กตรอนเพียงเล็กน้อยอยู่ใน Conduction Band ซึ่งเป็นระดับพลังงานสูง ในตอนแรกนี้จะกล่าวถึง โครงสร้างและการทำงานของเลเซอร์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Laser Diode : LD) ซึ่งเป็น สารกึ่งตัวนำที่มีระดับพลังงานตามที่กล่าวไว้ข้างต้น และใช้วิธีกระตุ้นให้ปล่อยแสงออกมา (Stimulated Emission) สมมติว่าจำนวนอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำมีค่า  $N$  และในจำนวน  $N$  นี้แบ่งไปอยู่ใน Valence Band เสีย  $n_1$  และอยู่ใน Conduction Band เป็น  $n_2$  ในสภาพปกติ  $n_1$  จะมีค่ามากกว่า  $n_2$  และในสภาพ เช่นนี้หากเราให้แสงจากภายนอก จะทำให้เกิด Stimulated Emission และการดูดพลังงาน(Absorption) ซึ่ง ขนาดของมันจะเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนของ  $n_2$  และ  $n_1$  โดยทั่วไปแล้วการดูดพลังงานจะมีขนาดมากกว่า ทำให้แสงที่เข้ามา มีขนาดเล็กลงไปแต่ถ้าหากมีวิธีอย่างใดอย่างหนึ่งที่ทำให้  $n_2 > n_1$  (เรียกว่าเกิดการ Inversion Distribution) ได้แล้วจะทำให้การกระตุ้นให้ปล่อยแสงออกมามีค่ามากกว่าการดูดพลังงาน ในกรณีนี้จะทำให้ความเข้มของแสงที่ทำการป้อนเข้ามาเพิ่มมากขึ้น และ ทำให้เกิดปฏิกิริยาการขยายแสง (Light Amplification Action)

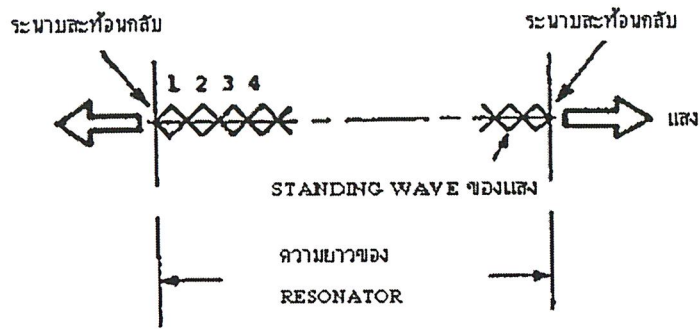
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราอาจจะไม่คุ้นกับคำว่า Inversion Distribution แต่ทว่าสามารถทำให้เกิดขึ้นได้จริงด้วยการให้พลังงานจากภายนอก ดังได้เคยยกตัวอย่างการกระตุ้นอิเล็กตรอนด้วยการดูดพลังงานมาแล้วในรูปที่ 2.12b แต่สำหรับสารกึ่งตัวนำนั้นปกติจะใช้วิธีที่เรียกว่า ฉีด (Injection) อิเล็กตรอนโดยการทำให้กระแสไหล ก็จะเกิดปฏิกิริยาการขยายทางกระแส ดังนั้นในกรณีของสารกึ่งตัวนำพลังงานจากภายนอกจะเป็นตัวแปรที่ทำให้เกิด Stimulated Emission เพื่อปล่อยแสงออกมา นั่นคืออิเล็กตรอนที่ฉีดเข้าไปนั่นเอง เมื่อสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาการขยายได้ดังข้างต้น และเช่นเดียวกับกรณีวงจรไฟฟ้า กล่าวคือโดยการทำให้การขยายกลับไปมาจะทำให้แสงเกิด Oscillation ได้ การขยายกลับไปมานั้นทำให้เกิดคุณสมบัติพิเศษของแสงขึ้น หลักการขยายกลับไปมาทำได้โดยใช้ระนาบสะท้อนกลับ (Reflection Plane) 2 อันวางหันหน้าเข้าหากันดังแสดงในรูปที่ 2.13 นั่นคือแสงที่เกิดจากการกระตุ้นให้ปล่อยแสง Stimulated Emission) นี้จะถูกขยายไปพร้อมกับเคลื่อนที่ไปด้วย และเมื่อไปกระทบกับระนาบสะท้อนกลับแล้ว ส่วนหนึ่งของแสงที่เกิดจะสามารถทะลุผ่านออกไปข้างนอก และส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับไปในทิศทางตรงข้ามกับครั้งแรก และเมื่อแสงที่สะท้อนกลับนี้ไปถึงระนาบสะท้อนกลับอีกด้านหนึ่งก็จะเกิดผลเช่นเดียวกับในตอนแรก นั่นคือมีแสงบางส่วนสามารถผ่านออกไปข้างนอกและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับไปในทางตรงกันข้ามอีก ในระหว่างที่ทำให้เกิดการป้อนกลับ (Feedback ซึ่งเป็นการนำเอาส่วนหนึ่งของ Output ของการขยายกลับไปป้อนเข้าทาง Input อีก) ซ้ำกลับไปมาอย่างนี้ จะถึงจุดหนึ่งที่พลังงานถูกขยายโดยการกระตุ้นให้ปล่อยแสงมีค่ามากกว่าพลังงานที่สูญเสียไป เนื่องจากการดูดพลังงานของอิเล็กตรอนที่อยู่ใน Valence Band และที่ทะลุออกไปจากระนาบสะท้อนกลับ ณ จุดนี้การ Oscillation จะเริ่มขึ้น การทำให้เกิดแสงเช่นนี้เรียกว่า Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of radiation)



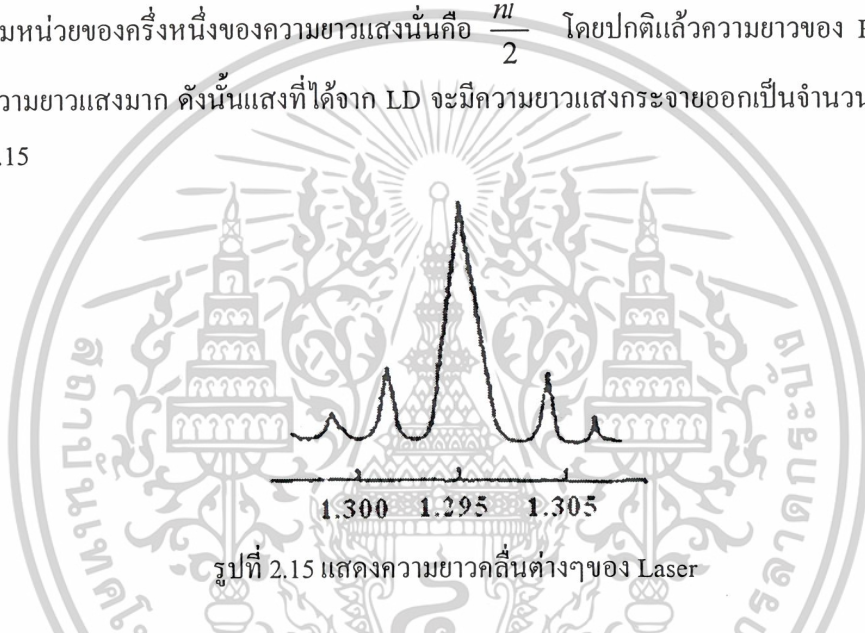
รูปที่ 2.13 แสดงหลักการของ Oscillation ของแสง

ในการทำให้เกิดการ Oscillation เริ่มขึ้นได้นั้นต้องใช้พลังงานจากภายนอกที่มีจำนวนมากกว่าค่าหนึ่งขึ้นไป และจำนวนกระแสที่ฉีดเข้าไปตอนทำให้เกิด Oscillation เริ่มขึ้นนั้นเรียกว่า Threshold Value Current ต่อไปเราจะพิจารณาถึงความยาวคลื่นแสงของ LD จากที่ได้กล่าวมาแล้ว ความยาวคลื่นนั้นกำหนดจากผลต่างของพลังงานใน Conduction Band และใน Valence Band แต่เนื่องจากว่าในระดับพลังงานทั้งสองนั้นต่างก็มีความกว้างของพลังงานอยู่ทำให้ความยาวคลื่นแสงก็มีค่าอยู่ช่วงหนึ่งด้วยเช่นกัน แต่เนื่องจากในขั้นตอนการปล่อยแสงตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นทำให้เกิด Resonance ระหว่างระนาบสะท้อนกลับสามารถทำให้เกิดความยาวคลื่นแสงของ Standing Wave เท่านั้นภายใน Resonator เท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงการเกิด Standing wave ของแสง

และเงื่อนไขที่ทำให้เกิด Resonance นี้ก็คือความยาวของ Resonator จะต้องมีค่าเป็นจำนวนเท่าที่เป็นเลขเต็มหน่วยของครึ่งหนึ่งของความยาวแสงนั่นคือ  $\frac{m\lambda}{2}$  โดยปกติแล้วความยาวของ Resonator จะมากกว่าความยาวแสงมาก ดังนั้นแสงที่ได้จาก LD จะมีความยาวแสงกระจายออกเป็นจำนวนมากดังแสดงในรูปที่ 2.15

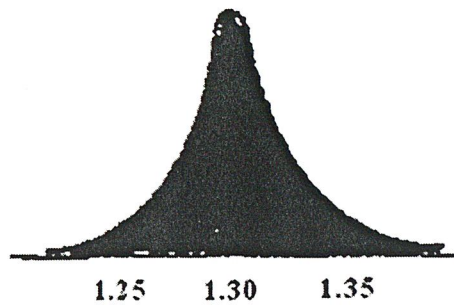


รูปที่ 2.15 แสดงความยาวคลื่นต่างๆของ Laser

อันนี้เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของ LD นั้นต้องการให้มีการขยายกว้างออกของความยาวคลื่น (Wave Length Dispersion) น้อย จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่า Laser Oscillation นั้นจะเกิดได้ต้องมีครบ 3 อย่างคือ Inversion Distribution, Stimulated Emission และ Resonance

ส่วนทางด้านไดโอดเปล่งแสง (LED : Light Emitting Diode) นั้นต่างกับ LD คือแทนที่จะใช้ปรากฏการณ์ Stimulated Emission แต่จะปรากฏการณ์ Natural Emission แทนดังนั้นแสงที่ได้ออกมาจะมีช่วงความยาวคลื่นแสงกว้างมากทั้งนี้เพราะกำหนดจากความสัมพันธ์ของพลังงานของ Conduction Band และ Valence Band ที่มีความกว้างของพลังงาน และช่วงความยาวคลื่นแสงนี้เรียกว่า Spectrum Width กับ Output Power ของ LED เมื่อเทียบกับ LD แล้วมีค่าน้อยกว่า แต่มีข้อดีคือ โครงสร้างของ LED ไม่ยุ่งยากทำให้สร้างง่าย และมีราคาถูกกว่ามาก ช่วงความยาวคลื่นแสงของ LED แสดงดังรูปที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

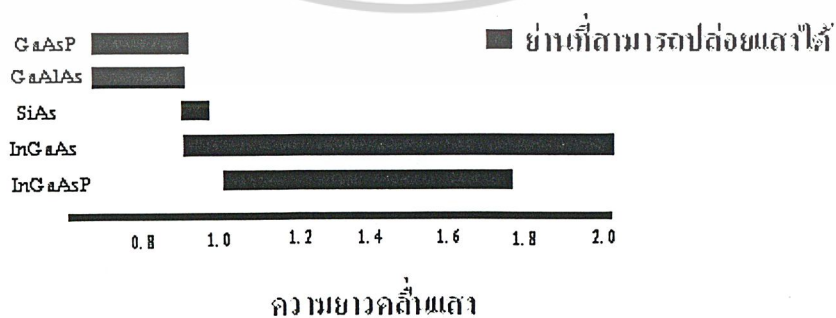


รูปที่ 2.16 แสดงช่วงความยาวคลื่นแสงของ LED

### 2.3.3 สารที่ใช้ในการสร้างและโครงสร้างของอุปกรณ์เปล่งแสง

#### 2.3.3.1 สารที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์เปล่งแสง

ตามที่กล่าวแล้วข้างต้นว่าปรากฏการณ์เปล่งแสงนั้นไม่ได้เกิดขึ้นกับสารกึ่งตัวนำทุกชนิด ทั้งนี้ก็เพราะว่ามีสารพวกที่เกิดปรากฏการณ์เปล่งแสงง่ายกับพวกที่เกิดปรากฏการณ์เปล่งแสงยาก เนื่องจาก การเปล่งแสงนั้นเกิดจากการที่อิเล็กตรอนถ่ายเทจาก Conduction Band ไปยัง Valence Band จึงแบ่งสาร ออกเป็นพวกที่อิเล็กตรอนถ่ายเทได้ง่ายกับพวกที่อิเล็กตรอนถ่ายเทได้ยาก พวกที่ถ่ายเทอิเล็กตรอนได้ง่าย เรียกว่า Direct Transfer Semiconductor พวกที่อิเล็กตรอนได้ยากเรียกว่า Indirect Transfer Semiconductor ตัวอย่างของสารพวก Direct Transfer Semiconductor ได้แก่สารประกอบของ Indium (In) , Gallium (Ga) , Arsenide (As) และ Phosphorus (P) คือ InGaAsP , สารประกอบของ Gallium (Ga) , Aluminum (Al) , Arsenide (As) คือ GaAlAs เป็นต้น อนึ่งสารพวก Silicon (Si) , Germanium (Ge) ที่ใช้ทำ Transistor , IC นั้นส่วนใหญ่เป็น Indirect Transfer Semiconductor เปล่งแสงออกมาได้ยาก เนื่องจากความยาวคลื่นแสง ที่เปล่งออกมานั้นเป็นสัดส่วนกับผลต่างของพลังงาน ซึ่งค่าความแตกต่างของพลังงานนี้จะแตกต่างกันไป ตามส่วนประกอบของสารกึ่งตัวนำ จึงทำให้มีความยาวคลื่นแสงต่างๆ ความสัมพันธ์ระหว่างความยาว คลื่นแสงกับสารประกอบของสารกึ่งตัวนำดังแสดงในรูปที่ 2.17 และจากการพิจารณาถึงคุณสมบัติต่างๆ ของสารในทางปฏิบัตินั้นสำหรับย่านความถี่คลื่นสั้น 0.85  $\mu\text{m}$  นิยมใช้ GaAlAs และความยาวคลื่น 1.3  $\mu\text{m}$  นิยมใช้ InGaAsP ในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสง การเลือกใช้ความยาวคลื่นแสงถือเป็นองค์ประกอบ ที่สำคัญมาก จึงมีผลจำกัดต่อการเลือกใช้สารประกอบ



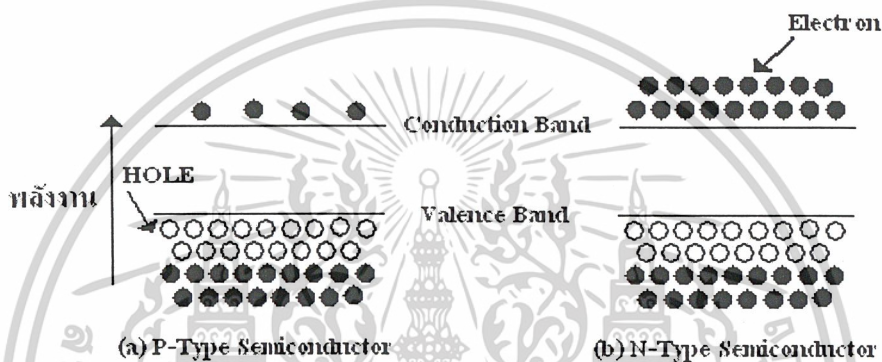
รูปที่ 2.17 แสดงความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมาของสารประกอบกึ่งตัวนำแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3.2 โครงสร้างของอุปกรณ์เปลวแสง

#### 2.3.3.2.1 P-N Junction

เกี่ยวกับโครงสร้างของอุปกรณ์เปลวแสง จากทางด้านการใช้งานเพื่อให้ได้กำลังการเปลวแสงที่มีประสิทธิภาพสูง การนำสารกึ่งตัวนำ P และ N มาเชื่อมต่อกัน นั้นเป็นสิ่งสำคัญยิ่ง ดังนั้นเพื่อเป็นการทำความเข้าใจนั้นขั้นตอนการเปลวแสงอันเนื่องมาจากโครงสร้างของอุปกรณ์เปลวแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำนั้น ในที่นี้จะอธิบายถึงคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำแบบ P-Type Semiconductor นั้นมีสภาพที่มีจำนวน Hole (อนุภาคที่มีประจุ +) มาก และมีจำนวนอิเล็กตรอน (อนุภาคที่มีประจุ -) น้อยดังแสดงในรูปที่ 2.18a ส่วนสารที่เรียกว่า N-Type Semiconductor นั้นจะมีสภาพตรงกันข้ามกับ P-Type Semiconductor กล่าวคือมีอิเล็กตรอนมากกว่า Hole และจำนวนอิเล็กตรอนที่มากเกินไปจะรวมตัวกันอยู่ใน Conduction Band ดังแสดงในรูปที่ 2.18b

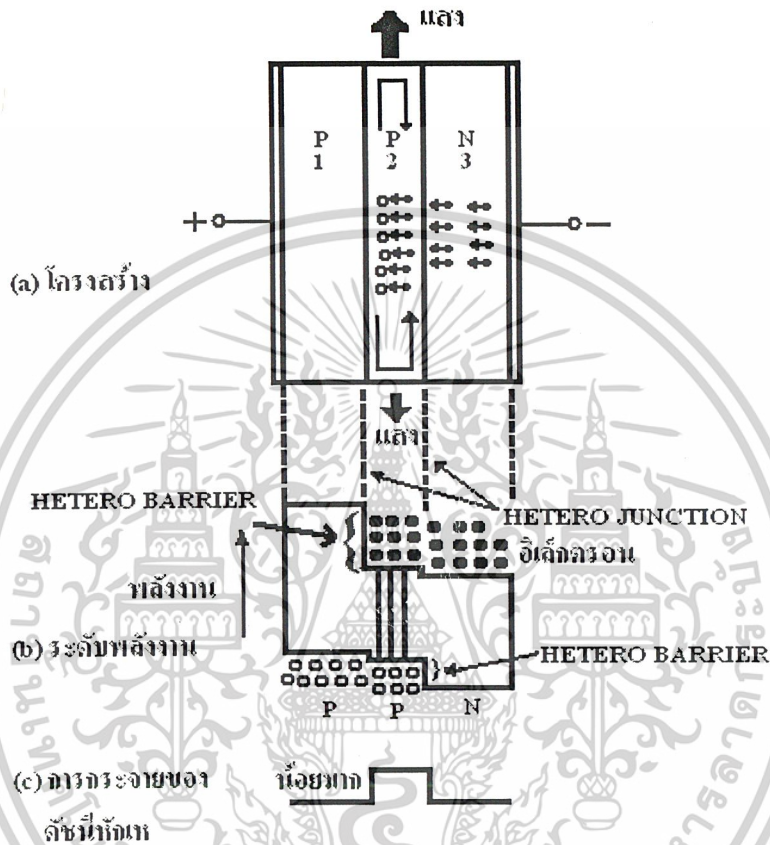


รูปที่ 2.18 แสดงระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำแบบ P-Type และ N-Type

สมมติว่าเรานำสารกึ่งตัวนำทั้งสองแบบมาเชื่อมต่อกัน และบริเวณที่เชื่อมต่อกันนั้นอิเล็กตรอนที่มีจำนวนมากใน N-Type จะรวมตัวกับ Hole ที่มีจำนวนมากใน P-Type ดังแสดงในรูปที่ 2.19a และจากปริมาณการรวมตัวที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆนั้น ทำให้เกิดประจุไฟฟ้าลบใน P-Type (เพราะ Hole ลดลงเหลือแต่อิเล็กตรอน) และเกิดประจุไฟฟ้าบวกใน N-Type (เพราะอิเล็กตรอนลดลงเหลือแต่ Hole) ดังแสดงในรูปที่ 2.19b จากผลที่ได้นี้ทำให้เกิดสภาพ Depletion Zone ขึ้นตรงบริเวณใกล้ๆรอยเชื่อมต่อและได้โครงสร้างของระดับพลังงานดังรูปที่ 2.19c เกี่ยวกับโครงสร้างของระดับพลังงานนี้มีความหมายสำคัญอย่างยิ่งขอในการนำไปใช้พิจารณาโครงสร้างอุปกรณ์เปลวแสง



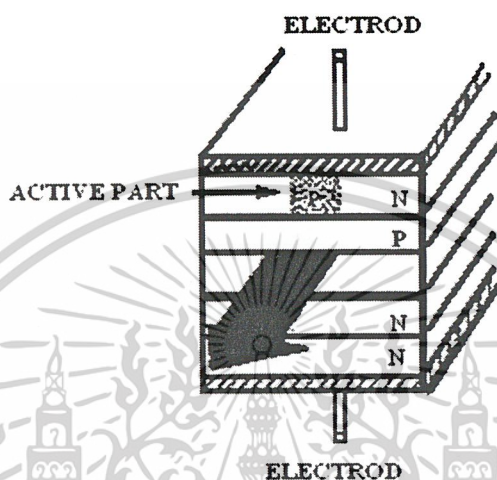
จากรูปที่ 2.20 ถ้าหากทำให้กระแสไหลจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ จะเกิดแสงเลเซอร์ออกมาในทิศทางที่แสดงด้วยลูกศร เกี่ยวกับวิธีการเกิด Oscillation ของ LD นั้นอธิบายโดยเน้นตรงบริเวณชั้นทั้งสามของ P-Type Semiconductor ,N-Type Semiconductor และ Active Layer สำหรับโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำอย่างนี้เรียกว่า Double Hetero Junction ซึ่งหมายถึง Junction ของ Layer ของสารที่มีส่วนประกอบต่างกัันนั้นมี 2 ด้าน โครงสร้าง ,ระดับพลังงาน และลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีการหักเหของ LD แสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แสดง โครงสร้าง, ระดับพลังงานและลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีการหักเหของ LD

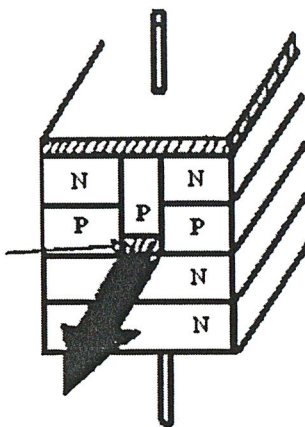
ในการทำให้เกิด Laser Oscillation นั้นจะต้องทำให้ผลต่างระหว่างระดับพลังงานของ Conduction Band ของ P-Type Semiconductor มีค่ามากกว่า Conduction Band ของ Active Layer พร้อมทั้งทำให้ผลต่างของระดับพลังงานของ Valence Band ของ N-Type Semiconductor มีค่าต่ำกว่า Valence Band ของ Active Layer จากนั้นจึงนำมาเชื่อมต่อกันจะได้รับระดับพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.21b เมื่อทำให้กระแสไหลใน Semiconductor ที่มีการเชื่อมต่อกันในลักษณะข้างต้นแล้ว โดยมีทิศทางไหลจาก P-Type Semiconductor ไปหา N-Type Semiconductor ผลของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและ Hole เหล่านี้ทำให้เกิดมีอิเล็กตรอนและ Hole ภายใน Active Layer ดังแสดงในรูปที่ 2.21b และโดยทั่วไป Active Layer นี้จะใช้สารชนิด P-Type Semiconductor เมื่อมาถึงจุดสังเกตระดับพลังงานของ Layer ทั้งสามที่แสดงในรูปที่ 2.21b จะเห็นว่าเกิดมีกำแพงของพลังงาน (Hetero Barrier) ขึ้นทำให้อิเล็กตรอนและ Hole ที่เคลื่อนที่ไปนั้นถูกขังอยู่ใน Active Layer และผลจากการกักแสงเอาไว้ใน Active Layer ทำให้ได้การปล่อยแสงที่มีประสิทธิภาพดี

ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าแสงจะออกมาจากระนาบสะท้อนกลับ โดยที่ระนาบสะท้อนกลับนี้ทำจากการที่ใช้สิ่งที่มีคมมาก ๆ คล้ายใบมีดโกนไปตัดสารกึ่งตัวนำที่ประกอบเป็น LD ให้มีช่องเปิดเรียกว่า Open Wall โดยการทำให้เช่นนี้แสงเลเซอร์จะถูกกักไว้ภายใน Active Layer ได้ดี แต่ทว่าเมื่อแสงเดินทางมาถึง Open Wall แสงจะหลุดออกมาข้างนอกตลอดแนว Open Wall นี้ทำให้ประสิทธิภาพของการเชื่อมแสงเข้ากับเส้นใยแสงไม่ดีด้วยเหตุนี้ เพื่อเป็นการทำให้ประสิทธิภาพดี จำเป็นต้องมีการปรับปรุงต่างๆ เพื่อให้มีปฏิกิริยาการนำคลื่นแสงในทิศทางแนวนอน (Horizontal) ด้วยตัวอย่างอันหนึ่งของวิธีการปรับปรุงคือ สิ่งๆ ที่เรียกว่า Planar Stripe Structure ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดง โครงสร้างแบบ Planar Stripe

เพื่อให้การผลิต LD ทำได้ง่าย (การสร้างผลึกและการสร้างขั้วไฟฟ้า) จะทำให้มีโครงสร้างเป็น 5 ชั้นและทำให้บริเวณที่กระแสไหลมีขนาดแคบ ส่วน Laser Oscillation เป็นการให้หลักการที่ทำให้ Oscillation เกิดขึ้นเฉพาะตรงส่วนที่กระแสไหลนั้นคือตรงส่วนที่มีการกระตุ้น (Stimulation) เท่านั้น จากรูปที่ 2.22 จะเห็นได้ว่าชั้นบนสุดที่มีขั้วไฟฟ้าบวกติดอยู่เป็น N-Type Semiconductor เกือบทั้งหมดแต่จะมีเฉพาะส่วนหนึ่งเท่านั้นซึ่งแคบมากเป็น P-Type Semiconductor เมื่อทำดังนี้จะไม่มีการไหลตรงส่วนเชื่อมต่อของ N-Type Semiconductor , P-Type Semiconductor และ Active Layer (ทั้งนี้เพราะว่าจากคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ กระแสจะไม่ไหลจาก N-Type Semiconductor ไปยัง P-Type Semiconductor) ในทางกลับกันกระแสจะไหลเฉพาะตรงส่วนเชื่อมต่อของ P-Type Semiconductor และ Active Layer นั่นคือส่วน P-Type Semiconductor ของชั้นที่ 1 ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นทางไหลเข้าของกระแสกลายเป็นแถบ (Stripe) ส่วนหนึ่งของ Active Layer จึงเรียกว่า Planar Stripe Type โครงสร้างแบบอื่นที่มีคุณสมบัติดีกว่าแบบ Planar Stripe Type และนิยมใช้กันมากคือแบบ Emebedding Stripe Type ดังแสดงในรูปที่ 2.23

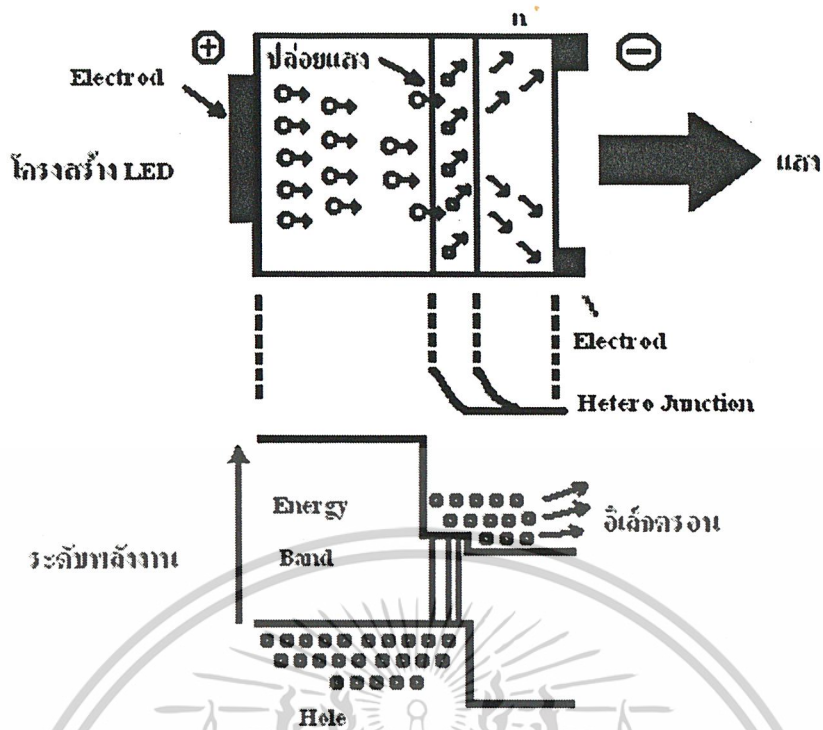


รูปที่ 2.23 แสดงโครงสร้างของ Emebedding Stripe Type

โครงสร้างนี้มีลักษณะพิเศษตรงที่ค่าดัชนีการหักเหของ Active Layer มีค่าสูงรอบด้าน นั่นคือ ส่วนบนของ Active Layer มี Layer ของ P-Type Semiconductor อยู่ซึ่งจะเหมือนกับ Planar Stripe Type และกระแจะไหลเฉพาะในส่วนนี้เท่านั้นจากข้างบนไปข้างล่าง นอกจากนี้จะสามารถทำให้เกิด Laser Oscillation ด้วยกระแสที่มีค่าน้อยแล้ว ยังทำให้ดัชนีการหักเหของ Active Layer มีค่าสูงมากขึ้นอีก จึงเป็นผลให้ประสิทธิภาพของการกักแสงเพิ่มขึ้น ทำให้ได้แสงที่ปล่อยออกมาเป็นลำแสงที่คมมาก

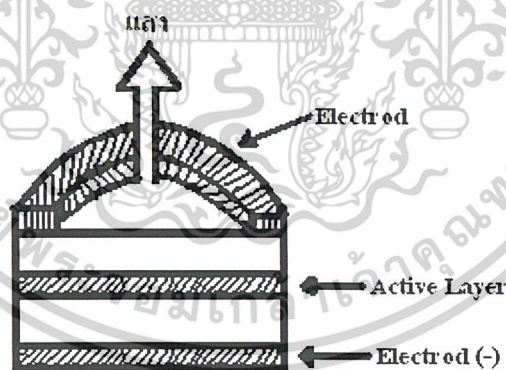
### 2.3.3.2.3 โครงสร้างของ LED (Light Emitting Diode)

โครงสร้างพื้นฐานของ LED เหมือนกับ LD กล่าวคือเป็น Double Hetero Junction อิเล็กตรอนที่ไหลผ่าน P-N Junction จะไปรวมกับ Hole ภายใน Active Layer เช่นเดียวกับ LD ดังแสดงในรูปที่ 2.51a และจะเกิดการปล่อยแสงขึ้นภายใน Active Layer เนื่องจากถูกกักด้วยกำแพงของ Hetero Junction แต่สำหรับกรณีของ LED นั้นโครงสร้างของมันจะไม่มีการขยาย Oscillation ของแสงเหมือนอย่าง LD (ไม่มีระนาบสะท้อนกลับ) แสงที่ปล่อยออกมาตรงส่วนที่อยู่ห่างจากด้านข้างนั้นจึงออกมาข้างนอกได้ยาก ด้วยเหตุนี้ LED ทั่วไปจึงให้แสงปล่อยออกมาข้างนอกจากด้านหน้าที่อยู่ต่อกับขั้วไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 แสดง โครงสร้างและระดับพลังงานของ LED

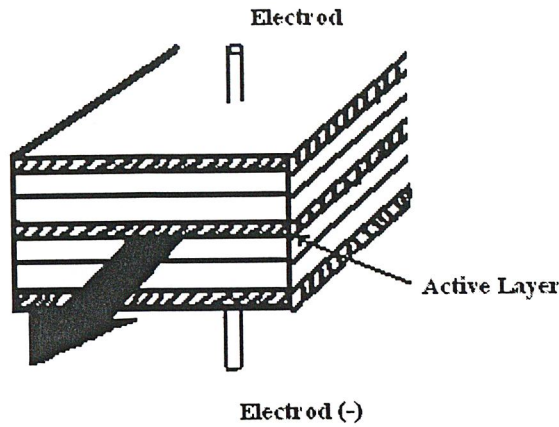
ตัวอย่างโครงสร้างของ LED แบบที่แสงปล่อยออกมาทางด้านหน้า Face Emission Type LED แสดงดังในรูปที่ 2.25 จากรูปจะให้เห็นได้ว่าเพื่อเป็นการทำให้แสงปล่อยออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้นขั้วไฟฟ้าทางด้านที่ปล่อยแสงออกมาจะต้องมีรูปร่างเป็นวงแหวน



รูปที่ 2.25 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของ LED แบบปล่อยแสงด้านหน้า

นอกจากนี้ในปัจจุบันได้มีการผลิต LED อีกแบบหนึ่งขึ้นมา โดยการทำให้ดัชนีการหักเหของ Active Layer มีค่าสูง และทำให้เกิดปฏิกิริยาคาร์รียาแสงขึ้นใน Active Layer และให้แสงปล่อยออกมาทางด้านข้างของ Active Layer เหมือนกับ LD ดังแสดงในรูปที่ 2.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

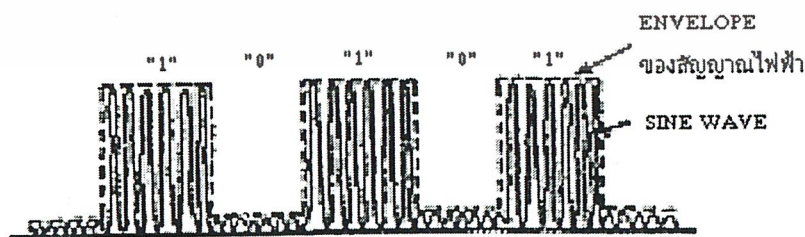


รูปที่ 2.26 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของ LED แบบปล่อยแสงทางด้านข้าง

LED แบบนี้เรียกว่า LED แบบปล่อยแสงออกทางด้านข้าง (Side Emission Type LED) และเมื่อเปรียบเทียบกับแบบปล่อยแสงออกทางด้านหน้า โดยให้กระแสไหลผ่านเท่ากันปรากฏว่าได้แสงออกมามีกำลังน้อยกว่าแบบปล่อยแสงออกมาทางด้านหน้า แต่เนื่องจากบริเวณการปล่อยแสงมีขนาดแคบมากจึงมีข้อดีที่ว่าประสิทธิภาพการเชื่อมแสงกับเส้นใยแสงสูงกว่า

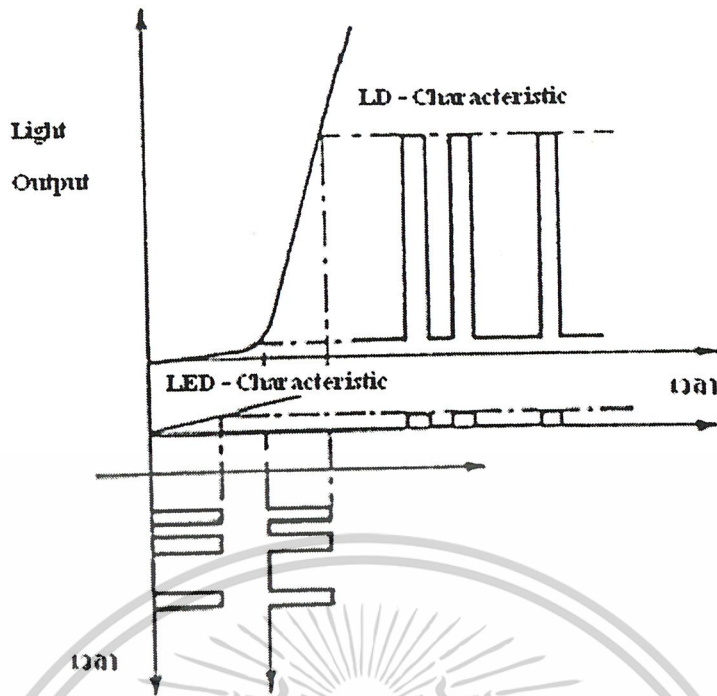
#### 2.3.4 คุณสมบัติต่างๆของอุปกรณ์ปล่อยแสง

คุณสมบัติต่างๆที่ต้องการจากอุปกรณ์ปล่อยแสงได้แก่ คุณสมบัติการผสมแสงกับไฟฟ้า (นั่นคือ Output Power ของแสง, ความเป็นเส้นตรงหรือ Linearity), ความกว้างของ Spectrum ของแสง, ความเร็วในการตอบสนองต่อความถี่ (Frequency Response Speed) เป็นต้น จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นว่าในปัจจุบันแสงที่ได้จากอุปกรณ์ปล่อยแสงจะมีความยาวคลื่นแสงจำนวนหนึ่งป็นอยู่ ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้แสงเป็นคลื่นพาห์สำหรับ Frequency Modulation, Phase Modulation ของสัญญาณไฟฟ้าได้เหมือนอย่างที่ใช้ในการส่ง Multiplex ในระบบการส่งสัญญาณ Analog ของ Carrier Transmission, Microwave Transmission ที่ใช้อยู่ทั่วไปแต่จะใช้การผสมที่เรียกว่า Intensity Modulation ซึ่งทำการผสมโดยตรงกับความเข้มของแสงยกตัวอย่างเช่น ในการส่งสัญญาณ Digital, Output waveform ที่ได้จะเป็นดังแสดงในรูปที่ 2.27 กล่าวคือแสงจะเกิดการกระพริบสว่าง, ดับตามสัญญาณไฟฟ้าที่เป็น "1", "0" ตามความเป็นจริงแล้วความยาวคลื่นของสัญญาณแสงจะมีค่าสั้นกว่าความยาวคลื่นของสัญญาณไฟฟ้ามาก ดังนั้นใน Envelope "1" ของสัญญาณไฟฟ้าจะมีแสงที่มีความยาวคลื่นหลายค่าอยู่ภายในดังแสดงในรูปที่ 2.27 และคุณสมบัติการผสมของอุปกรณ์ปล่อยแสงแสดงดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.27 แสดง Output Waveform ของแสงและการผสมในการส่งสัญญาณดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 แสดงการผสมแบบ Light Intensity Modulation

จากรูปที่ 2.28 จะเห็นได้ว่า LED ใช้ปรากฏการณ์การปล่อยแสงตามธรรมชาติ ดังนั้นปริมาณของแสงที่ปล่อยออกมาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่ป้อนเข้าไป แต่สำหรับ LD นั้นใช้ปฏิบัติการ Oscillation โดยการกระตุ้นให้ปล่อยแสง Stimulated Emission) ดังนั้นปริมาณของแสงที่ปล่อยออกมานั้นมีลักษณะที่มีการเพิ่มปริมาณขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเลยค่าของกระแสค่าหนึ่ง (Threshold Value Current) ไปแล้ว ตัวอย่างคุณสมบัติต่างๆของ LED และ LD ที่กล่าวมาแล้วแสดงในตาราง 2.1 จากการพิจารณาคุณสมบัติต่างๆในตารางนี้จะเห็นว่าเกี่ยวกับ Output Power ของแสงนั้น LD จะมีความมากกว่าเพราะมีการ Oscillation และการขยายของแสงและเกี่ยวกับ Input Power ที่ป้อนเข้าไปในเส้นใยแสงก็เช่นกัน เนื่องจาก LD มีคุณสมบัติของทิศทางของแสง (Directivity) ดีกว่า เป็นผลให้มีการสูญเสียการเชื่อมแสงกับเส้นใยแสงต่ำทำให้ Power ของแสงป้อนเข้าไปในเส้นใยแสงได้มาก

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆของอุปกรณ์ปล่อยแสง

หัวข้อ	LED	LD
Output Power ของแสง	2.5 mW	10 mW
Input Power ของแสงในเส้นใยแสง	$\leq 0.05$ mW	$\leq 3$ mW
ความกว้างของ Spectrum ที่จุด Power ตกลงครึ่งหนึ่ง (ตอน Modulation)	100 nm	3 nm
Frequency Respons Speed	$\leq$ หลายร้อย MHz	$\leq$ หลาย GHz
อายุการใช้งาน	$\leq 10^6$ ชม.	$\leq 10^6$ ชม.

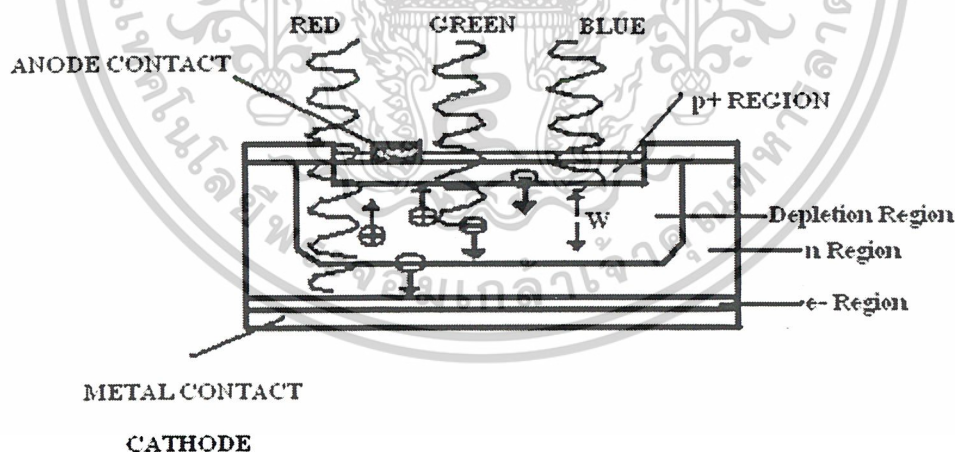
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกี่ยวกับ Spectrum ของแสงนั้น จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าใน LED มีผลมาจากสาเหตุที่ Conduction Band และ Valence Band มีพลังงานเป็นช่วงกว้างทำให้มี Spectrum ของแสงกว้างแต่ LD นั้นมีพลังงานเป็นช่วงแคบอันเนื่องมาจากขบวนการ Oscillation ซึ่งทำให้ LD มี Spectrum ของแสงแคบ นอกจากนั้นการทำงานสว่างดับ (กระพริบ) ของแสงนั้น ถ้าหากเวลาการรวมกันของอิเล็กตรอนกับ Hole ยิ่งสั้นจะยิ่งมี Speed เร็วมาก กล่าวคือถ้าหากอิเล็กตรอนและ Hole มีจำนวนมากนั้นคือความหนาแน่นของ กระแสมีมากเท่าไร จะทำให้ค่าเฉลี่ยของเวลาการรวมกันของอิเล็กตรอนและ Hole มีค่าน้อยลงเท่านั้น สำหรับ LED นั้นค่าเวลานี้มีค่าประมาณหลาย nanosecond (1 nsec หรือ 1 nanosecond =  $10^{-9}$  second) ดังนั้นหากเป็นความถี่จะได้หลายร้อย MHz ส่วนกรณีของ LD เนื่องจากความหนาแน่นของกระแสที่ กระตุ้นมีค่ามากทำให้เวลาการรวมกันของอิเล็กตรอนและ Hole มีค่าน้อย ถ้าเป็นความถี่จะทำให้ได้หลาย GHz ซึ่งความถี่เหล่านี้แสดง Frequency Response Speed ของ LED และ LD ยิ่งกว่านั้นในกรณีของ LD ถ้าหาก Bias Current มีค่าเข้าใกล้ Threshold Value Current มากเท่าใดความเร็วของ Frequency Response Speed จะสูงขึ้นเท่านั้น ส่วนอายุการใช้งานของอุปกรณ์ปล่อยแสงทั้งสองไม่มีปัญหาอะไรเลยในการใช้งานและในอนาคตคงจะมีเทคโนโลยีการผลิตที่ทำให้ LD มีอายุการใช้งานเท่ากับ LED

## 2.4 โฟโตไดโอด (Photodiode)

### 2.4.1 หลักการเบื้องต้นของโฟโตไดโอด

โฟโตไดโอดถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในงานทางด้านรับแสง เนื่องจากมีผลตอบสนองรวดเร็ว ราคาถูกและสัญญาณรบกวนต่ำ โฟโตไดโอดมีหลายชนิดแล้วแต่จะแบ่งตามคุณลักษณะใดเช่น แบ่งตาม โครงสร้าง หรือหน้าที่



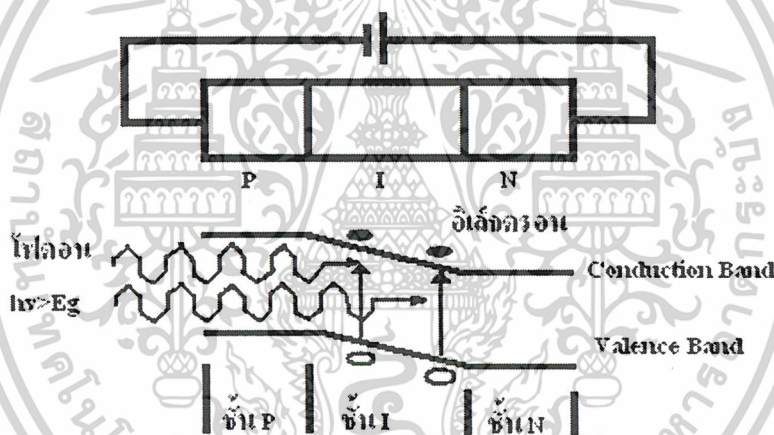
รูปที่ 2.29 แสดงภาพหน้าตัดของโฟโตไดโอด

โฟโตไดโอดชนิดแรกที่จะกล่าวถึงประกอบด้วยสาร P และ N ที่รอยต่อของสารทั้งสองจะเกิด Depletion หรือ Space Region หรือ Region ที่ได้กล่าวถึงนี้เกิดจากสนามที่รอยต่อของสารทั้งสองชนิด นั้นเอง ใน Depletion Region จะเป็นพื้นที่ที่คู่อิเล็กตรอนและ Hole เกิดขึ้น (ต่อไปจะเรียกว่าคู่อิเล็กตรอน e-h) เนื่องจาก โฟตอนตกกระทบตัวมัน หลังจากนั้นคู่อิเล็กตรอน e-h จะแยกออกมาจากโดย e จะเคลื่อนที่ไปทางสาร N และ h เคลื่อนไปทางสาร P จากการเคลื่อนที่ของคู่อิเล็กตรอน e-h จะทำให้เกิดกระแสไหลเราเรียกกระแสนี้ว่า Drift Current

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่คู่ e-h สามารถเคลื่อนที่ได้เกิดจากแรงดันที่ขั้วสอง ดังนั้นถ้าเราป้อนไบอัสย้อนกลับ โฟโตไดโอดก็จะยังช่วยให้เกิดกระแสไหลมากขึ้นดังรูปที่ 2.29 แสดงรูปหน้าตัดของโฟโตไดโอดการแปลงโฟตอนเป็นคู่ e-h ยังสัมพันธ์กับความลึกความตื้นของ Depletion Region อีกด้วยจากรูปจะเห็นว่าคลื่นที่ตกกระทบ โดยถ้าคลื่นมีความยาวคลื่นสั้นทำให้เกิดการดูดกลืนใกล้ผิวของโฟโตไดโอด แต่ถ้าคลื่นมีความยาวคลื่นยาวมากมันก็จะทะลุผ่านก่อนที่จะกลายเป็น e-h

เพื่อที่จะปรับปรุงปัญหาที่กล่าวมาแล้วนี้จึงได้มีการเพิ่มสารเข้าไปอีกชั้นหนึ่ง ชั้นที่เพิ่มเข้าไปนี้เรียกว่า Intrinsic Layer (เรียกสั้น ๆ ว่าชั้น I ) แล้วเรียกโฟโตไดโอดชนิดใหม่นี้ว่า PIN Photodiode มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.29 ชั้น I ที่เพิ่มเข้าไปมีความต้านทานสูงมาก ช่วยให้เกิดกระแสไหลมากขึ้นเมื่อเทียบกับปกติที่โฟตอนตกกระทบในจำนวนที่เท่ากัน PIN Photodiode จึงมีค่า Sensitivity สูง, มีเสถียรภาพสูง และมีการตอบสนองที่รวดเร็วกว่า และยิ่งจะมีกระแสไหลมากขึ้นไปอีก ถ้าชั้น I ยิ่งกว้างแต่อย่างไรก็ตาม ถ้าชั้น I มีขนาดกว้างเกินไปจะทำให้การตอบสนองต่อเวลา หรือ Response Time มากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องควรระมัดระวัง เมื่อโฟตอนตกกระทบ PIN Photodiode และมีพลังงานมากกว่า Bandgap Energy (ผลต่างของค่าระดับพลังงานระหว่าง Conduction Band และ Valence Band ) จะเกิดคู่ e-h ในชั้น I อธิบายได้ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.30 แสดงโครงสร้างของ PIN Photodiode และ Energy Bandgap

ประสิทธิภาพของโฟโตไดโอด ( $\eta$ ) จะเพิ่มตามไปด้วยถ้าเราเพิ่มกว้างของชั้น I ตามย่อหน้าด้านบนเราสามารถเขียนสมการประสิทธิภาพ (Quantum Efficiency ; Conversion Factor) ได้ดังนี้

$$\eta = [I_p/e]/[P_0/hv] = \text{จำนวนของโฟตอนที่ตกกระทบ}$$

$I_p$  เป็นกระแสที่เกิดจากคู่ e-h , e เป็นค่าประจุของอิเล็กตรอน ( $1.6 \times 10^{-19}$  C) ,  $P_0$  เป็นกำลังงานของโฟตอนที่กระทบ  $hv$  เป็นพลังงานของโฟตอน  $h\nu$  เป็นพลังงานของโฟตอน

#### 2.4.2 เวลาในการตอบสนอง (Response Time)

เมื่อเรานำโฟโตไดโอดไปใช้งานจะมี Response Time อย่างน้อย 3 ปัจจัยที่ผลต่อ Response Time ของเอาต์พุต สามารถกล่าวได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Transit Time หรือ Charge Collection Time (เวลาที่คู่ e-h ใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านชั้น I)
2. Diffusion Time
3. RC Time Constant ของโฟโตไดโอดและของวงจรที่นำมาต่อพ่วง

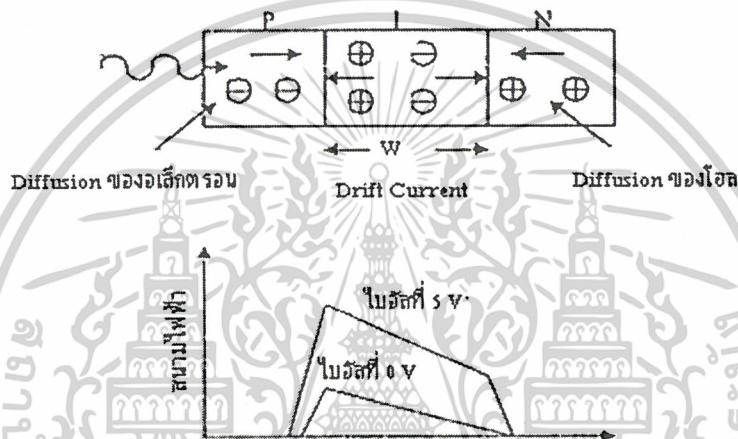
#### 2.4.2.1 Transit Time ( $t_{tc}$ )

เป็นเวลาที่คู่ e-h ใช้ในการเคลื่อนที่ผ่าน Intrinsic Layer เราสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$t = w/v$$

โดย  $w$  คือ ความกว้างของ Depletion Layer

$v$  คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน หรือ Hole



รูปที่ 2.31 แสดง PIN Photodiode ขณะได้รับไป้อสย้อนกลับและ Profile ของสนามไฟฟ้า

เมื่อเราไบอัสย้อนกลับค่าสนามไฟฟ้าคร่อม Intrinsic Region จะมีค่ามากทำให้เกิดความต้านสูงในชั้นนี้ด้วย สนามนี้ช่วยให้คู่ e-h เคลื่อนที่ในชั้น I ได้เร็วขึ้น สมมติว่ามีโฟตอนเคลื่อนที่เข้าไปในโฟโตไดโอดทะลุผ่านเข้าสู่ชั้น P เมื่อมันมาถึงชั้น I คู่ e-h เกิดขึ้น ต่อมาคู่ e-h จะถูกแยกด้วยสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมชั้น I จากนั้นจะเกิดกระแสไหลขึ้น (Drift Current) ด้วยเหตุนี้ความเร็วของ e ของ h จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ ส่วนความเร็วสูงสุด (Maximum Velocity) หรือความเร็วอิ่มตัว (Saturated Velocity) เกิดขึ้นได้ด้วยแรงดันเพียงไม่กี่โวลต์ แต่ถึงกระนั้นค่าแรงดันก็ยังขึ้นกับโครงสร้างของโฟโตไดโอดด้วย ดังนั้นค่าแรงดันที่ไบอัสให้กับโฟโตไดโอดควรมีค่าเพียงพอทำให้เกิด Saturated Velocity สำหรับวงจรที่มี Frequency Response ต่ำกว่า 100 kHz ก็สามารถใช้ขณะไบอัส 0 V ไบอัสที่ 0V แม้จะมี Frequency Response ต่ำแต่ก็มีข้อดีคือ สัญญาณรบกวนที่เกิดจาก Dark Current (กล่าวถึงภายหลัง) จะไม่มี จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จะเห็นว่า  $w$  ลดลงทำให้ Transit Time ลดลงและยังทำให้ค่า Capacitance เพิ่มขึ้นอีกด้วย การเพิ่มขึ้นของค่า Capacitance ทำให้ Response Time เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.2.2 Diffusion Time ( $t_{diff}$ )

เป็นเวลาที่อิเล็กตรอนและ Hole เคลื่อนตัวออกจากสาร P และ N กระบวนการนี้จะใช้มากกว่า Transit Time และค่า Diffusion Time จะยังมีค่ามากกว่า  $e-h$  กำเนิดขึ้นนอก Depletion Region

### 2.4.2.3 RC Time Constant ( $t_{rc}$ )

เป็นเวลาของโฟโตรีโอดและของวงจรที่นำมาต่อรวมกัน ซึ่งเกิดขึ้นจากการ Discharge ของตัวเก็บประจุ ซึ่งประพุดิตัวเสมือนวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)

จากปัจจัยดังกล่าวจะทำให้มีผลต่อ Rise Time ของเอาต์พุตพัลส์ โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$t_r = [ (t_{cc})^2 + (t_{diff})^2 + (t_{rc})^2 ]$$



รูปที่ 2.32 การเปรียบเทียบพัลส์อินพุตและพัลส์เอาต์พุตเป็นผลเนื่องมาจาก Diffusion Time

### 2.4.3 สัญญาณรบกวนในโฟโตรีโอด

อีกสิ่งหนึ่งที่เราต้องสนใจนั่นคือเรื่องของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในตัวโฟโตรีโอด ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการออกแบบวงจรภาครับ เพราะสัญญาณรบกวนในโฟโตรีโอดจะเป็นตัวจำกัดในการรับสัญญาณต่ำๆ โฟโตรีโอดส่วนมากจะไม่มีกำลังขยายในตัวเองต้องนำเอาต์พุตที่เป็นกระแสไปเปลี่ยนเป็นแรงดันแล้วนำไปผ่านวงจรขยาย ซึ่งจะทำให้สัญญาณรบกวนนั้นถูกขยายตามไปด้วย โดยจะกล่าวถึงสัญญาณรบกวนหลักๆต่อไปนี้

#### 2.4.3.1 สัญญาณรบกวนควอนตัม (Quantum Noise)

โดยจะมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพควอนตัม ซึ่งเป็นการจัดการเปลี่ยนแปลงของการกลับ (Conversion) ช่วงขณะโฟตอนเป็นคู่ Electron-Hole โดยการคำนวณนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนเชิงสถิติ (Statistical Number) ของความต้องการอิเล็กตรอนต่อการตรวจจับพัลส์ของแสง 1 พัลส์ในตัวตรวจจับอุดมคติ ในทางปฏิบัติมีค่าประมาณ 400 โฟตอนต่อ 1 พัลส์

#### 2.4.3.2 สัญญาณรบกวนเชิงประทุ (Short Noise)

โดยเกิดขึ้นโดยกระบวนการแบบสุ่ม (Random Process) ของโฟตอนในหารสร้างคู่ Electron-Hole ซึ่งจะมีเพิ่มมากขึ้นเมื่อแบนด์วิทและกระแสเฉลี่ยเพิ่มขึ้น จะสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อไม่มีแสงตกกระทบบนโฟโตรีโอดเลย ซึ่งเมื่อรวมกระแสของสัญญาณเข้าไปก็จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนชนิดนี้ขึ้นได้

$$i_{sh} = (2.e.I_p.B)^{1/2}$$

เมื่อ  $I_p$  เป็น Photo Current =  $e.\eta.P_0/h\nu$

$B$  เป็น Bandwidth

$e$  เป็น Electron Charge ( $1.602 \times 10^{-19}$  C)

### 2.4.3.3 สัญญาณรบกวนเชิงความร้อน (Thermal Noise)

ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับกระแสที่เกิดขึ้นจากความร้อนโดยจะมีผลสำคัญกับความต้านทานโหลดของตัวตรวจจับ โดยพลังงานความร้อนจากความต้านทานโหลดนี้จะยอมให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสแบบอิสระ

$$i_j = [(4.K.B.T)/R_{sh}]^{1/2}$$

เมื่อ  $K$  ค่าคงที่ของ Boltzmann's

$T$  อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Kelvin)

$R_{sh}$  Shunt Resistance ของโฟโตไดโอด

### 2.4.3.4 Dark Noise

เกิดจากจากกระแสรั่วไหลที่ตัวโฟโตไดโอดเมื่อได้รับไปอัสย้อนกลับเราเรียกกระแสนี้ว่า Dark Current,  $I_d$  ซึ่งเป็นคุณลักษณะหนึ่งของโฟโตไดโอดที่มีอยู่ในคู่มือ โดยที่ขนาดของมันจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างและแรงดันที่ป้อนให้กับโฟโตไดโอด ดังนั้นสัญญาณรบกวนชนิดจะไม่ได้เกิดขึ้นถ้าไม่ได้ป้อนไปอัสย้อนกลับ

$$i_n = [2.e.B.I_d]^{1/2}$$

### 2.4.3.5 สัญญาณรบกวนรวม (Total Noise)

เป็นรากที่สองของผลรวมของสัญญาณรบกวนประทุสัญญาณรบกวนเชิงความร้อน และ Dark noise

$$i_T = [(i_n)^2 + (i_j)^2 + (i_{sh})^2]^{1/2}$$

## 2.4.4 โหมดการทำงานของโฟโตไดโอด (Photodiode Circuit Operating Modes)

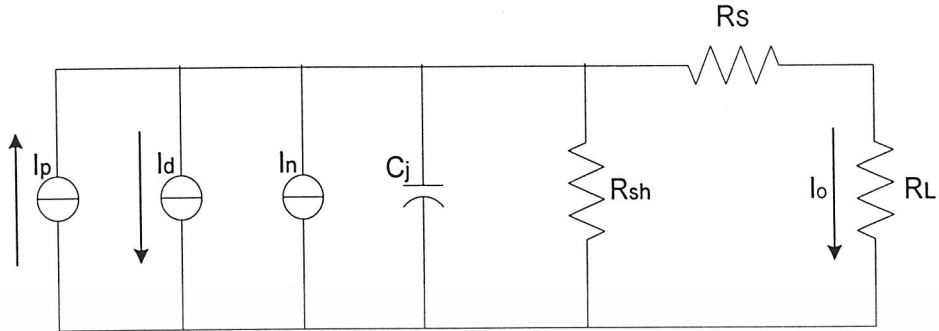
### 2.4.4.1 Photovoltaic Mode

เป็นโหมดการทำงานที่ไม่ต้องป้อนไปอัสย้อนกลับให้แก่ตัวโฟโตไดโอด การใช้งานกับโหมดนี้ จะใช้ที่ความถี่ต่ำๆ (ประมาณ 100 kHz) เพราะ Response Time มีค่ามาก สำหรับข้อดีคือมี SNR ดีกว่าอีก โหมดหนึ่งเพราะไม่มี Dark Current

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.4.2 Photoconductive Mode

เป็นโหมดการทำงานที่ต้องทำการป้อนไบอัสย้อนกลับให้กับโฟโตไดโอดใช้กับงานที่ต้องการ Frequency Response สูงๆ แต่จะมีสัญญาณรบกวนจาก Dark Current



รูปที่ 2.33 แสดงวงจรเทียบเคียงของกระแสที่เกิดขึ้นกับกระแส Noise

$I_p$  = กระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากโฟตอนที่ตกกระทบ

$I_d$  = Dark Current

$I_n$  = Noise Current

$C_j$  = คาปาซิเตอร์ที่รอยต่อ

$R_{sh}$  = Shunt Resistance

$R_s$  = Series Resistance

$I_o$  = กระแสที่จ่ายออกโหลด

## 2.5 เส้นใยแสง

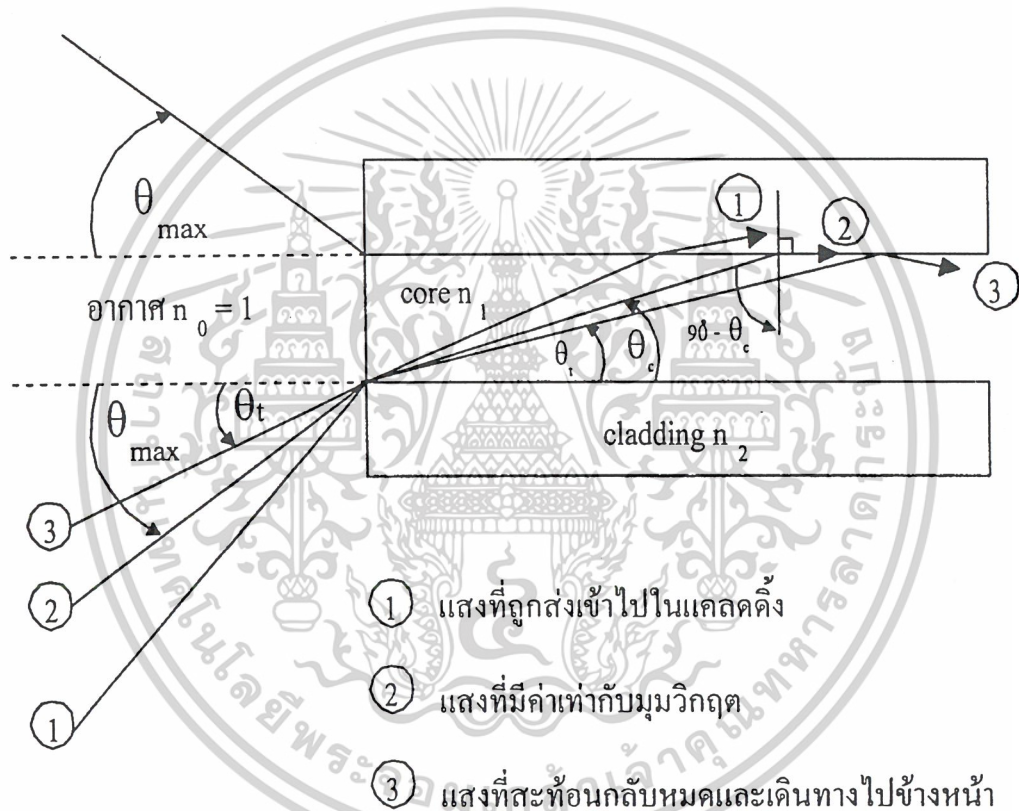
เส้นใยแสง คือเส้นใยขนาดเล็กที่ทำหน้าที่เป็นตัวนำแสง โครงสร้างของเส้นใยแสงประกอบด้วย ส่วนที่แสงเดินทางผ่านเรียกว่า Core และส่วนที่หุ้ม Core อยู่เรียกว่า Cladding ทั้ง Core และ Cladding เป็น Dielectric ใส 2 ชนิด (Dielectric หมายถึงสารที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น แก้ว พลาสติก เป็นต้น) โดยการทำให้ค่าดัชนีการหักเหของ Cladding มีค่าน้อยกว่าค่าดัชนีการหักเหของ Core เล็กน้อยประมาณ 0.2 – 0.3 % และอาศัยปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดของแสง สามารถทำให้แสงที่ป้อนเข้าไปใน Core เดินทางไปได้ นอกจากนั้นเนื่องจากเส้นใยแสงมีขนาดเล็กมากเท่าเส้นผม นั้นหมายความว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ด้านนอกของ Cladding มีขนาดประมาณ 0.1 มม. ส่วน Core ที่แสงเดินทางผ่านนั้นมีขนาดเล็กลงไปอีก นั่นคือประมาณหลายไมโครเมตร ซึ่งมีค่าหลายเท่าของความยาวคลื่นแสงที่ใช้งาน ค่าต่างๆเหล่านี้เป็นค่าที่กำหนดขึ้นจากคุณสมบัติการส่งและคุณสมบัติทางเมคานิกส์ที่ต้องการ เส้นใยแสงนอกจากมีคุณสมบัติการส่งที่ดีเยี่ยมแล้วยังมีลักษณะเด่นอย่างอื่นเช่น ขนาดเล็กและน้ำหนักเบาอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาอันดับแรกที่ต้องคำนึงถึงก็คือ ทำอย่างไรจึงจะสามารถป้อนแสงเข้าไปใน Core ที่มีขนาดเล็กมากของเส้นใยแสงได้ และเมื่อป้อนเข้าไปแล้ว แสงนั้นเดินทางอย่างไรใน Core ซึ่งเราจะทำการพิจารณาถึงปัญหาพื้นฐานเหล่านี้

### 2.5.1 การป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยแสง

เนื่องจากว่าแสงที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงนั้น จะเกิดการกระจายกว้างออกเนื่องจากปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของแสงตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ในการที่จะป้อนแสงเข้าไปใน Core ที่มีขนาดเล็กมากนั้นต้องใช้เลนส์ทำการรวมแสง แต่ทว่าแสงที่รวมนั้นไม่ใช่ว่าจะถูกป้อนเข้าไปในเส้นใยแสงได้หมด แสงที่มีมุมตกกระทบที่เหมาะสมเท่านั้นจึงจะสามารถเข้าไปในเส้นใยแสงได้ดังแสดงในรูปที่ 2.34 จากรูปจะเห็นได้ว่าที่จุดป้อนแสงของเส้นใยแสงนั้นจะเป็นจุดต่อของตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงต่างกัน 3 ชนิด



รูปที่ 2.34 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยแสง

ตัวกลางทั้ง 3 ชนิดนี้คืออากาศ Core และ Cladding ของเส้นใยแสง ถ้าให้ค่าดัชนีการหักเหของแสงของตัวกลางทั้ง 3 ชนิดเป็น  $n_0$  ( $n_0 = 1$ ),  $n_1$  และ  $n_2$  ตามลำดับ จะเกิดการหักเห การสะท้อนกลับของแสงที่รอยต่อของอากาศกับ Core และ Core กับ Cladding ตามกฎที่ได้กล่าวไว้ ในที่นี้ให้มุมรับแสงของเส้นใยแสงที่มีค่ามากที่สุดเป็น  $\theta_{max}$  จากรูปที่ 2.34 จะเห็นว่าลำแสง 2 นั้นมีมุมรับแสงตรงรอยต่อของ Core กับ Cladding นั้นเป็นมุมวิกฤต (Critical Angle) เพราะฉะนั้นตรงรอยต่อของอากาศ กับ Core กับ Cladding นั้นจากกฎของ Snell จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sin q_{\max} = N_1 \sin q \quad (1)$$

$$2 \sin(90^\circ + q_c) = \cos q_c \frac{N_2}{N_1} \quad (2)$$

ดังนั้นกรณีที่มุมรับแสง  $q_{\max}$  มีค่าสูงสุดได้นั้น  $N_2 = N_1$  จากสมการที่ (1) และ (2) จะได้ว่า

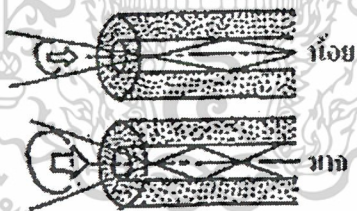
$$\sin q_{\max} = \sqrt{\frac{N_1^2 - N_2^2}{N_1^2}} \text{ ปร } N_1 \sqrt{2D} \quad (3)$$

$$D = \frac{(N_1 - N_2)}{N_1} \quad (4)$$

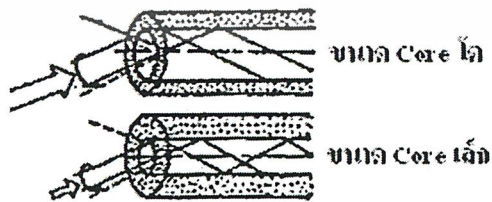
D ในที่นี้เรียกว่าอัตราส่วนของผลต่างของดัชนีการหักเหของแสง

สำหรับ  $\sin q_{\max}$  นี้ตามศัพท์เทคนิคทางด้านแสงเรียกว่า Numerical Aperture เขียนย่อว่า “NA” หมายถึงขนาดของการเปิดรับให้แสงผ่าน และใช้เป็นตัวแสดงเงื่อนไขการป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยแสง นอกจากนั้นยังถือเป็นตัวประกอบพื้นฐานอันหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเชื่อมต่อแสงระหว่างต้นกำเนิดแสงกับเส้นใยแสงด้วย ยกตัวอย่างเช่นสมมติว่าเส้นใยแสงมี  $N_1 = 1.475$  และ  $N_2 = 1.46$  (ค่าอัตราส่วนผลต่างของดัชนีการหักเหของแสง = 1%) ในกรณีนี้มีค่า NA = 0.21 รูปที่ 2.35 แสดงความหมายของ NA และขนาด Core ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเชื่อมต่อแสงระหว่างต้นกำเนิดแสงกับเส้นใยแสง

จากรูปจะเห็นได้ว่าถ้าหากขนาดของ Core และ NA มีค่าคงที่แล้วจะกำหนดปริมาณของแสงที่ป้อนเข้าไปใน Core ได้ทันที เส้นใยแสงที่มี Core ขนาดใหญ่และมีค่า NA มากจะมีประสิทธิภาพการเชื่อมต่อแสงระหว่างต้นกำเนิดแสงกับเส้นใยแสงสูงมาก



(a) กราฟขนาด Core เท่ากับแต่ NA ต่างกัน



(b) กราฟ NA เท่ากันแต่ขนาด Core ต่างกัน

รูปที่ 2.35 แสดงผลของ NA และขนาดของ Core ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเชื่อมต่อแสงระหว่างต้นกำเนิดแสงกับเส้นใยแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.2 ชนิดของเส้นใยแสง

วิธีการแบ่งชนิดของเส้นใยแสงมีหลายวิธีกล่าวคือ แบ่งตามชนิดของสาร Dielectric, แบ่งตาม Propagation Mode หรือแบ่งตามลักษณะของดัชนีการหักเหของ Core

### 2.5.2.1 การแบ่งเส้นใยแสงตามชนิดของสาร Dielectric

เราสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ

- (1) Silica Glass Optic fiber ซึ่งใช้ Dielectric ที่เป็น Silica Glass
- (2) Multi Component Glass Optic Fiber ซึ่งใช้ Dielectric ที่เป็นแก้วหลายชนิดปนกัน
- (3) Plastic Optic Fiber ซึ่งใช้ Dielectric ที่เป็นพลาสติก

สำหรับ (1) นั้นนอกจากจะใช้ Silica ( $\text{SiO}_2$ ) ที่บริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่แล้วยังใช้สารอื่นเติมลงไปเพื่อทำให้ดัชนีการหักเหของแสงเปลี่ยนแปลงไปตามต้องการ สารอื่นที่เติมลงไปนี้เรียกว่า Dopant ได้แก่ Germanium (Ge), Boron (B), Fluorine (F) เป็นต้น

สำหรับ (2) นั้นส่วนมากจะใช้ Soda Calcium, แก้ว, แก้วที่มี Boron และ Silica ผสมและอื่นๆเป็นหลัก ส่วน Dopant ได้แก่ Sodium (Na), Calcium (Ca)

สำหรับ (3) นั้นใช้สารพวก Silicon Resin, Acryl Resin เช่น Polymetry Methyl Acid : PMMA หนึ่งสำหรับเส้นใยแสงที่ใช้ในระบบโทรคมนาคม (Telecommunication Network) นั้นนิยมใช้ Silica Glass Optic Fiber เพราะมีข้อดีคือ การสูญเสีย (Loss) ต่ำและคุณสมบัติการส่ง (Transmission Characteristic) คงที่ไม่เปลี่ยนแปลง แต่สำหรับงานที่ต้องการส่งคือขยลงมา, ใช้งานง่าย และอื่นๆ ในกรณีนิยมใช้เส้นใยแสงที่เป็น Plastic Optic Fiber

### 2.5.2.2 การแบ่งชนิดของเส้นใยแสงตามจำนวน Propagation Mode

การแบ่งชนิดของเส้นใยแสงตามจำนวน Propagation Mode สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ Single Mode Optic Fiber ใช้ชื่อย่อว่า SM Fiber และอีกชนิดหนึ่งคือ Multi Mode Optic Fiber ใช้ชื่อย่อว่า MM Fiber

#### 2.5.2.2.1 Single Mode (SM)

เส้นใยแสงชนิดนี้ แสงสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในเส้นใยแสงได้เพียง Mode เดียวดังนั้นจึงต้องผลิตเส้นใยแสงชนิดนี้ซึ่งเป็นแบบ Step Index ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Core มีขนาดเล็กมาก และมีค่าดัชนีหักเหของแสงระหว่าง Core และ Cladding แตกต่างประมาณ 0.3% เส้นใยแสงแบบ Single Mode จะเหมาะสำหรับการสื่อสารระยะไกลหรือระบบที่มี Transmission Speed สูงๆ เนื่องจากมีการลดทอนของสัญญาณต่ำมาก และยังมี Dispersion น้อยมาก

#### 2.5.2.2.2 Multi Mode (MM)

เส้นใยแสงชนิดนี้ แสงสามารถเคลื่อนที่ไปในเส้นใยแสงได้หลาย Mode เนื่องจากมี Core มีขนาดที่ใหญ่กว่าแบบ Single Mode ซึ่งมีทั้งแบบ Step Index และ Graded Index แต่แบบ Graded Index จะได้รับความนิยมมากกว่าเนื่องจากสามารถลดปัญหาเกี่ยวกับ Modal Dispersion ลงได้ เส้นใยแสงแบบ Multi Mode จะเหมาะสำหรับการสื่อสารระยะใกล้ หรือระบบที่มี Transmission Speed ต่ำๆ เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2.3 การแบ่งชนิดของเส้นใยแสงตามลักษณะของดัชนีการหักเห

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเห คือ

#### 2.5.2.3.1 Step Index Optic Fiber (SI – Fiber)

เป็นเส้นใยแสงที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหระหว่าง Core กับ Cladding เป็นลักษณะขั้นบันได (Step) จึงเรียกว่า Step Index Optic Fiber

เส้นใยแสงนี้จะมีค่าดัชนีการหักเหแสงของ Core และ Cladding ที่แตกต่างกัน โดยที่บริเวณ Core จะมีค่าดัชนีการหักเหของแสงสูงกว่า Cladding เล็กน้อยเมื่อพิจารณา Index Profile ของเส้นใยแสงชนิดนี้ การเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหของแสงจาก Core ไปยัง Cladding จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด คล้ายขั้นบันได ดังนั้นจึงเรียกเส้นใยแสงชนิดนี้ว่า Step Index Optic Fiber

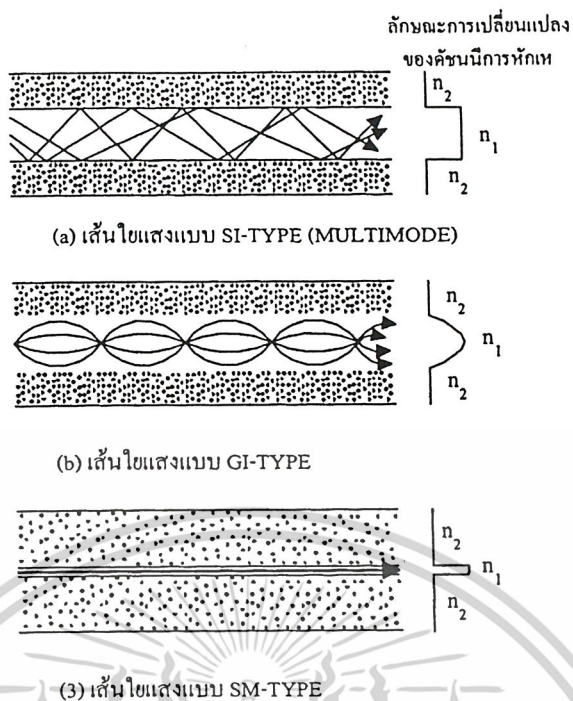
Step Index Optic Fiber เมื่อนำไปใช้งาน จะเป็นได้ทั้ง Single Mode และ Multi Mode โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของ Core ที่แตกต่างกัน หากใช้เป็น Single Mode จะต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางของ Core ประมาณ 10  $\mu\text{m}$  แต่หากใช้เป็น Multi Mode เส้นผ่านศูนย์กลางของ Core ประมาณ 50  $\mu\text{m}$  อย่างไรก็ตาม หากใช้เป็น Multi Mode ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ Modal Dispersion เนื่องจากแสงมีการเคลื่อนที่หลายทาง แต่ละเส้นทางระยะทางไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงทำให้สัญญาณไปถึงปลายทางไม่พร้อมกัน ทำให้เกิดการผิดเพี้ยน (Distortion) ของสัญญาณ ดังนั้น Graded Index Optic Fiber จึงเกิดขึ้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าว

#### 2.5.2.3.2 Graded Index Optic Fiber (GI – Fiber)

เป็นเส้นใยแสงที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหระหว่าง Core กับ Cladding ค่อยๆ ลดลงทีละน้อยต่างจาก SI – Fiber จึงเรียกว่า Graded Index Optic Fiber

เส้นใยแสงชนิดนี้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อลดปัญหา Modal Dispersion โดยทำให้ค่าดัชนีการหักเหตรงบริเวณ Core สูงกว่า Cladding เล็กน้อย ค่าดัชนีหักเหของ Core เปลี่ยนแปลงทีละน้อย และมีการสะท้อนบริเวณ Cladding การหักเหและการสะท้อนดังกล่าว เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทีละน้อยของค่าดัชนีการหักเหของแสง จึงทำให้ดูเหมือนว่าแสงเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้ง

เส้นใยชนิดนี้ใช้เป็น Multi Mode เท่านั้น การเคลื่อนที่ของแสงแต่ละเส้นทางจะใช้ระยะเวลาใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าระยะทางจะแตกต่างกัน เนื่องจากแสงที่เดินทางสั้นที่สุดผ่านแกนกลางของ Core จะเคลื่อนที่ช้าที่สุด ในทางกลับกันแสงที่เดินทางไกลที่สุดซึ่งมีการสะท้อนบริเวณ Cladding จะเคลื่อนที่ได้เร็วที่สุด ทั้งนี้เนื่องค่าดัชนีการหักเหของแสงทำให้แสงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลให้ปัญหาเกี่ยวกับ Modal Dispersion ลดลง



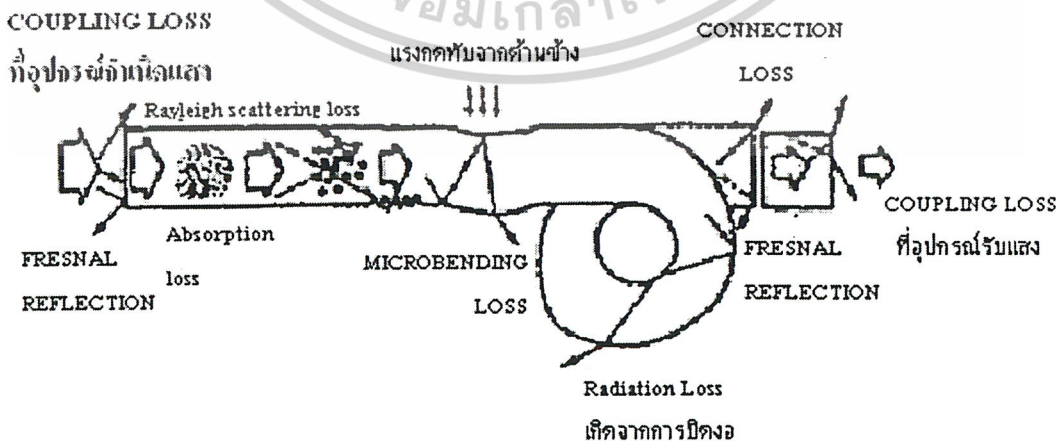
รูปที่ 2.36 แสดงลักษณะการเดินทางของแสงใน Core ของเส้นใยแสงแต่ละชนิด

ลักษณะการเดินทางของแสงภายใน Core ของเส้นใยแสงแต่ละชนิดแสดงดังรูปที่ 2.36

GI – Fiber เป็นเส้นใยแสงที่จัดทำเป็นพิเศษเพื่อการส่งแบบ Multi Mode

### 2.5.3 การสูญเสียแสงในเส้นใยแสง

มีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 2 ประการที่จะกำหนดความเร็วในการส่ง (Transmission Speed) และระยะทางในการถ่ายทอดสัญญาณ (Repeater Span) ซึ่งก็คือ การสูญเสียกับ Bandwidth ของการส่ง (Transmission Bandwidth) การสูญเสียแสง (Optical Loss) ซึ่งเป็นตัวแปรที่บอกเราทราบว่ากำลังของแสงที่เดินทางไปในเส้นใยแสงนั้นจะลดลงไปเท่าไร หากมีการสูญเสียก็จะทำให้มีระยะทางในการส่งที่ไกลขึ้น การสูญเสียแบ่งออกตามความแตกต่างของโครงสร้างได้ ซึ่งเป็นการสูญเสียที่มีอยู่ในตัว (Fixed Loss) และการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นมา (Additive Loss) สาเหตุที่ทำให้เกิดการสูญเสียแสงแสดงดังรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 แสดงสาเหตุต่างๆที่ทำให้เกิดการสูญเสียแสง

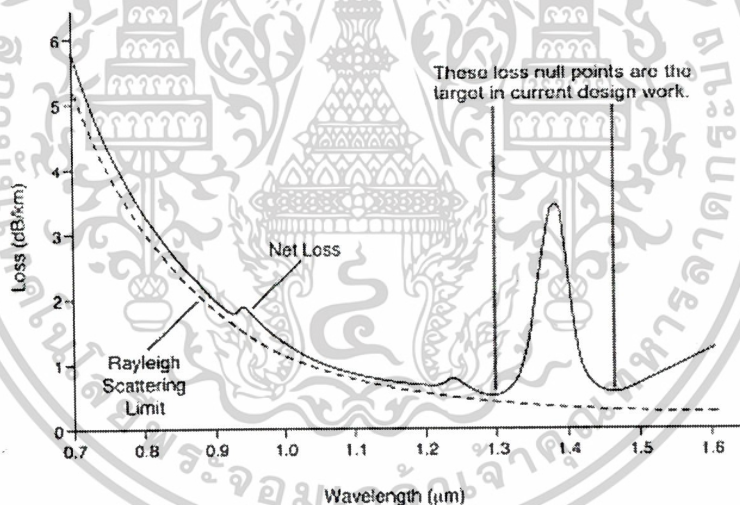
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะเห็นว่า การสูญเสียที่มีอยู่ในตัวเส้นใยแสงนั้น เกิดจากสาเหตุต่างๆ ได้แก่ การดูดแสง (Absorption Loss) การกระจัดกระจายแสงแบบเรย์ลี (Rayleigh Scattering Loss) การกระจัดกระจายแสงเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้าง (Ununiformity Loss) ส่วนการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นมานั้นเกิดจากสาเหตุต่างๆ ได้แก่ การโค้งงอของเส้นใยแสง (Bending Loss) การโค้งงอแบบ Micro Bending Loss การต่อเส้นใยแสง (Connection Loss ได้แก่ การสูญเสียสะท้อนกลับของแสง และการกระจายแสง) การเชื่อมต่อแสงระหว่างอุปกรณ์กำเนิดแสง หรืออุปกรณ์รับแสงกับเส้นใยแสง (Coupling Loss) ต่อไปนี้จะอธิบายถึงรายละเอียดของสาเหตุต่างๆของการเกิดการสูญเสียแสง

### 2.5.3.1 การสูญเสียแสงที่เกิดจากการดูดแสง (Absorption Loss)

การสูญเสียแสงที่เกิดจากการดูดแสงนั้นเกิดจากสารที่ใช้ผลิตเส้นใยแสงเป็นตัวดูดแสง และเปลี่ยนเป็นการสูญเสียทางความร้อน โดยทั่วไปแล้วจะมีการดูดแสงอันเนื่องมาจากแก้วเอง และสารอื่นที่เจือปน (Impurity)

สำหรับการสูญเสียที่เกิดจากการดูดแสงของแก้วนั้น แก้วจะดูดแสง Ultraviolet กับแสง Infrared การดูดแสง Ultraviolet นั้นจะดูดมากที่สุดที่ความยาวคลื่นใกล้กับ 0.1 mm และการดูดแสง Infrared นั้นจะดูดมากที่สุดที่ความยาวคลื่นใกล้กับ 10 mm ส่วนที่ความยาวคลื่นอื่นจะการสูญเสียอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.38 แสดงคุณสมบัติการสูญเสียแสงที่เกิดจากการดูดแสงของเส้นใยแสงที่ทำจากแก้ว

### 2.5.3.2 การสูญเสียแสงที่เกิดจากการกระจัดกระจายแบบเรย์ลี (Rayleigh Scattering Loss)

การสูญเสียแบบนี้เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น เมื่อแสงไปตกกระทบกับวัตถุที่มีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่น แล้วทำให้แสงนั้นเกิดการแตกกระจายออกไปในทิศทางต่างๆ ตัวอย่างของปรากฏการณ์เช่นนี้แสดงดังรูปที่ 2.38 คือการที่เรามองเห็นท้องฟ้าเป็นสีน้ำเงินนั้นเกิดจากการแตกกระจายของแสง ผู้ที่ทำการอธิบายปรากฏการณ์การแตกกระจายของแสงนี้คือนักฟิสิกส์ชื่อ Rayleigh Scattering

สำหรับการผลิตเส้นใยแสงนั้น ทำได้โดยการให้ความร้อนประมาณ 2,000° C แก่แท่งแก้วซึ่งเรียกว่า Perform ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลายมิลลิเมตรไปจนถึงหลายสิบมิลลิเมตร จากนั้นจึงทำการดึงแท่งแก้วให้เป็นเส้นใยแสงขนาดเล็ก และในตอนนี้ต้องทำเส้นใยแสงนั้นมีอุณหภูมิลดลงจาก 2,000°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นอุณหภูมิห้องประมาณ  $20^{\circ}\text{C}$  (หรือนั่นคือ ความไม่สม่ำเสมอของค่าดัชนีการหักเห) ตกค้างอยู่อย่างนั้น ในเส้นใยแสง และเป็นสาเหตุทำให้เกิด Rayleigh Scattering ขึ้นในเส้นใยแสง จัดเป็นการสูญเสียที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งขนาดของ Rayleigh Scattering จะเป็นสัดส่วนกลับกับความยาวแสงยกกำลัง 4 ด้วยเหตุนี้ จะเห็นว่าในรูปที่ 2.38 ความยาวคลื่นแสงที่เดินทางยังมีค่ามาก Rayleigh Scattering จะมีค่าน้อยลง



รูปที่ 2.39 แสดง Scattering ของแสงในบรรยากาศ

นอกจากนั้นขนาดของ Rayleigh scattering อย่างเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิในตอนที่ทำให้การ Perform ให้เป็นเส้นใยแสง ถ้าหากสามารถทำให้อุณหภูมิต่ำได้ Rayleigh Scattering Loss ก็จะลดน้อยลง

### 2.5.3.3 การสูญเสียจากการกระจัดกระจายอันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในเส้นใยแสง (Ununiformity Loss)

สำหรับเส้นใยแสงที่สร้างขึ้นมาจริงๆ แล้วนั้นในการสร้างไม่สามารถสร้างเส้นใยแสงที่มีลักษณะกลม 100% นอกจากนั้น Core และ Cladding ที่ประกอบกันเป็นเส้นใยแสงนั้นไม่สามารถที่จะทำให้เป็นทรงกระบอกที่สม่ำเสมอตลอดความยาวของเส้นใยแสงได้ กล่าวคือจะมีลักษณะคล้ายถนนขรุขระ เมื่อมีรอยต่อที่ไม่เรียบสม่ำเสมอเช่นนี้จะทำให้เกิดการกระจัดกระจายออกไปข้างนอก ดังนั้น รอยต่อที่ไม่เรียบสม่ำเสมอนั้นจะทำให้แสงที่เดินทางเกิดการสะท้อนกลับอย่างสะเปะสะปะทำให้เกิดการสูญเสียแสงเพิ่มขึ้น การสูญเสียเช่นนี้เรียกว่าการสูญเสียจากการกระจัดกระจายอันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในเส้นใยแสง

### 2.5.3.4 การสูญเสียจากการกระจัดกระจายอันเนื่องมาจากการโค้งงอของเส้นใยแสง (Bending Loss)

เป็นการสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อเส้นใยแสงถูกทำให้โค้งงอไป สำหรับการ โค้งงอเส้นใยแสงนั้นแสงที่มีมุมมากกว่ามุมวิกฤตแล้ว แสงนั้นจะกระจัดกระจายออกไปนอก Core ทำให้เกิดการสูญเสียแสงขึ้นดังนั้น การออกแบบระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแสงจะต้องระมัดระวังอย่าให้เกิดการ โค้งงอเส้นใยแสง หรือโค้งงอในรัศมีที่ยอมรับได้เช่น ไม่เกิน 40 ม.ม. เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3.5 การสูญเสียที่เกิดจากการโค้งงอแบบ Micro Bending

เป็นการสูญเสียที่มีแรงกดไม่สม่ำเสมอมากระทำต่อด้านข้างของเส้นใยแสง ทำให้แกนของเส้นใยแสงบิดงอไปเล็กน้อย (ประมาณ 2-3 มม.) เป็นเหตุให้เกิดการสูญเสียมากขึ้น การสูญเสียนี้เรียกว่า Micro Bending Loss ด้วยเหตุนี้ในการออกแบบโครงสร้างเส้นใยแสงจะต้องทำการป้องกันแรงกดทางด้านข้าง เช่น ทำชั้น (Layer) ป้องกันการกระแทก เป็นต้น

### 2.5.3.6 การสูญเสียที่เกิดจากการต่อเส้นใยแสง (Connection Loss)

การต่อเส้นใยแสงนี้คล้ายกับการต่อท่อประปา กล่าวคือ ต้องต่อเข้ากันอย่างดีมิให้มีน้ำรั่วออกมาข้างนอกท่อได้ เช่นเดียวกับเส้นใยแสง การทำการต่อเส้นใยแสง 2 เส้นเข้าด้วยกัน อันดับแรกจำเป็นต้องทำการปรับ Core ทั้งสองที่แสงเดินทางผ่านให้ตรงกันพอดี ถ้าหากว่าไม่ตรงกันแล้วแสงที่เดินทางผ่านรอยต่อนั้นจะมีแสงบางส่วนที่สามารถเล็ดลอดออกมาจากเส้นใยแสงได้ ทำให้เกิดการสูญเสีย หรือหากมีช่องว่างเพียงเล็กน้อยก็จะสามารถทำให้เกิดการสูญเสียจากการสะท้อนกลับ ถ้าหากช่องว่างโตมากขึ้นกว่านี้ จะเกิดการสะท้อนกลับที่เรียกว่า Fresnel Reflection

### 2.5.3.7 การสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างเส้นใยแสง กับอุปกรณ์กำเนิดแสงและอุปกรณ์รับแสง (Coupling Loss)

แสงที่ปล่อยออกมาจากอุปกรณ์กำเนิดแสงนั้น มีเงื่อนไขในการป้อนเข้าไปในสายใยแสงดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว นั่นคือค่า NA กรณีที่ใช้อุปกรณ์กำเนิดแสงได้แก่ Laser Diode หรือ Light Emitting Diode จะมีความแตกต่างกันทางความกว้างของลำแสงที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง แม้จะใช้เลนส์รวมแสงแล้วก็ตาม LD จะมีการสูญเสียของการเชื่อมต่อแสงน้อยกว่า นอกจากนั้น โครงสร้างของเส้นใยแสงที่ถูกป้อนเข้าไปนั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Core ของเส้นใยแสงแบบ SM และแบบ GI จะมีค่าต่างกันทำให้ขนาดของการสูญเสียของการเชื่อมต่อแสงมีค่าต่างกันไปด้วย

เกี่ยวกับการสูญเสียของการเชื่อมต่อระหว่างเส้นใยแสงกับอุปกรณ์รับแสงนั้น เส้นใยแสงที่มี NA มากเช่นเส้นใยแสงแบบ GI นั้นจะมีลำแสงกว้างกว่าลำแสงที่ออกมาจากเส้นใยแสงแบบ SM ทำให้มีการสูญเสียมากกว่า

## 2.5.4 การขยายกว้างออก (Dispersion) และ Transmission Bandwidth ของเส้นใยแสง

### 2.5.4.1 การขยายกว้างออก (Dispersion)

สำหรับ Multi Mode Optic Fiber นั้นความเร็วในการเดินทางของแต่ละ Mode ภายในเส้นใยแสงจะต่างกัน เมื่อป้อนพัลส์ที่ถูกผสมแบบ Pulse Modulation เข้าไปในเส้นใยแสงแบบ Multi Mode Optic Fiber พัลส์ของแสงที่ออกมาจากปลายอีกข้างหนึ่งของเส้นใยแสง เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับพัลส์เดิม จะเห็นได้ว่าขยายออกกว้างกว่า การที่เกิดอย่างนี้นั้น แม้ว่าความยาวคลื่นของต้นกำเนิดแสงจะเหมือนกันก็ตาม แต่ทว่าพัลส์ของแสงที่ป้อนเข้าไปนั้นจะแบ่งออกเป็น Mode ต่างๆที่มีความเร็วในการเดินทางต่างกัน

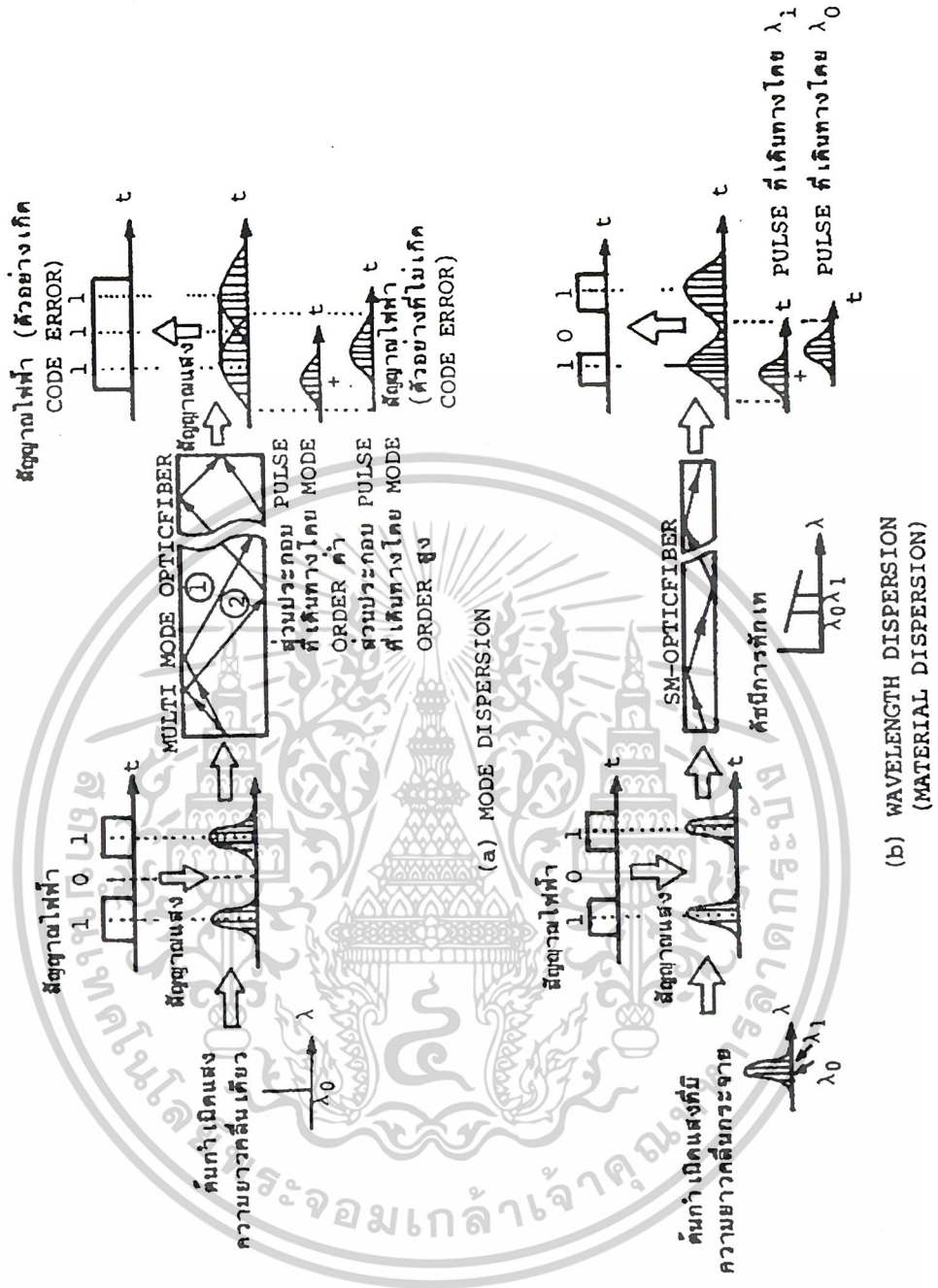
ดังนั้นในการสื่อสารด้วยเส้นใยแสงจึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Mode Dispersion ทำให้ไม่สามารถทำให้ระยะห่างระหว่างพัลส์ เล็กลงมากๆ ได้

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า Multi Mode Optic Fiber นั้นส่วนใหญ่ Mode Dispersion จะเป็นตัวกำหนด Bandwidth แม้ว่าจะพยายามทำให้ Mode Dispersion นี้น้อยลงโดยการทำให้ค่าดัชนีหักเหของ Core มีลักษณะ Parabola ซึ่งเรียกว่า Graded Index Optic Fiber แล้วก็ตามแต่เนื่องจากมีขีดจำกัดในความแน่นอนของรูปร่างของค่าดัชนีการหักเหของแสง ด้วยเหตุนี้ในระบบการส่งข่าวสารที่มีความต้องการคุณสมบัติที่มี Bandwidth กว้างนั้นก็จะใช้ Single Mode Optic Fiber ที่ไม่มี Mode Dispersion โดยทำให้มีเพียง Mode เดียว

#### 2.5.4.2 การขยายกว้างออกของความยาวคลื่น (Wavelength Dispersion)

ในตัวกลางที่มีเนื้อเดียวกัน แต่ถ้าหากความยาวคลื่นต่างกันแล้วค่าดัชนีการหักเหจะต่างกัน เป็นผลทำให้ความเร็วในการเดินทางต่างกันตามความยาวคลื่น ปรากฏการณ์ที่เห็นได้เกี่ยวกับดัชนีการหักเหที่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงคือ การกระจายแสงออกเป็นสีต่างๆของปริซึม การเกิดรุ้ง เป็นต้น แสงที่ใช้ในการสื่อสารเส้นใยแสงนั้น ความจริงแล้วไม่ใช่แสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน (ความยาวคลื่นยิ่งมากเท่าใด ค่าดัชนีการหักเหจะน้อยลงเท่านั้น ซึ่งเป็นผลให้ความเร็วในการเดินทางเพิ่มขึ้น) การขยายกว้างออกของความยาวคลื่นนี้เป็นสาเหตุให้ Bandwidth ถูกจำกัดค่าเช่นเดียวกับกรณีของ Mode Dispersion ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น และสาเหตุนี้เรียกว่า Material Dispersion

นอกจากนั้นกรณีที่ค่าผลต่างของค่าดัชนีการหักเหของแสงระหว่าง Core กับ Cladding มีค่าน้อยนั้นปรากฏการณ์การสะท้อนกลับหมดของแสงที่รอยต่อของ Core กับ Cladding จะไม่เหมือนกับที่เกิดในกระจกเงา กล่าวคือส่วนหนึ่งของแสงจะทะลุผ่านเข้าไปใน Cladding ก่อนแล้วค่อยสะท้อนกลับหมด และขนาดการทะลุเข้าไปนี้จะแตกต่างกันตามความยาวคลื่น เป็นผลให้ระยะทางการเดินทางของแสงนั้นขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสง (ความยาวคลื่นแสงยิ่งมาก ขนาดการทะลุเข้าไปใน Cladding จะมากขึ้น และจะทำให้เส้นทางการเดินทางยาวมากขึ้น) การขยายกว้างออกของระยะการเดินทางของแสงนี้เรียกว่า Structure Dispersion ในการสื่อสารด้วยเส้นใยแสงนั้นการเกิด Material Dispersion และ Structure Dispersion รวมเรียกว่า Wavelength Dispersion



รูปที่ 2.40 แสดงการเกิด Dispersion ของเส้นใยแสง

2.5.4.3 ขนาดความกว้าง Bandwidth ของการส่ง (Transmission Bandwidth)

ปัจจุบัน Transmission Bandwidth ที่ใช้ในการสื่อสารด้วยเส้นใยแสงนั้น เป็นตัวบอกให้ทราบว่า จะสามารถส่งสัญญาณแสงที่ผสมกับสัญญาณข่าวสารด้วยความถี่สูงมากแค่ไหน ปกติจะแสดงขนาดความกว้างตรงจุดที่คุณสมบัติความถี่ Base Band(Base Band Frequency Characteristic)ของเส้นใยแสงตกลง 6 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำว่า Base Band Frequency Characteristic นั้นหมายถึง คุณสมบัติความถี่ของอัตราส่วนของขนาดสัญญาณไฟฟ้าซึ่งเป็น Sine Wave ที่นำมาผสม (Modulation) ทางด้าน Input กับสัญญาณไฟฟ้าที่แยกออกมาจากการผสม (Demodulation) ทางด้าน Output ในสายส่งที่เป็นสายใยแสง

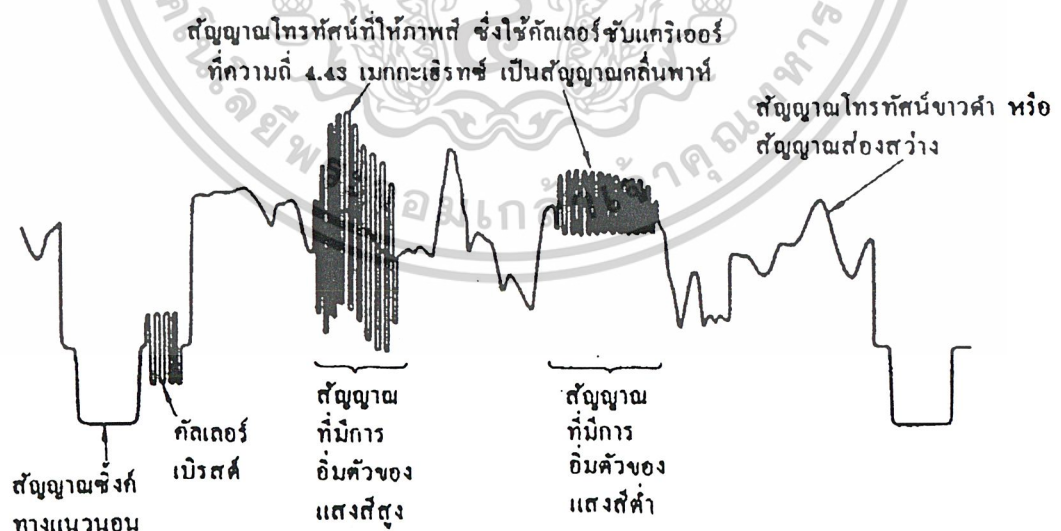
Base Band Frequency Characteristic ของเส้นใยแสงจะเป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติการส่งของเส้นใยแสงกับสายเคเบิลโลหะแบบ Balance และกับสาย Coaxial จะเห็นว่าคุณสมบัติ Base Band Frequency ของเส้นใยแสงกว้างกว่าของสายเคเบิลโลหะแบบ Balance และสาย Coaxial ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมากมาย โดยเฉพาะสายใยแสงแบบ SM นั้น กว้างมากที่สุด โดยทั่วไปกล่าวกันว่าสายใยแสงแบบ SM มีขนาดความกว้างที่ 6 dB เป็นหลายสิบ GHz.Km

## 2.6 องค์ประกอบของสัญญาณภาพ

สัญญาณภาพโทรทัศน์มีองค์ประกอบที่เป็นสัญญาณต่างๆ มีหน้าที่ต่างๆ กันไป ซึ่งจะกล่าวถึงในที่นี้ จะอ้างอิงสัญญาณภาพที่เป็นระบบ PAL โดยจะอธิบายได้เพียงสังเขป

### 2.6.1 สัญญาณลูมิแนนซ์ (Luminance Signal)

สัญญาณลูมิแนนซ์ หรือสัญญาณที่มีระดับแรงดันแปรเปลี่ยนไปตามความสว่างของภาพ โดยจะมี Bandwidth 5 MHz สำหรับมาตรฐาน CCIR (4 MHz สำหรับ FCC) ในการส่งสัญญาณโทรทัศน์สีนั้น จำเป็นต้องส่งสัญญาณความสว่างนี้อยู่เพื่อทำให้เครื่องรับโทรทัศน์ขาวดำสามารถรับและสร้างภาพขาวดำให้เกิดขึ้นหน้าจอได้ และส่งไปเข้าเครื่องรับโทรทัศน์สี เพื่อให้ไปหักล้างกับสัญญาณความต่างสี R-Y, B-Y และ G-Y ก็จะเหลือเฉพาะสัญญาณแม่สี คือ R, B, G ตามลำดับ ลักษณะของสัญญาณลูมิแนนซ์ หรือสัญญาณส่องสว่างกับสัญญาณภาพสีรวมแสดงดังรูปที่ 2.41



รูปที่ 2.41 แสดงสัญญาณลูมิแนนซ์กับสัญญาณภาพสีรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

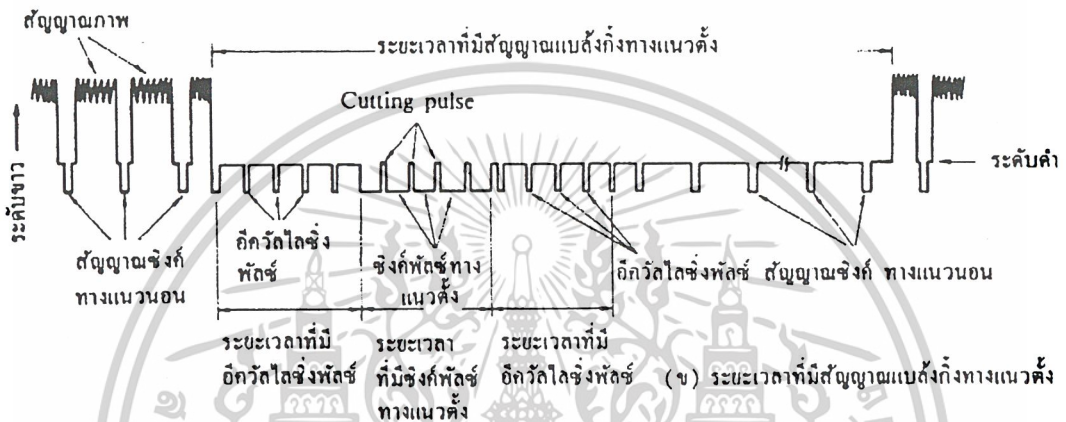
## 2.6.2 สัญญาณควบคุมตำแหน่งภาพ

ประกอบด้วยสัญญาณต่างๆ ดังนี้

1) สัญญาณซิงโครไนซ์(Synchronize Signal) เป็นสัญญาณควบคุมลำอิเล็กตรอน เพื่อให้การสแกนทั้งทางด้านส่งและทางด้านรับสัญญาณภาพเป็นไปอย่างถูกต้องทั้งแนวตั้งและแนวนอน แยกออกเป็น

- สัญญาณซิงโครไนซ์ทางแนวนอน(HoriZontal Synchronize) มีความถี่ 15,625 Hz ในระบบ CCIR (15,725 Hz ในระบบ FCC ) ถ้าไม่มีสัญญาณส่วนนี้จะทำให้ภาพที่ปรากฏทางจอโทรทัศน์สั่นได้

- สัญญาณซิงโครไนซ์ทางแนวตั้ง(Vretical Synchronize) มีความถี่ 50 Hz ในระบบ CCIR (60 Hz FCC) ถ้าไม่มีสัญญาณส่วนนี้จะทำให้ภาพเลื่อน



รูปที่ 2.42 แสดงรูปร่างของสัญญาณซิงโครไนซ์ที่อยู่ในสัญญาณภาพโทรทัศน์

2) สัญญาณแบลนคิง(Blanking Signal) เมื่อนำอิเล็กตรอนทำการสแกนภาพจนครบ 1 เส้นตามแนวนอนแล้วจะเกิดการสะบัดกลับตามแนวนอน เรียกว่าการ Retrace ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นเส้นขึ้นที่ไม่ใช่ส่วนประกอบของภาพ ดังนั้นจึงต้องมีการลบทิ้ง โดยเครื่องส่งสัญญาณ แบลนคิงนี้ออกมาพร้อมสัญญาณภาพ เพื่อเป็นการบังคับให้ลำอิเล็กตรอนให้ทางจอภาพรู้ว่าตรงช่วงไหนไม่ต้องทำการยิงอิเล็กตรอนก็จะคัดออฟการทำงานของปืนยิงอิเล็กตรอนช่วงเวลานั้น เพราะฉะนั้นก็จะไม่เกิดเส้นภาพในขณะนั้น Retrace แล้วในระบบ CCIR เวลาที่ใช้ในการสะบัดกลับตามแนวนอนเท่ากับ 12  $\mu\text{sec}$  ส่วนเวลาที่ใช้ในการสะบัดกลับตามแนวตั้งจะใช้เวลา 1600  $\mu\text{sec}$

### 3) สัญญาณอีควอลไลซิง(Equalizing Signal)

เพื่อให้ได้ภาพที่ปรากฏทางเครื่องรับโทรทัศน์สีเหมือนกับทางสถานีส่งแล้วนั้นจึงต้องทำการส่งรายละเอียดและความเข้มของสัญญาณสีออกอากาศ โดยปกติสัญญาณสีที่ได้จากหลอดภาพโทรทัศน์ จะประกอบด้วยแม่สีทางแสง คือ แดง เขียว และน้ำเงิน แต่ถ้าจะส่งสัญญาณสีทั้ง 3 ออกไปในระบบการส่งสัญญาณโดยตรงนั้น จะต้องใช้คลื่นพาห์ในการส่งถึง 3 ความถี่ด้วยกัน ซึ่งจะทำให้ Bandwidth ของสัญญาณรวมกว้างเกินไป

ดังนั้นจึงต้องใช้สัญญาณก่อรูปความต่างสี ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแม่สีทั้งสามให้เหลือเพียงสัญญาณความต่างสีสองสัญญาณเท่านั้น คือ สัญญาณความต่างสี R-Y และ B-Y โดยมีอัตราส่วนการผสมดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

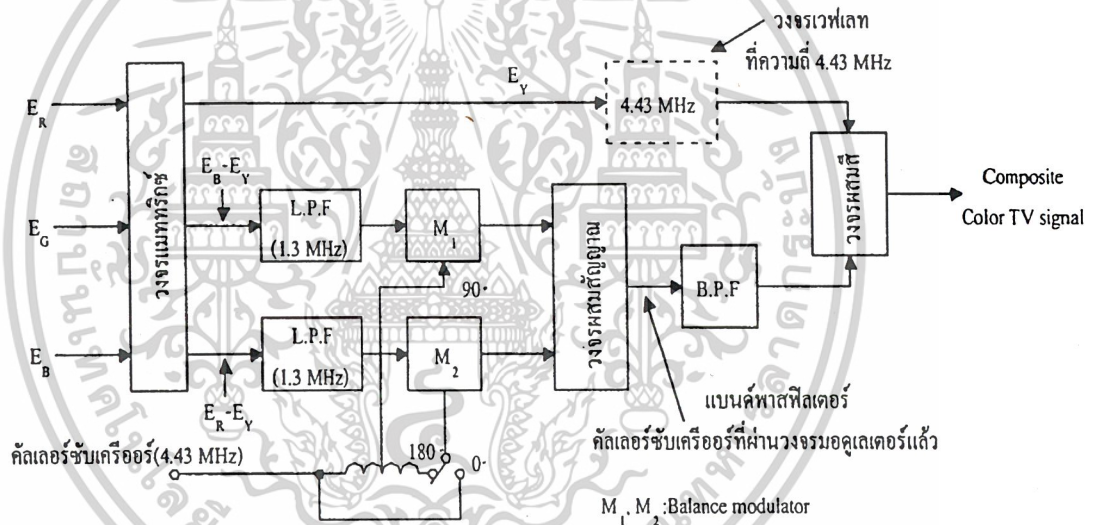
$$R-Y = 0.70R - 0.59G - 0.11B$$

$$B-Y = 0.89B - 0.59G - 0.3R$$

ส่วนสัญญาณสีเขียวเราจะไม่ส่งออกอากาศโดยตรง แต่จะฝากรวมไปกับสัญญาณความต่างสีทั้งสอง โดยอยู่ในรูปของสัญญาณ Y เนื่องจากแม่สีทั้งสามประกอบกันอยู่ด้วยอัตราส่วน

$$Y = 0.30R + 0.59G + 0.11B$$

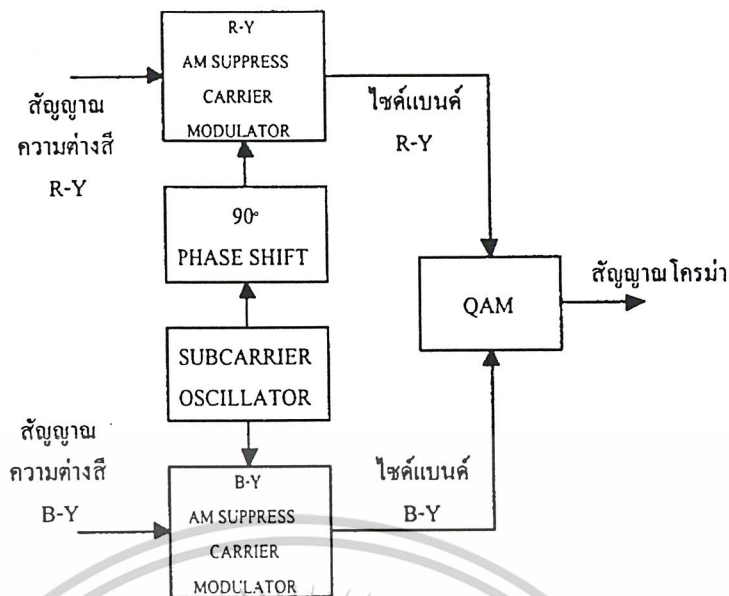
จะเห็นว่าอัตราส่วนที่เป็นสีเขียวจะมากที่สุด ซึ่งจะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่า ถ้าต้องการส่งสีเขียวออกไป ดังนั้นการส่งสีแดงและสีน้ำเงิน เพื่อนำมาทำการสร้างสัญญาณความต่างสีจะเหมาะสมกว่า ซึ่งสัญญาณสีเขียวจะสามารถสร้างคืนกลับมาได้ที่เครื่องรับโทรทัศน์สี ซึ่งวิธีการสร้างสัญญาณต่าง ๆ นั้นแสดงดังรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.43 การสร้างสัญญาณภาพสีรวม

ข้อกำหนดในการส่งสัญญาณโทรทัศน์สีมาตรฐาน PAL ได้กำหนดให้การรับส่งสัญญาณความเข้มสีที่ได้ปนออกไปกับสัญญาณความสว่างที่มีอยู่แล้ว โดยให้มอดูเลตแบบ DSB-SC ด้วย Subcarrier 4.43 MHz เพียงความถี่เดียวแต่สัญญาณความถี่มีอยู่ถึง 2 สัญญาณ ดังนั้นเพื่อให้สัญญาณความต่างสีทั้งสองสามารถส่งออกไปกับ Subcarrier ความถี่เดียวกันได้จึงใช้วิธีการผสมสัญญาณแบบ QAM (Quadrature Amplitude Modulation) โดยการทำให้ Shift Phase ของ Subcarrier ไป  $90^\circ$  แล้วใช้มอดูเลตกับสัญญาณ R-Y ส่วนของ B-Y ก็มอดูเลตกับ Subcarrier เฟสปกติ ดังนั้นสัญญาณ R-Y จะนำสัญญาณ B-Y อยู่  $90^\circ$  สัญญาณที่ได้จากการผสมแบบ QAM นี้เองเรียกว่า "สัญญาณโครมา"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.44 ลักษณะการสร้างสัญญาณโครมา

แนวคิดในการใช้ Subcarrier 4.43 MHz ก็คือว่า สัญญาณภาพของระบบ PAL นั้นมี Bandwidth ประมาณ 5 MHz ซึ่งเป็นสัญญาณภาพอยู่เต็มหมคแล้วนั้น จะทำอย่างไรจึงจะสอดแทรกส่วนที่สัญญาณสี (สัญญาณโครมา) เข้าไปโดยไม่รบกวนสัญญาณภาพที่มีอยู่เนื่องจากว่าสัญญาณภาพเป็นสัญญาณรายคาบที่มีฮาร์โมนิคต่างๆ ตลอดย่าน 5 MHz แต่ว่าความแรงของกลุ่มฮาร์โมนิคจะลดลงที่ปลายด้านความถี่สูงของสัญญาณภาพนี้เอง โดยต้องมี Bandwidth ของสัญญาณสีรวมแล้วต้องไม่ทำให้เลยความถี่ 5 MHz จึงเลือกใช้ความถี่ 4.43 MHz ในระบบ PAL เรียกวิธีการดังกล่าวนี้ว่า Frequency Interleaving สัญญาณที่แทรกลงไปมี Bandwidth ประมาณ 1MHz สำหรับวงจรที่ใช้ในการมอดูเลตสัญญาณความต่างสี R-Y และ B-Y ซึ่งเป็นแบบ DBS – SC อาจเลือกใช้วงจร Balance Modulator และ Ring Modulator

### 2.6.3 สัญญาณเบิสต์ (Burst Signal)

เป็นสัญญาณอ้างอิงในการควบคุมการสร้างความถี่ของวงจรทางเครื่องรับที่เรียกว่า Subcarrier ออสซิลเลเตอร์ (Subcarrier Oscillator Circuit) วงจรนี้จะต้องสร้าง Subcarrier ให้มีความถี่และเฟสตรงกับ Subcarrier ที่สร้างขึ้นทางเครื่องส่ง การตีเทคสัญญาณความต่างสีที่เป็นแบบ DBS-SC นั้นจะใช้วิธี “ซิงโครนัสตีเทคชั่น” (Synchronous Detection) สัญญาณเบิสต์จะเป็นตัวควบคุมให้ Subcarrier ออสซิลเลเตอร์ของเครื่องรับ สร้าง Subcarrier ออกมาให้มีความถี่และเฟสตรงกับ Subcarrier ทางด้านส่ง

### 2.6.4 วงจรเฟสล็อกกลุ๊ป

#### 1) แนะนำเฟสล็อกกลุ๊ป

เฟสล็อกกลุ๊ป (PLL) โดยแท้จริงแล้วมีพื้นฐานเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์เซอร์โวลู๊ป ประกอบด้วยตัว Phase Comparator Low Pass Filter และ Voltage Control Oscillator (VCO) เฟสล็อกกลุ๊ป จะควบคุมให้ VCO สร้างความถี่ขึ้นสอดคล้อง (Synchronize) กับสัญญาณเข้า แนวความคิดนี้มีมาก่อนปี 1930 และได้นำมาใช้อย่างกว้างขวางทั้งในเครื่องมือและอุปกรณ์สื่อสารทางอากาศ อย่างไรก็ตามเนื่องจากมันมีราคาแพง และการออกแบบระบบโดยใช้ชิ้นส่วนแยกประกอบ ดังนั้นการนำไปใช้งานจึงถูกจำกัดเฉพาะเมื่อเรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการความแม่นยำในการทำงานสูง ปราศจาก Noise และมี Bandwidth แคบมากๆ เท่านั้น โดยการพัฒนาทางด้านวงจรรวม(ไอซี) และเทคโนโลยีทางการผลิต(Process) สถานการณ์เหล่านี้จึงได้มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว ปัจจุบันนี้เฟสล็อกคูลูปจะปรากฏออกมาในรูปของวงจรรวม(ไอซี) ที่มีลักษณะเกี่ยวกับวงจรรอแอมป์ (Operation Amplifier) ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้มากมาย ซึ่งการทำงานและการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรวมเฟสล็อกคูลูป(PLL) และการนำ PLL ไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางทั้งในการประมวลสัญญาณแบบอนาลอกและดิจิทัล

ในการออกแบบวงจรเลือกความถี่ด้วยวงจรรวม(Frequency Selective Integrated Circuit) สิ่งที่เป็นปัญหาสำคัญ คือ การทำตัวอินคเตอร์ การแก้ปัญหานี้โดยการใช้แอกทีฟ RC ฟิเตอร์ ซึ่งเราใช้ตัวความต้านทานและตัวเก็บประจุต่อที่ส่วนป้อนกลับของภาคขยาย เพื่อทำให้เกิดการตอบสนองต่อการเลือกความถี่ เทคนิคในการออกแบบจำนวนมากใช้พัฒนาแอกทีฟ RC ฟิเตอร์ ฟิเตอร์ในวงจรรวมที่แอกทีฟ RC ฟิเตอร์มีข้อจำกัดอยู่ 3 ข้อคือ

1. ช่วงความถี่(Frequency Range) โดยมากฟิเตอร์แบบนี้จะใช้กับความถี่ต่ำกว่า 100 MHz จึงจะทำให้มีเสถียรภาพ

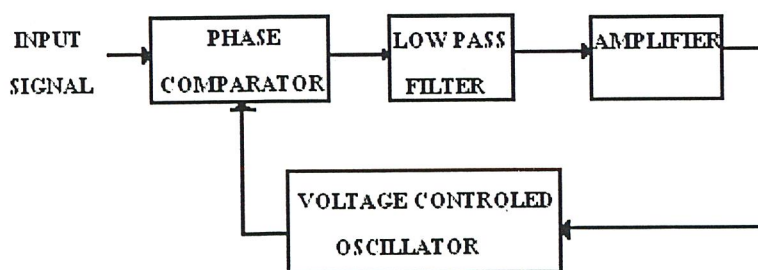
2. ความไว(Sensitivity) ความถี่ปานกลางมีผลอย่างมากต่อความไวแอกทีฟ Gain และค่าของส่วนประกอบทางป้อนกลับ

3. ราคา(Cost) ในแง่ของราคาและความยุ่งยากแล้ว การใช้ RC แอกทีฟฟิเตอร์ไม่เหมาะสมเพราะจะต้องใช้ RC ถึง 4 ตัวในการสร้าง Complex Pole 2 คู่อีกทั้ง RC ดังกล่าวไม่สามารถสร้างอยู่ในตัวไอซีได้ ต้องนำมาประกอบเพิ่มภายนอก ทำให้ราคาและความซับซ้อนมากขึ้น

เมื่อเวลาสามารถแก้ปัญหาทั้งสามข้อนี้ การสร้างวงจรรวมเฟสล็อกคูลูปก็จะมีราคาถูก และทำเป็นวงจรรวม Monolithic Packet ให้มีความสมบูรณ์อยู่ในตัวเอง เหมือนกับวงจรรวมออปแอมป์ แต่เท่าการทำงานพื้นฐานเบื้องต้นของเฟสล็อกคูลูปไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปเลย ซึ่งคุณสมบัติและการทำงานของ PLL จะได้อธิบายต่อไป ในปัจจุบันนี้ PLL หาได้ง่ายในลักษณะของวงจรรวม(ไอซี) ที่มีราคาถูกจึงเป็นการประหยัดที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานต่างๆ

2) หลักการทำงานเบื้องต้นของเฟสล็อกคูลูป

เฟสล็อกคูลูป คือ ระบบที่มีการป้อนความถี่กลับ ประกอบด้วย Phase Detector Low Pass Filter Error Amplifier ซึ่งอยู่ทางที่สัญญาณเดินไปหน้า และ Voltage Control Oscillator (VCO) อยู่ในทางป้อนกลับ แผนภาพของระบบเฟสล็อกคูลูปอย่างง่ายๆ แสดงได้ดังในรูปที่ 2.45



รูปที่ 2.45 บล็อกไดอะแกรมของเฟสล็อกคูลูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ระบบโดยทางคณิตศาสตร์นั้นจะไม่ขอล่าไว้ในที่นี้ แต่อย่างไรก็ตามหลักการทำงานเบื้องต้นของเฟสล็อกกลุ๊ป สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ขณะที่ยังไม่มีสัญญาณเข้าไปในระบบแรงดันควบคุม (Control Voltage)  $V_d(t)$  จะเท่ากับศูนย์ VCO จะทำงานโดยการตั้งความถี่ไว้ที่  $f_0$  ซึ่งเรียกว่า Free-Running Frequency ถ้าสัญญาณเข้าไปใน Phase Comparator จะทำการเปรียบเทียบเฟส และความถี่ของสัญญาณอินพุตกับ VCO และผลิตแรงดันคลาดเคลื่อน  $V_e(t)$  ซึ่งสัมพันธ์กับความแตกต่างของเฟส และความถี่ระหว่างสัญญาณทั้งสอง แรงดันคลาดเคลื่อนนี้จะถูกรองและขยายส่งไปควบคุม VCO ในการนี้แรงดันควบคุม  $V_d(t)$  จะไปบังคับความถี่ VCO ให้เปลี่ยนไปในทิศทางที่จะลดความถี่ที่แตกต่างกันระหว่าง  $f_0$  และสัญญาณที่เข้า ถ้าความถี่ของสัญญาณที่เข้าใกล้เคียงกับ  $f_0$  จากการทำงานของ PLL ทำให้ PLL ซิงโครไนซ์หรือล็อกกับสัญญาณที่เข้ามาขณะที่ทำการล็อกนั้น ความถี่ VCO จะเท่ากับสัญญาณอินพุต แต่เฟสยังต่างกันอยู่ ความแตกต่างเฟส  $\phi_0$  มีความจำเป็นต่อการผลิตแรงดันคลาดเคลื่อนที่จะไปคอยปรับสัญญาณความถี่ VCO จากค่าเฟสรีนนิ่งให้เท่ากับความถี่ที่เข้ามา  $f_s$  ดังนั้น PLL จะยังคงรักษาสภาพการล็อกที่ระบบสามารถที่จะปรับตัวได้เองทำให้ PLL สามารถติดตามความถี่ที่เปลี่ยนของสัญญาณที่เข้าไปให้อยู่ในสภาพล็อก เช่นเดิม ช่วงของความถี่ซึ่ง PLL สามารถติดตามการล็อกสัญญาณที่เข้ามาเรียกว่า "Lock Range" ของระบบ ค่าของมันจะขึ้นอยู่กับแรงดันคลาดเคลื่อน โดยจะไม่ขึ้นอยู่กับ แบนด์เอด ของ ฟิเตอร์ และอัตราขยายลูปปิด ( $K_v$ ) ของระบบทั้งหมดโดยมีผลเกี่ยวข้องกับการเลือกเฟ้นของวงจร PLL และยิ่งช่วยเพิ่มความปลอดภัยเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนทางด้านสัญญาณนอกแบนด์ที่จะมารบกวนได้เป็นอย่างดีขบวนการแคปเจอร์ (Capture) เป็นขบวนการที่ยุ่งยากมาก และไม่สามารถที่จะวิเคราะห์โดยคณิตศาสตร์อย่างง่าย แต่อย่างไรก็ตาม การอธิบายเกี่ยวกับแคปเจอร์ อาจกล่าวได้ดังต่อไปนี้คือ ความถี่คือเฟสที่เปลี่ยนไปตามเวลา ความถี่และความคลาดเคลื่อนทางเฟสในลูป สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$2\pi\Delta f = d\phi_0/dt$$

เมื่อ  $\Delta f$  เป็นความถี่ระหว่างสัญญาณอินพุต และความถี่ VCO

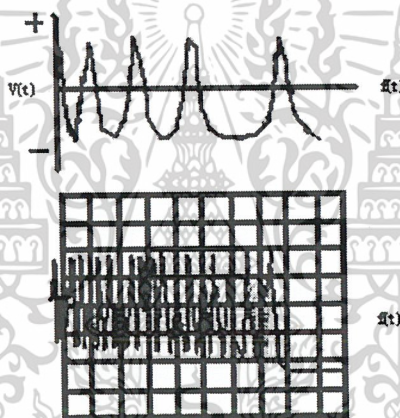
ถ้าเส้นทางที่ป้อนกลับของ PLL ถูกเปิดออก ระหว่างโลว์พาสฟิลเตอร์และอินพุตควบคุม VCO ดังนั้นจากความถี่ที่ตั้งไว้ของ  $f_0$  และ  $f_s$  จะทำให้สัญญาณที่ออกจาก Phase Comparator จะเป็น Sinusoidal Beat Note ที่ความถี่คงที่  $\Delta f$  ถ้า  $f_0$  และ  $f_s$  มีความถี่ที่ใกล้เคียงกับบีทโน้ตจะไปปรากฏที่ทางออกจากฟิลเตอร์ โดยไม่ถูกลดขนาดลง คราวนี้สมมติว่าทางป้อนกลับถูกปิดลงโดยการต่อ Low Pass Filter ไปยังขั้วควบคุม VCO ดังนั้นความถี่ VCO เคลื่อนเข้าใกล้  $f_s$  (นั่นคือการลด  $\Delta f$ ) ดังนั้น  $d\phi_0/dt$  ลดลงและสัญญาณที่ออกจาก Phase Comparator จะเปลี่ยนไปอย่างช้าๆ เป็นฟังก์ชันของเวลา ในทำนองเดียวกัน ถ้า VCO ถูกโมดูเลต ให้ออกจาก  $f_s$  ซึ่ง  $d\phi_0/dt$  จะเพิ่มขึ้นและแรงดันคลาดเคลื่อนจะเปลี่ยนไปอย่างรวดเร็วเป็นฟังก์ชันของเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ภายใต้เงื่อนไขลูกคลื่นบิตโน้ตจะไม่อยู่ในลักษณะลูกคลื่นไซน์ มักจะมองดูเป็นอนุกรมของคาบเวลา “Cuspa” ดังแสดงในรูปที่ 2.46(ก) เนื่องจากความไม่เท่ากันของลูกคลื่น บิตโน้ตและมีสัญญาณกระแสดังเป็นส่วนประกอบค่าเฉลี่ย(Average Value) ของมันจะไปควบคุมให้ VCO เพิ่มค่า  $f_0$  เพื่อที่จะลด  $\Delta f$  ในช่วงนี้ ความถี่บิตโน้ตจะลดลงอย่างรวดเร็วจนเป็นศูนย์ และจะเหลือเพียง DC Error Voltage คงที่

รูปที่ 2.46(ข) เป็นการแสดง Oscillogram ของรูป Error Voltage  $V_e(t)$  ในขณะที่ระบบ PLL กำลังทำงานระหว่างขบวนการ Capture สิ่งที่น่าสังเกตคือ ขณะที่ทำการล็อก  $\Delta f$  จะลดลงการลดขนาดของ Low Pass Filter จะน้อยและขนาดของบิตโน้ตจะเพิ่มขึ้น

เวลาที่ PLL ใช้ในการล็อก เรียกว่า “Pull In Time” พูลอินไทม์ จะขึ้นกับความถี่เริ่มแรกและความแตกต่างของเฟสระหว่างสองสัญญาณรวมทั้งอัตราขยายทั้งหมด(Overall Loop Gain) และช่วงกว้างของ Low Pass Filter พูลอินไทม์ อาจจะสั้นกว่าคาบเวลาของบิตโน้ต และรูปสามารถล็อกโดยปราศจาก Error Transient



รูปที่ 2.46 แสดงถึงการไม่เชิงโคโรนาของเออร์เรอร์บิตโน้ตในช่วงของขบวนการแคปเจอร์ การทำงานของลูปโลว์พาสฟิลเตอร์ มีหน้าที่ 2 อย่างคือ การลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เป็นความถี่สูงที่ออกจากเฟสคอมพาราเตอร์ โดยการใช้อัตราสมบัตินี้ การกำจัดสัญญาณรบกวน

มันทำหน้าที่เหมือนกับ Short-Term Memory สำหรับ PLL และจะแคปเจอร์กับสัญญาณใหม่อีกที เมื่อระบบหลุดออกจากการล็อกเนื่องจากสัญญาณรบกวนในช่วงทรานเซียนท์

เนื่องจาก Low Pass Filter ลดค่าแรงดันคลาดเคลื่อนของความถี่สูงระหว่างลูปมันเป็นตัวควบคุมการแคปเจอร์โดยตรงและคุณสมบัติผลตอบสนองชั่วขณะของ PLL

การลดช่วงกว้างของฟิลเตอร์จะส่งผลไปยังการทำงานของระบบคือ

1. ขบวนการแคปเจอร์จะช้าลงและพูลอินไทม์จะเพิ่มขึ้น
2. ช่วงแคปเจอร์จะลดลง
3. คุณสมบัติทาง Interference - Rejection ของ PLL จะดีขึ้น เพราะว่าแรงดันคลาดเคลื่อนเนื่องจากความถี่ของสัญญาณรบกวนจะถูกลดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ผลตอบสนองชั่วขณะของ PLL ต่อการเปลี่ยนทันทีของสัญญาณเข้าในช่วงความถี่แคบเจอร์ จะอยู่ในลักษณะภายใต้การแดมป์ (Underdamped)

สำหรับผลอันสุดท้ายถูกนำมาใช้ในทางปฏิบัติด้วยการกำจัดความกว้างของ Low pass Filter และคุณสมบัติเกี่ยวกับ Roll-Off เนื่องจากเสถียรภาพซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

### 2.6.5 พารามิเตอร์ของระบบ

เมื่อ PLL อยู่ในช่วง Nonlinear Capture Transient จะปรากฏไม่นาน ดังนั้นภายใต้เงื่อนไขที่ลึกลับ เราถือว่า PLL เป็นระบบควบคุมเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.47 และสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิค Laplace Transform ในกรณีนี้เพื่อความสะดวกจะใช้เฟสที่คลาดเคลื่อนในรูป  $(\phi_s - \phi_o)$  เป็น ตัวแปรของระบบ ดังนั้นอัตราการขยายแต่ละเทอมที่สอดคล้องกับบล็อกสามารถกำหนดได้ดังนี้

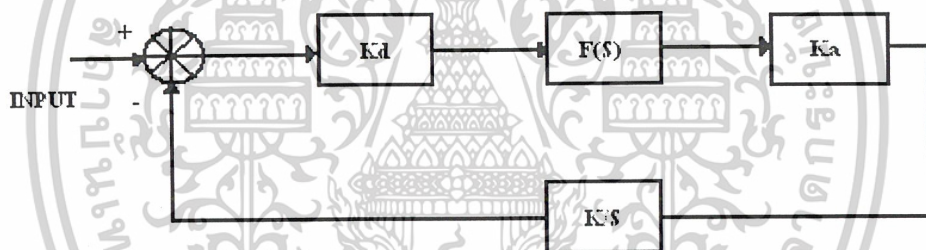
$K_d$  = อัตราขยายเฟสดีเทคเตอร์ (V/rad)

$F(S)$  = คุณสมบัติการทรานสเฟอร์

$K_a$  = อัตราขยายแรงดันของภาคขยาย

$K_o$  = อัตราขยาย VCO (rad/v.s)

ข้อสังเกตเนื่องจาก VCO เปลี่ยนแรงดันเป็นความถี่ และเฟสเป็นการอินทิเกรตของความถี่ VCO จะเป็นตัวอินทิเกรเตอร์ในส่วนของกร็อนกลับ



รูปที่ 2.47 โมเดลเชิงเส้น PLL ในลักษณะของระบบป้อนกลับ

ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันแบบลูเปิดสำหรับ PLL สามารถเขียนเป็น

$$T(S) = K_T F(S) / S$$

เมื่อ  $K_T$  เป็นอัตราขยายทั้งหมดของลูเปิด

นั่นคือ  $K_T = K_d K_a K_o$  การวิเคราะห์โดยเทคนิคของการป้อนกลับแบบเชิงเส้น ลักษณะของ ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันแบบลูปิด  $H(S)$  สามารถที่จะเขียนความสัมพันธ์กับลูเปิดได้คือ

$$H(S) = T(S) / (1+T(S))$$

และรากของ Characteristic System Polynomial สามารถหาได้โดยใช้เทคนิคของรูทโลกส์

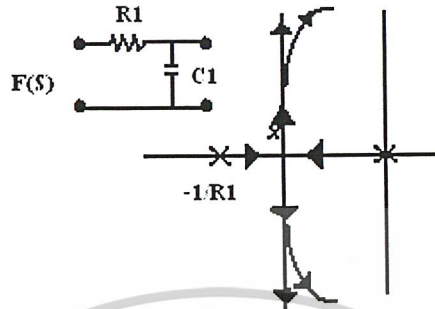
รูปที่ 2.48 แสดงรูทโลกส์ของ PLL เป็นฟังก์ชันของอัตราขยายทั้งหมด  $K_T$  สำหรับโพลเดียวของ

Low Pass Filter  $F(S)$  ซึ่งมีลักษณะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F(S) = 1 / (1 + t_1 S)$$

เมื่อ  $t_1 = R_1 C_1$  จากรูปโพลของลูเปิดอยู่ที่จุด origin เนื่องมาจากอินทิเกรตของ VCO



รูปที่ 2.48 รุทโลกัสของ PLL

จากคุณสมบัติของรุทโลกัส ทำให้เราสามารถตั้งข้อสังเกตได้ดังนี้

เมื่ออัตราขยาย  $K_1$  เพิ่มขึ้นด้วยการเลือก Imaginary Part ของโพลลูเปิดเพิ่มขึ้น ดังนั้นความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ของลูเปิดเพิ่มขึ้น และลูเปิดยังผลตอบสนองเป็น Underdamped มากขึ้น

ถ้า Filter Time Constant เพิ่มขึ้น Real Part ของลูเปิดจะยิ่งน้อยลง Loop Damping จะลดลง

ในทางปฏิบัติเกี่ยวกับระบบป้อนกลับใดๆ การเลื่อนโพลระหว่าง PLL สามารถทำให้ รุทโลกัสเบนไปทางขวาของ Half Plane การเกิดเช่นนี้เหมือนกับว่า Loop Gain หรือ Filter Time Constant มีค่ามากเกินไปทำให้ลูเปิดเกิดออสซิลเลต

ปัญหาเกี่ยวกับเสถียรภาพสามารถแก้ไขได้โดยการใช้ฟิลเตอร์แบบ Lag Lead ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.49 ฟิลเตอร์ชนิดนี้มีทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันดังนี้

$$F(S) = [1 + (t_1 + t_2)S]$$

โดยที่

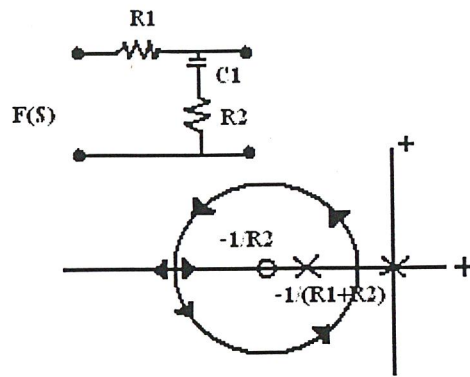
$$t_2 = R_2 C_1$$

$$t_1 = R_1 C_1$$

$$t_2 = R_2 C_1$$

$$t_1 = R_1 C_1$$

โดยการเลือก  $R_2$  ให้รุทโลกัสของฟิลเตอร์ชนิดนี้อยู่ ทางครึ่งซ้ายของระบบ เพื่อความแน่ใจในเรื่องเสถียรภาพ อย่างไรก็ตาม มันยังสามารถทำให้ระบบมีแถบความถี่ของสัญญาณรบกวนกว้างขึ้น และยังทำให้คุณสมบัติการกำจัดสัญญาณรบกวนลดลง เนื่องจากการลดทอนขนาดของความถี่สูงในลูเปิดจะลดน้อยลง



รูปที่ 2.49 รุทโลคัสของ PLL

สำหรับฟิลเตอร์แบบ lag lead ( $t_2 = R_2 C_1$  และ  $t_1 = R_1 C_1$ )

สำหรับความหมายของค่าตั้ง Basic Gain ของระบบช่วงการลือกของ PLL  $D \omega_1$  สามารถแสดงให้เห็นว่ามีค่าเท่ากับอัตราขยายกระแสตรงของลูป (DC Loop Gain)

$$D \omega_1 = 2 \rho D f_L = K_T$$

เนื่องจากช่วงแคปเจอร์  $\omega_L$  มีผลในช่วงทรานเซียนท์ ซึ่งเป็นไปตามการวิเคราะห์ของ Moschytz เราสามารถเขียนค่า Capture Range ได้โดยประมาณ

$$D \omega_L = 2 \rho D f_L = K_T |F(jD \omega_c)|$$

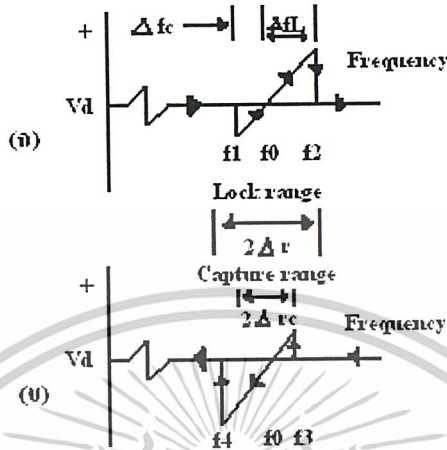
$F(jD \omega_c)$  เป็นการตอบสนองต่อขนาดของ Low pass Filter  $\omega = D \omega_c$  สิ่งที่น่าสังเกตคือ  $F(jD \omega_c)$  และ Capture Range ต่ำกว่า Lock Range เสมอ ถ้าเราใช้แบบ Lag อย่างง่ายที่แสดงดังรูปที่ 2.49 สมการ Capture Range สามารถเขียนได้เป็น

$$D \omega_c = D \omega_L / t_1 = K_1 / t_1$$

ดังนั้นช่วงการแคปเจอร์ลดลงเมื่อ Low Pass Filter Time Constant ลดลง แต่จะไม่มีผลสำหรับ Lock Range อัตราขยายลูปจะมีผลกับ Lock Range

รูปที่ 2.50 แสดงลักษณะการเปลี่ยนความถี่ไปเป็นแรงดัน (Frequency To Voltage Transfer Characteristic) ของระบบ PLL โดยการสมมติให้สัญญาณเข้าเป็น Sine Wave ที่เปลี่ยนความถี่ไปอย่างช้าๆ ขนาดตามแนวตั้งเป็นแรงดันคลาดเคลื่อน รูปที่ 2.50 (ก) ความถี่ของสัญญาณเข้าค่อยๆ เพิ่มขึ้น ลูปจะไม่มี การตอบสนองต่อสัญญาณเข้า จนกระทั่งความถี่ของสัญญาณเข้าถึง  $f_1$  ซึ่งเป็นความถี่ต่ำสุดของ capture range ดังนั้นลูปจะล็อกกับสัญญาณที่เข้าทันที ทำให้เกิดแรงดันคลาดเคลื่อน  $V_d$  มีค่าเป็นลบ และ  $V_d$  จะเปลี่ยนไปตามความถี่ด้วยลักษณะของ Slope เนื่องจากอัตราขยาย VCO  $(1/K_0)V_d$  จะมีค่าเท่ากับศูนย์

เมื่อ  $f_s = f_0$  ลูปจะติดตามสัญญาณเข้าจนกระทั่งถึงความถี่ซึ่งเป็นความถี่สูงสุดของ Lock Range PLL จะไม่มีการล็อก และแรงดันคลาดเคลื่อนจะเป็นศูนย์ ถ้าให้สัญญาณเข้ามีความถี่ค่อยๆลดกลับไปจะทำให้เกิดเป็น วัฏจักรขึ้น ดังแสดงในรูป 2.50(ข) สัญญาณจะเริ่มกลับเข้าสู่ Capture ของลูป ที่ความถี่  $f_3$  และการติดตามของลูปจะหมดไปเมื่อถึง  $f_4$  ความถี่  $f_3 - f_1$  เรียกว่า Total Lock Range นั่นคือ  $f_3 - f_1 = 2f_c$  และ  $f_3 - f_1 = 2f$



รูปที่ 2.50 แสดงถึง Transfer Characteristics ของความถี่กับ โวลต์เตจของ PLL

(ก)กรณีความถี่อินพุตเพิ่มขึ้น (ข) ความถี่อินพุตลดลง

ข้อสังเกต จากการที่แสดง Transfer Characteristic ในรูปที่ 2.45 ระบบ PLL จะเลือกความถี่ที่เป็นความถี่กึ่งกลาง โดยการตั้ง Free Running Frequency ที่ VCO และมันจะตอบสนองเฉพาะความถี่ของสัญญาณที่เข้าช่วงจาก  $F_0$  ไปจนถึงค่าที่น้อยกว่า  $f_c$  หรือ  $\pi$  ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ว่า ลูปเริ่มต้นด้วยการล็อกหรือเปล่า ในการใช้งานระบบ PLL โดยมากต้องการ VCO ที่ทำการแปลงแรงดันให้เป็นความถี่ที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นอย่างแท้จริง

### 2.6.6 การประยุกต์ใช้งานของเฟสล็อกลูป (PLL)

เฟสล็อกลูปใช้อย่างกว้างขวางใน Frequency Sensitive, Demodulation, Signal Conditioning หรือประยุกต์ใช้เป็น Frequency Synthesis ตัวอย่างเช่น การประยุกต์ใช้งานของเฟสล็อกลูปแบบ FM Demodulation แบ่งการใช้งานได้เป็น 3 อย่างดังนี้

- (a) Broadcast FM Detection
- (b) AM and FM Telemetry Decoding
- (c) FSK Demodulation

การทำงานของระบบ PLL แบบ FM Demodulation อธิบายได้ดังนี้คือ

ถ้า PLL Lock กับสัญญาณ Frequency Demodulation (FM) VCO จะติดตามความถี่ของสัญญาณที่เข้าทันที แรงดันคลาดเคลื่อนจากฟิลเตอร์  $V_d(t)$  เป็นตัวทำให้ VCO รักษาการล็อกกับสัญญาณเข้าให้สอดคล้องกับเอาท์พุทดีโมดูเลต ในกรณีนี้ลักษณะการแปลงแรงดันให้เป็นความถี่ของ VCO จะให้ดีโมดูเลตออกมามีลักษณะเป็นเชิงเส้น PLL สามารถใช้เป็นตัวดีเท็คสัญญาณ FM ที่มีช่วงความถี่กว้างหรือแทบได้ในลักษณะ

เป็นเชิงเส้นมากกว่าจะใช้ย่อย่างอื่นเป็นตัวตีเท็ค นั่นคือ สำหรับในกรณีของ FM PLL จะมีลักษณะเป็นระบบเครื่องรับแบบ Self-Contained เพราะมันประกอบด้วยฟังก์ชัน ของการเลือกความถี่และการ คีมอดูเลชั่น

เนื่องจาก PLL อยู่ในสภาวะล็อก ตอนช่วงขบวนการ FM Demodulation การตอบสนองความถี่ อย่างเช่น rise time ของสัญญาณจากการตีโมดูเลต สามารถทำนายได้จากการ Plot Root Locus ดังรูปที่ 2.48หรือ 2.49

ในกรณีของการส่งข้อมูลโดยใช้ Frequency Shift Keying (FSK) ข่าวสารที่อยู่ในรูปดิจิตอลจะ ถูกส่งโดยการสวิตซ์ซึ่ง ความถี่สัญญาณที่เข้าระหว่างอินไดอันหนึ่งในช่วงที่ไม่ต่อเนื่อง 2 ช่วงของความถี่ สัญญาณเข้า ซึ่งสอดคล้องกับค่าของทางลอจิก “หนึ่ง” และ “ศูนย์” เมื่อ PLL ล็อกกับสัญญาณเข้าที่เป็น FSK แรงดันคลาดเคลื่อน  $V_d(t)$  ซึ่งอยู่ในลักษณะ Discrete Voltage Step จะสอดคล้องกับสัญญาณออกที่ เป็น Demodulated Binary

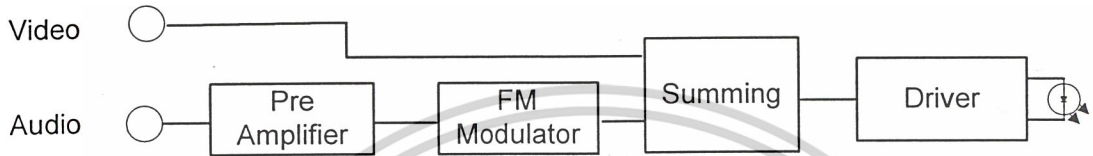


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

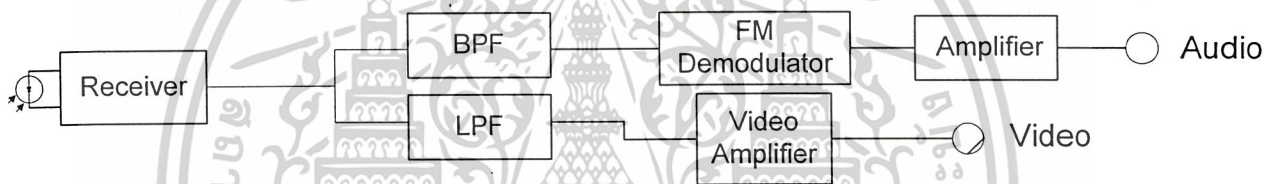
### บทที่ 3

#### การคำนวณและการสร้าง

ในการสร้างเครื่องรับส่งสัญญาณภาพและเสียงด้วยสัญญาณแสง นั้นเป็นอุปกรณ์ที่จะสามารถส่งสัญญาณภาพและเสียง โดยใช้สัญญาณแสงเป็นพาหะในการส่งสัญญาณ ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ เครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณด้วยแสง โดยสามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) ได้ ดังรูปที่ 3.1 และ รูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่ง

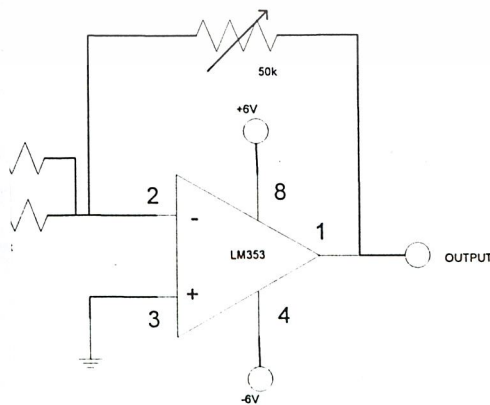


รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับ

#### 3.1 เครื่องส่ง

##### 3.1.1 วงจรพรีแอมป์ไฟเออร์ (Pre Amplifier)

วงจพรีแอมป์ไฟเออร์เป็นวงจรส่วนหน้าใช้ในการปรับสัญญาณเสียงที่รับเข้ามา โดยทำการปรับสัญญาณให้มีขนาดที่พอเหมาะในการส่งต่อไปยังวงจรมอดูเลตทางความถี่ โดยในที่นี้ได้ใช้วงจรความถี่เป็น... เล็บเฟส เนื่องจากต้องการที่จะส่งสัญญาณเสียงทั้งซ้ายและขวาไป... แบบเป็นดังรูปที่ 3.3



3 แสดงวงจรพรีแอมป์ไฟเออร์

เป็น 2 ระยะ คือ  
ระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ทั้งสองเครื่องจากการ  
มดที่เป็นการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ทั้ง

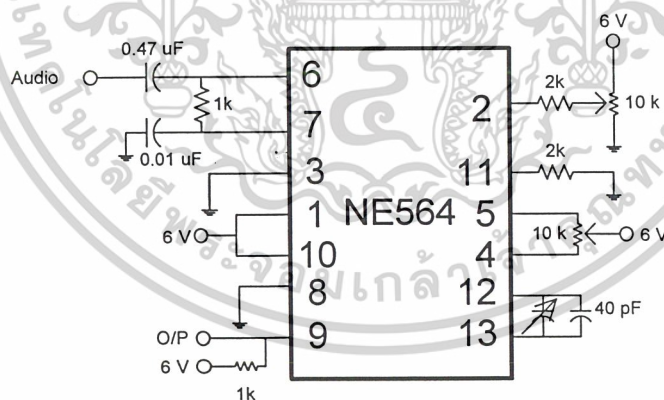
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนบุคคลโดยไม่มีอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
3 แถงวงจพรีแอมป์ไฟเออร์  
ทุกสิ่งทุกอย่างห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 วงจรมอดูเลตทางความถี่ (Frequency Modulator)

เนื่องจากสัญญาณเสียงนั้นเป็นสัญญาณที่มีความถี่ต่ำ (ประมาณ 20 Hz – 15 kHz) ซึ่งมีความถี่อยู่ในช่วงสัญญาณภาพ จึงไม่สามารถนำมารวมกันได้โดยตรง เพราะจะทำให้เกิดความผิดเพี้ยน (Distortion) ของสัญญาณ ดังนั้นจึงต้องนำสัญญาณเสียงไปทำการมอดูเลตกับสัญญาณพาหะที่มีความถี่ 10.7 MHz โดยจะทำการมอดูเลตทางความถี่

ในโครงงานนี้ได้เลือกใช้ไอซีเบอร์ NE 564 (Phase - Locked Loop) เป็นวงจรมอดูเลตทางความถี่ซึ่งสามารถผลิตความถี่ได้สูงถึง 50 MHz โดยทำการออกแบบให้ความถี่กลางอยู่ที่ 10.7 MHz ซึ่งวงจรนี้จะใช้คุณสมบัติของเฟสล็อกกลูปในการมอดูเลตทางความถี่ โดยทำการป้อนสัญญาณเสียงเข้าที่ลูปฟิลเตอร์ (Loop Filter) ของวงจรเปรียบเทียบเฟส (Phase Comparator) ภายในตัวไอซี เอาท์พุทที่ได้ป้อนเป็นอินพุทให้ VCO เพื่อให้มีความถี่เบี่ยงเบนไปจากความถี่กลาง (Free Running Frequency) โดยจะกำหนดความถี่เบี่ยงเบน ( $D f_{max}$ ) ไว้ที่ 150 kHz ( $\pm 75$  kHz)

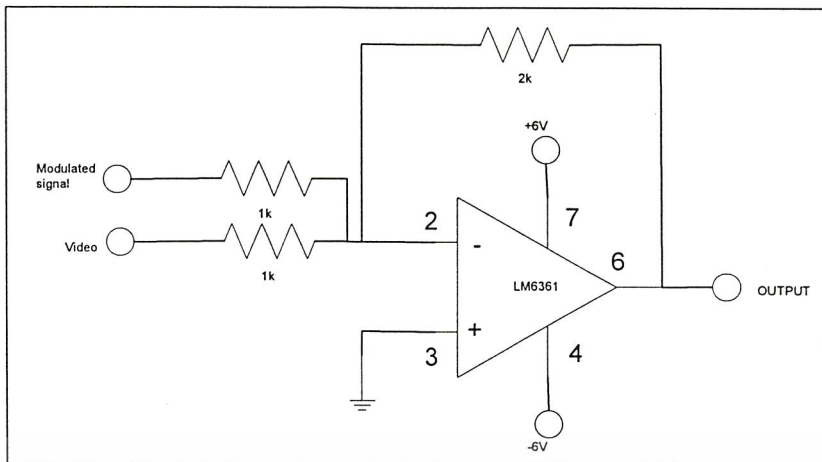
จากคู่มือของไอซีเบอร์ NE 564 จะต้องทำการกำหนดค่า C เพื่อกำหนดความถี่กลาง ( $f_0$ ) ความถี่ล็อก (Lock Range) ซึ่งในโครงงานนี้ต้องการมอดูเลตที่ความถี่กลาง 10.7 MHz ซึ่งจะได้ค่าของตัวเก็บประจุประมาณ 42.5 pF ซึ่งทำได้โดยการต่อตัวเก็บประจุค่าคงที่ที่ต่อร่วมกับตัวเก็บประจูปรับค่าได้ โดยต่อระหว่างขา 12 และ 13 ของไอซี ในส่วนของการกำหนดความถี่ล็อกนั้นใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 10 kHz ต่อร่วมกับตัวต้านทานคงที่ ขนาด 2 kHz เพื่อเป็นตัวปรับกระแสไปอัสซา 2 สัญญาณเสียงที่จะนำมามอดูเลตต่อเข้าที่ขา 4 ซึ่งเป็นลูปฟิลเตอร์ ของวงจรเปรียบเทียบเฟส และต่อตัวเก็บประจุขนาด 0.01 uF ลงกรานด์ เพื่อช่วยตัดสัญญาณรบกวนความถี่สูงทิ้ง วงจรที่ออกแบบได้แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.4 วงจรมอดูเลตทางความถี่ 10.7 MHz

### 3.1.3 วงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Summing Circuit)

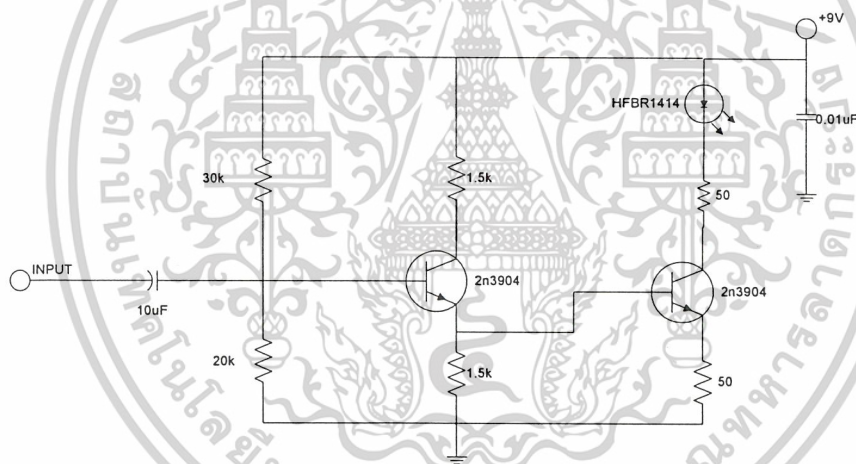
วงจรรวมสัญญาณนี้จะใช้รวมสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงที่ทำการมอดูเลตทางความถี่ 10.7 MHz เข้าด้วยกัน โดยใช้ไอซี LM6361 ออกแบบเป็นวงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟสมีอัตราขยายเท่ากับ 3 เท่า วงจรที่ออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงวงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟส

### 3.1.4 วงจรขับสัญญาณแสง (Driver Circuit)

วงจรส่วนนี้เป็นส่วนทำหน้าที่ขับไดโอดเปล่งแสง (LED) โดยในที่นี้ใช้ไดโอดเปล่งแสงเบอร์ HFBR 1414 ซึ่งมีแบนด์วิดท์กว้าง โดยวงจรนี้ใช้ในการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสง เพื่อทำการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง ซึ่งวงจรที่ออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.6



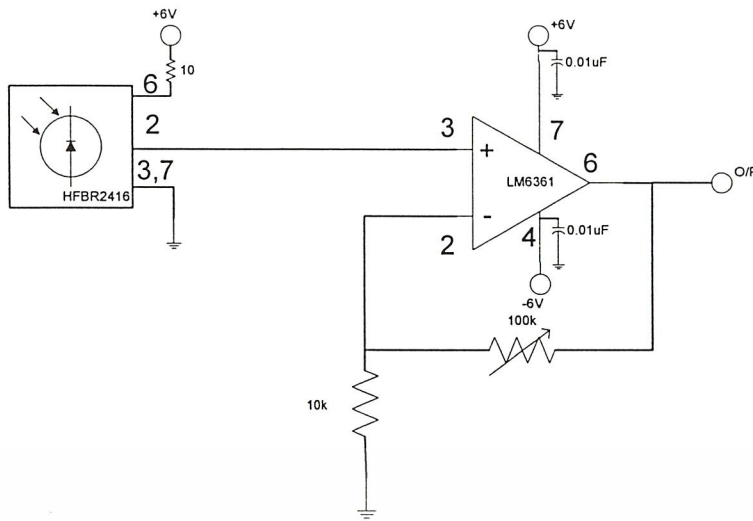
รูปที่ 3.6 วงจรขับสัญญาณแสง

## 3.2 เครื่องรับ

### 3.2.1 วงจรตรวจจับสัญญาณแสง (Photo Detector)

ในที่นี้โฟโต้ไดโอดจะวางอยู่ในตำแหน่งของสายอากาศ ซึ่งทำการเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วทำการป้อนให้กับวงจรขยาย 2 วงจรโดยถ้าแสงที่ตกลงบนโฟโต้ไดโอดเข้มขึ้นก็จะทำให้ค่าความต้านทานของโฟโต้ไดโอดมีค่าน้อยลง ทำให้ค่าอัตราขยายของวงจรขยายแรกนั้นเพิ่มขึ้น ส่วนวงจรสัญญาณวงจรหลังนั้นจะมีอัตราขยายอยู่ที่ 5 เท่า โดยวงจรนี้ใช้โฟโต้ไดโอดเบอร์ HFBR 2416 ซึ่งวงจรที่ออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แสดงวงจรตรวจจับสัญญาณแสง

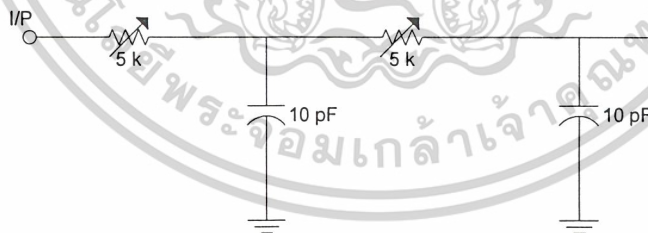
3.2.2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)

ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาสซีฟ (Passive Filter) ซึ่งใช้ในการกรองสัญญาณภาพ โดยกำหนดความถี่คัทออฟได้จากค่าตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ โดยกำหนดให้ตัวเก็บประจุมีค่าคงที่เท่ากับ 10 pF และให้ความถี่คัทออฟมีค่าเท่ากับ 5 MHz ซึ่งเป็นความถี่ของสัญญาณภาพ

$$R_f = \frac{1}{2\pi f_c C}$$

$$R_f = 3.18kw ; f_c = 10 pF$$

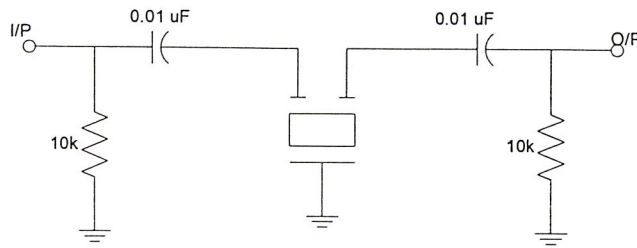
โดยในการปรับความถี่คัทออฟได้ใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 5 kHz ในการปรับจะได้วงจรดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

3.2.3 วงจรกรองย่านความถี่ผ่าน (Band Pass Filter)

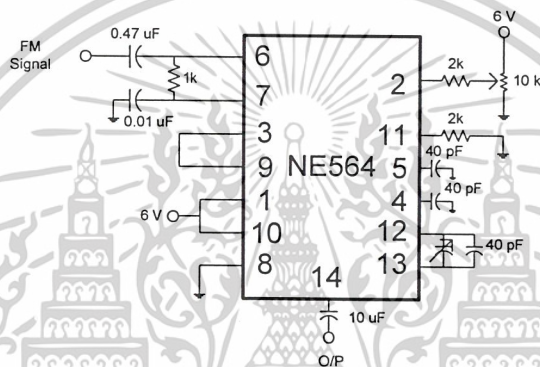
ในโครงงานนี้ออกแบบโดยใช้เซรามิกฟิลเตอร์ (Ceramic Filter) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็น Resonator ที่ยอมให้ความถี่เรโซแนนซ์ เท่านั้นที่ผ่านตัวมันไปได้ โดยออกแบบที่ความถี่ 10.7 MHz ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 วงจรกรวย่านความถี่ผ่าน 10.7 MHz

### 3.2.4 วงจรดีมอดูเลตทางความถี่ (FM Demodulator)

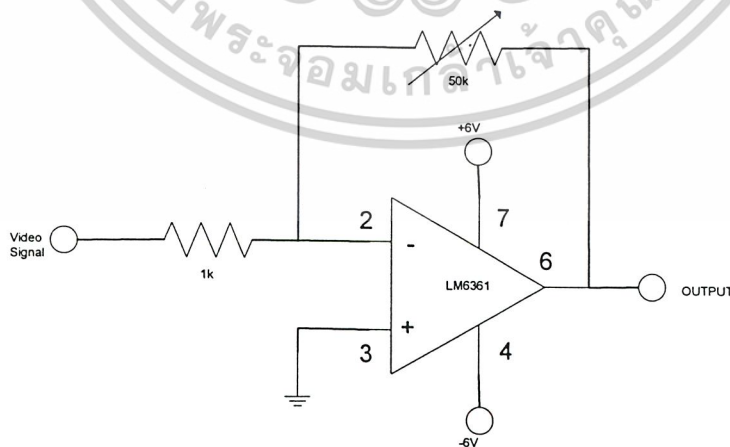
ในการดีมอดูเลตสัญญาณ FM ของเสียง ในโครงงานนี้ใช้วงจร Phase Locked Loop ออกแบบโดยใช้ไอซี NE 564 ซึ่งต่อคล้ายกับวงจรมอดูเลเตอร์สัญญาณเสียง แต่จะมีส่วนแตกต่างคือต่อขา 3 เข้ากับขา 9 และเอาท์พุทออกที่ขา 14 ซึ่งวงจรที่ออกแบบได้แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรดีมอดูเลตสัญญาณ FM

### 3.2.5 วงจรขยายสัญญาณวิดีโอ

เนื่องจากสัญญาณที่ได้รับมามีความถี่ต่ำซึ่งอาจทำให้สัญญาณภาพที่แสดงออกมาเกิดความผิดเพี้ยนจึงต้องทำการขยายสัญญาณเพื่อให้มีขนาดที่เหมาะสม โดยทำการออกแบบวงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) โดยมีอัตราขยายสูงสุด 50 เท่าแสดงดังรูปที่ 3.11

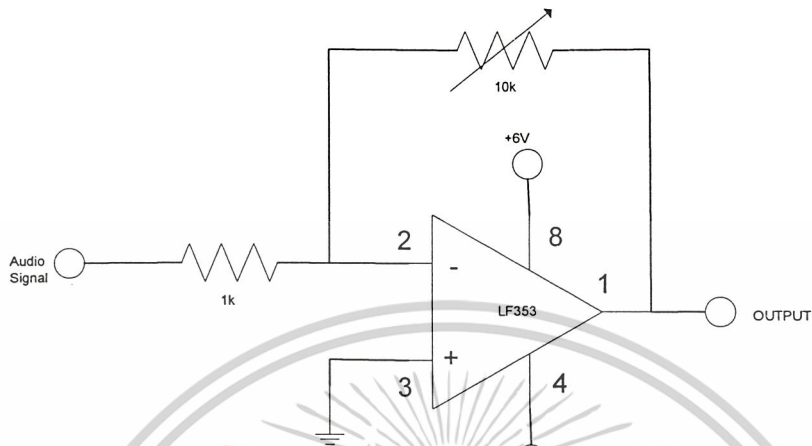


รูปที่ 3.11 วงจรขยายสัญญาณภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

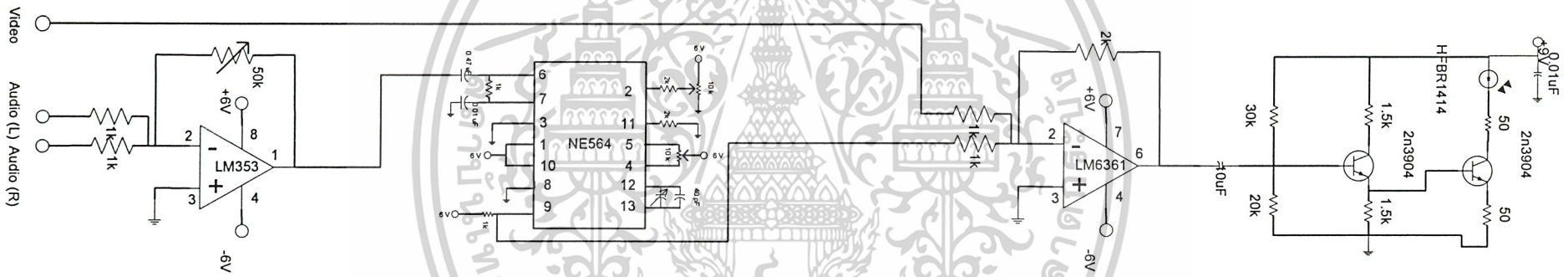
### 3.2.6 วงจรขยายสัญญาณเสียง (Audio Amplifier)

เนื่องจากสัญญาณที่ได้รับจากการตีมอคูเลตจะมีแรงดันต่ำ ดังนั้นจึงนำมาผ่านวงจรขยายสัญญาณเพื่อให้มีแรงดันอยู่ในระดับที่เหมาะสม โดยออกแบบเป็นวงจรขยายสัญญาณดังรูปที่ 3.12

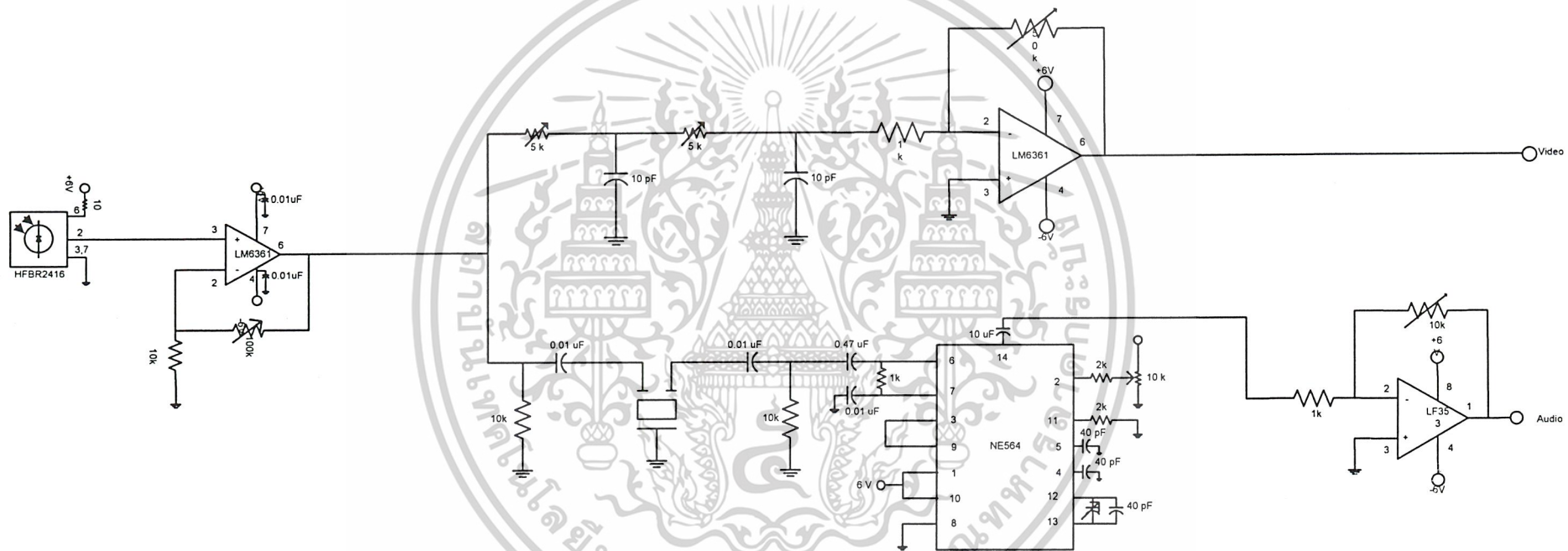


รูปที่ 3.12 วงจรขยายสัญญาณเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แสดงวงจรรวมของเครื่องส่ง



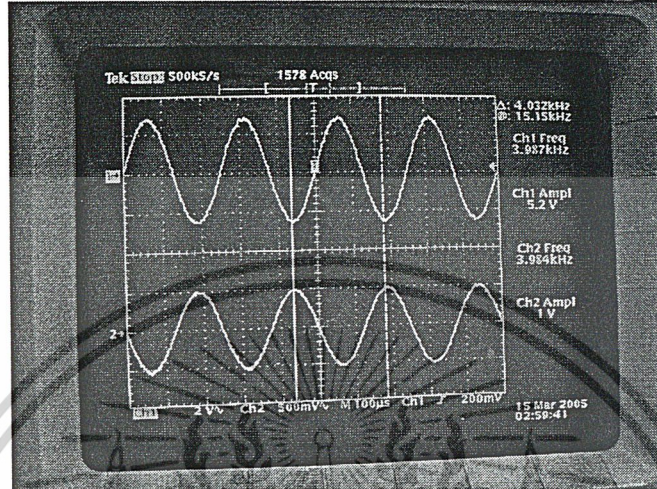
รูปที่ 3.14 แสดงวงจรรวมของเครื่องรับ

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

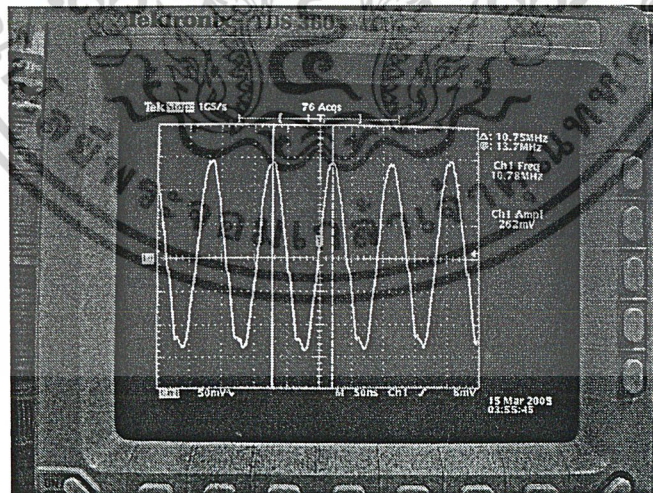
#### 4.1 วงจรพรีแอมป์ไฟเออร์ (Pre Amplifier)

ทำการป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 4 kHz แทนสัญญาณเสียงเข้าสู่วงจร



รูปที่ 4.1 แสดงสัญญาณสัญญาณเอาต์พุต (ch1) เทียบกับสัญญาณอินพุต (ch2) ของวงจรพรีแอมป์ไฟเออร์

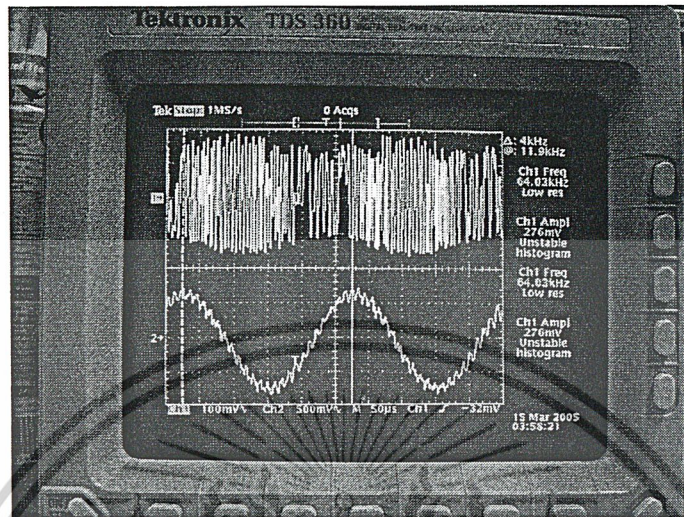
#### 4.2 วงจรมอดูเลเตอร์ ความถี่ (FM Modulator)



รูปที่ 4.2 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรมอดูเลเตอร์ที่มีความถี่คลื่นพาห์ 10.75 MHz เมื่อยังไม่ได้อินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

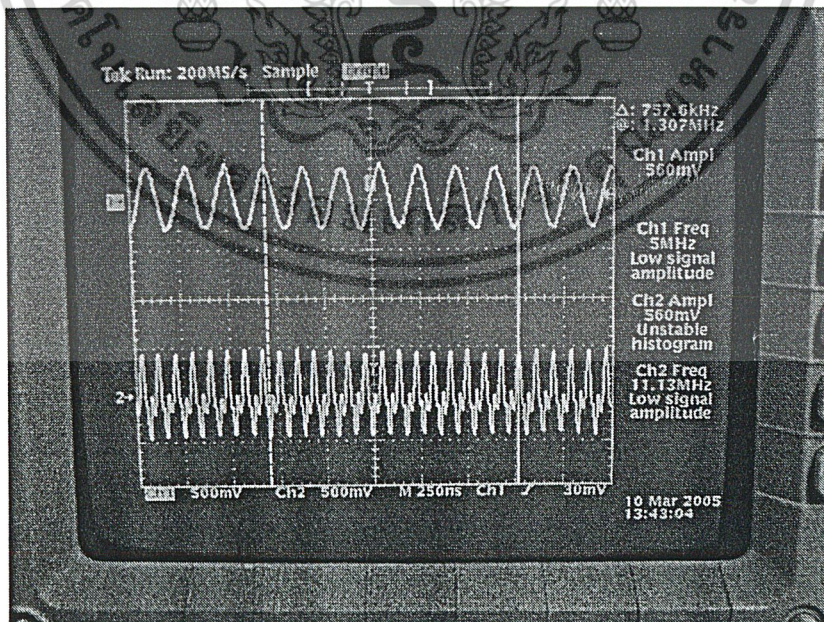
หลังจากนั้นทำการป้อนสัญญาณไซน์ 4 kHz เข้าไปยังวงจรมอดูเลเตอร์



รูปที่ 4.3 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรมอดูเลเตอร์(ch1) ที่มีความถี่สั้นพาหะ 10.75 MHz เมื่อป้อนอินพุตเป็นสัญญาณไซน์ 4 kHz (ch2)

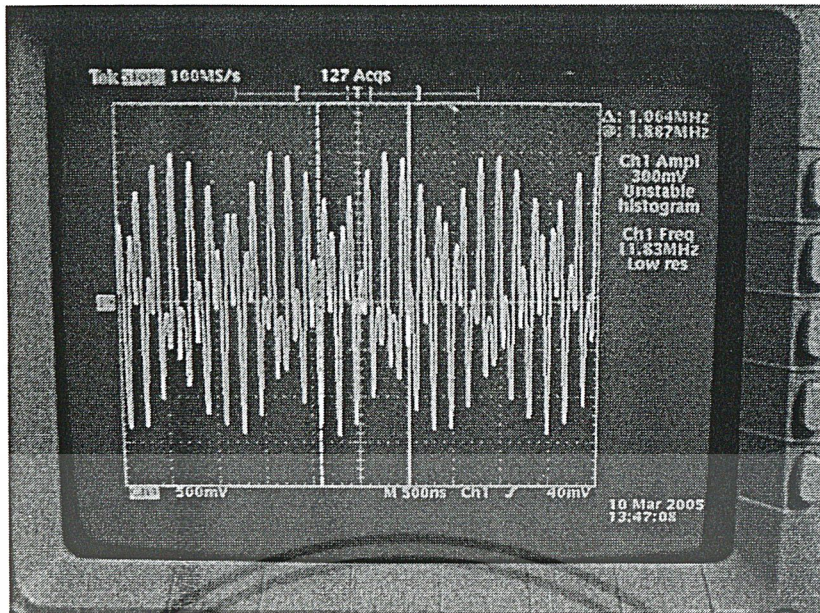
#### 4.3 วงจรรวมสัญญาณ (Summing Circuit)

ในการทดสอบวงจรรวมสัญญาณได้ทำการป้อนสัญญาณพาหะ 10.7 MHz แทนสัญญาณเสียงที่ถูกมอดูเลต และสัญญาณ ไซน์ 5 MHz เพื่อแทนสัญญาณภาพ



รูปที่ 4.4 แสดงสัญญาณอินพุตทั้งสองสัญญาณของวงจรรวมสัญญาณ

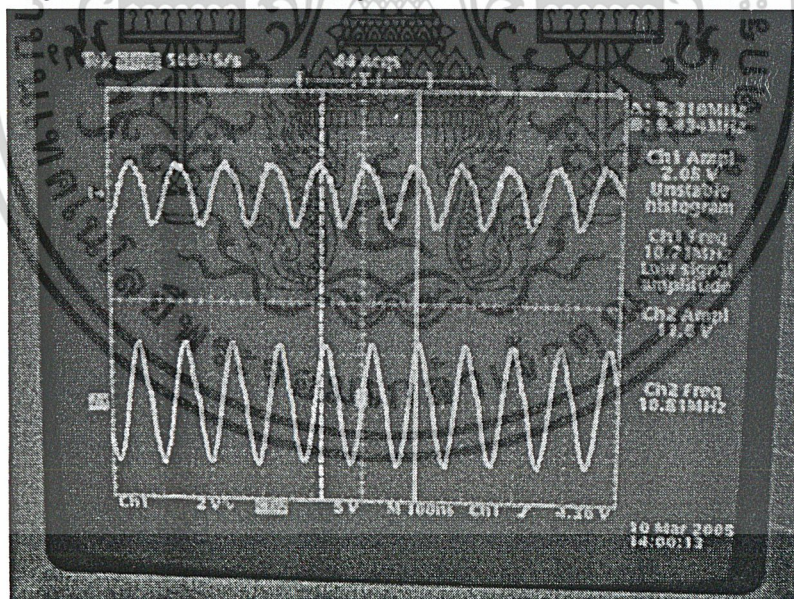
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรรวมสัญญาณ

#### 4.4 วงจรขับสัญญาณแสง (Driver Circuit)

ในการทดสอบได้ทำการป้อนสัญญาณรูปไซน์ความถี่ 10.7 MHz แทนสัญญาณรวมที่ออกจากวงจรรวมสัญญาณ เข้าสู่วงจร ผลการทดลองแสดงดังรูป

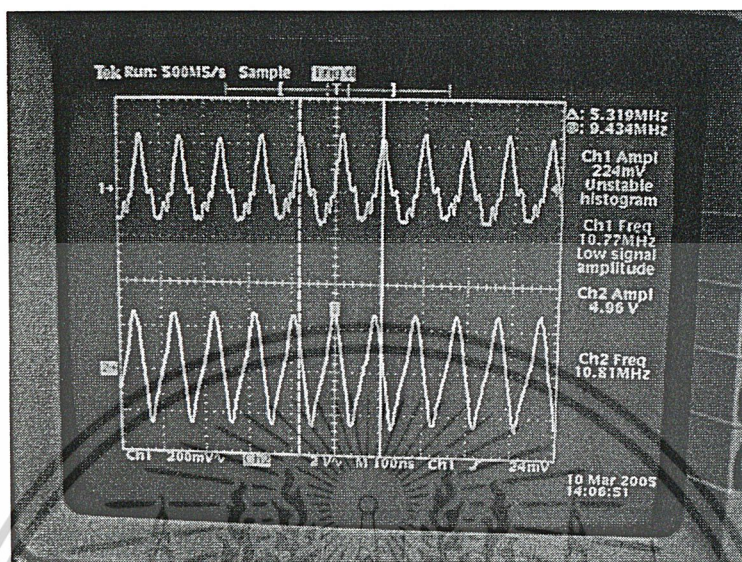


รูปที่ 4.6 แสดงสัญญาณอินพุต (ch2) เทียบกับเอาต์พุต (ch1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

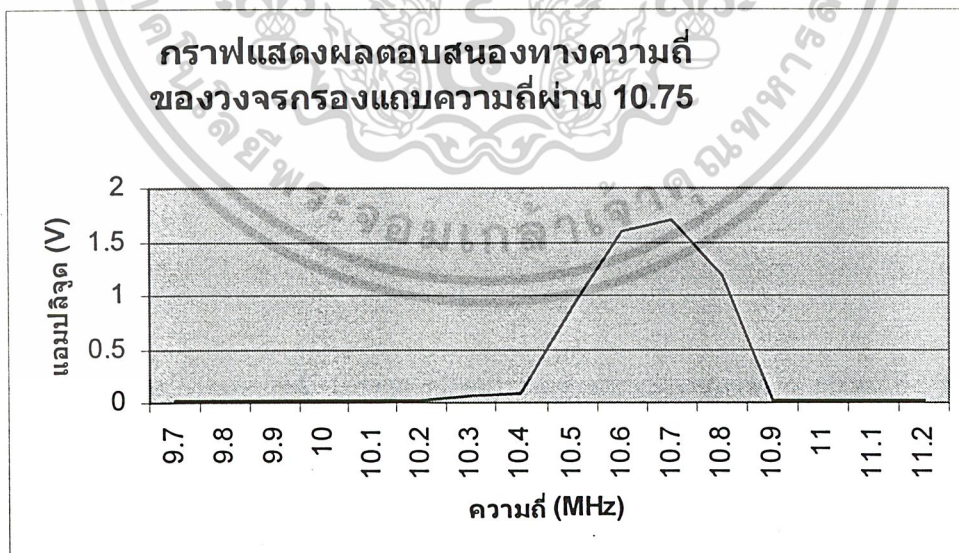
#### 4.5 วงจรตรวจจับสัญญาณแสง (Photo Detector)

ในการทดสอบได้ทำการป้อนสัญญาณเข้าสู่วงจรจับสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงมาทางฝั่งรับซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูป



รูปที่ 4.7 แสดงสัญญาณด้านฝั่งส่ง (ch2) เทียบกับเอาต์พุตของวงจร (ch1)

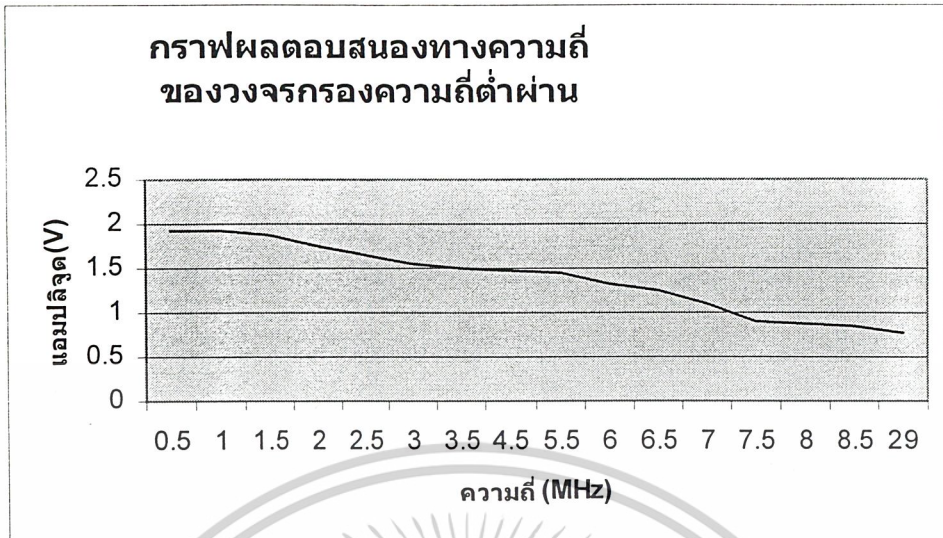
#### 4.6 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter)



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 10.75 MHz

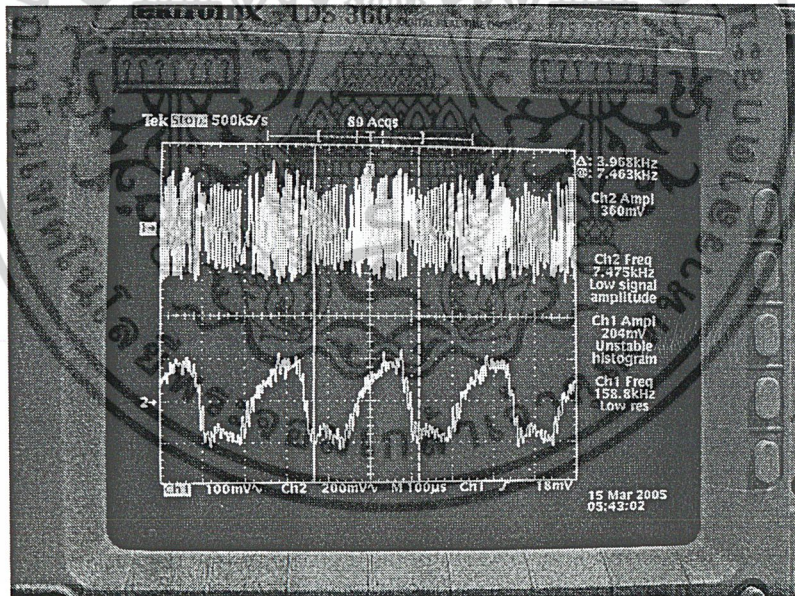
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)



รูปที่ 4.9 แสดงกราฟผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน 5.5 MHz

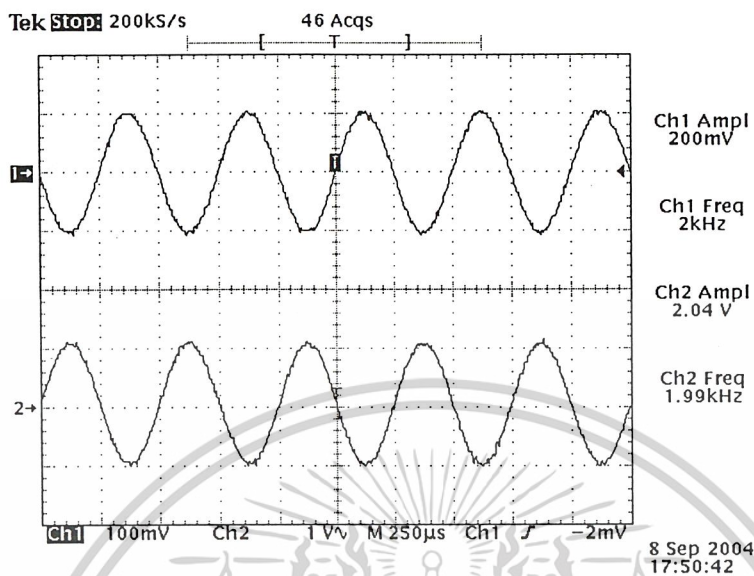
#### 4.8 วงจรดีมอดูเลตทางความถี่ (FM Demodulator)



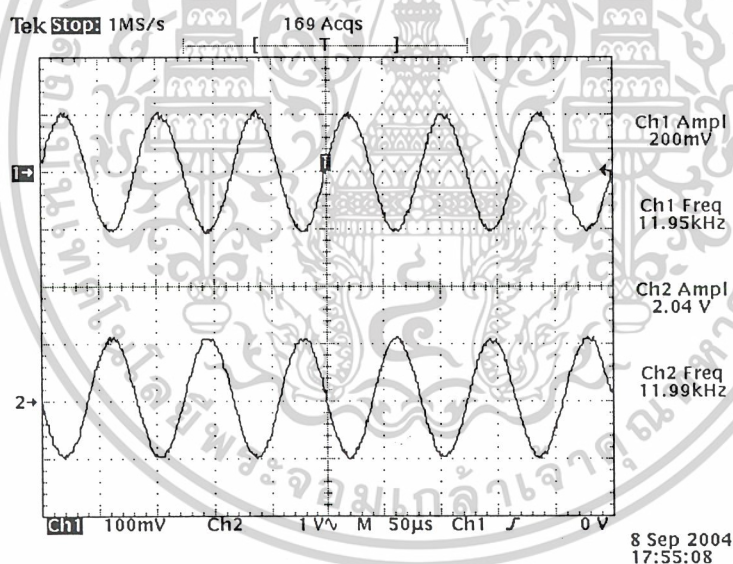
รูปที่ 4.10 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรดีมอดูเลเตอร์ (ch2) เทียบกับสัญญาณอินพุตของวงจร (ch1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.9 วงจรขยายสัญญาณเสียง (Audio Amplifier)



รูปที่ 4.11 แสดงสัญญาณเอาต์พุตเทียบกับสัญญาณป้อนเข้าที่ความถี่ 2 KHz



รูปที่ 4.12 แสดงสัญญาณเอาต์พุตเทียบกับสัญญาณป้อนเข้าที่ความถี่ 12 KHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### บทวิจารณ์และบทสรุป

โครงการนี้เป็น การส่งสัญญาณภาพและเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสงประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ขบวนการทางไฟฟ้า และขบวนการทางแสง ซึ่งเราจะต้องนำสัญญาณไฟฟ้ามาเปลี่ยนเป็นสัญญาณแสง เพื่อที่จะส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งทางภาคส่งจะประกอบไปด้วยสัญญาณภาพ 1 ช่อง และสัญญาณเสียง 1 ช่อง โดยการที่จะนำสัญญาณทั้งสองมาผ่านเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงพร้อมๆกันนั้น เราจะต้องทำการปรับให้แต่ละสัญญาณมีความเหมาะสมเพื่อที่จะทำให้สัญญาณทั้งสองสามารถรวมกันได้ โดยไม่กวนกันและกัน ทำให้ภาครับสามารถตรวจจับสัญญาณทั้งสองได้อย่างง่ายดายซึ่งในโครงการนี้ได้ ทำปรับแต่งสัญญาณเสียงโดยทำการมอดูเลตทางความถี่กับคลื่นพาหะ 10.7 MHz ก่อนที่จะนำไปรวมกับสัญญาณภาพด้วยวงจรรวมสัญญาณแล้วส่งผ่านออกไป โดยการที่เลือกความถี่พาหะที่ 10.7 MHz นั้น เพื่อที่จะสามารถสร้างวงจรกรองแถบความถี่ผ่านได้งานโดยใช้เซรามิกฟิลเตอร์ที่หาซื้อง่ายและราคา ย่อมเยา อีกทั้งยังความกว้างของแถบความถี่กว้างประมาณ 10 KHz ซึ่งทำให้เราได้สัญญาณที่ต้องการโดยมี สัญญาณรบกวนปะปนมาเพียงเล็กน้อย

โดยในขบวนการการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสง และ การเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้านั้น มีความจำเป็นที่จะต้องใช้ความระมัดระวังสูง เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้มีราคา ก่อนข้างสูง และจำเป็นที่จะต้องกำหนดค่าต่างๆให้เหมาะสมตามข้อมูลของอุปกรณ์ เช่นควรระมัดระวัง เรื่องการต่อขั้วบวกและลบของอุปกรณ์ โดยภาคส่งจะมีการต่อแบบให้แรงดันไฟตรง (Forward Bias) และที่ด้านรับจะมีการต่อแบบแรงดันไฟย้อนกลับ (Reverse Bias) การควบคุมกระแสเป็นสิ่งสำคัญ การเลือกใช้ กระแสในช่วงที่เป็นเชิงเส้นก็มีความจำเป็น ซึ่งถ้ากระแสมีค่าน้อยความเข้มของแสงก็จะลดน้อยตามมาด้วย และความผิดพลาด ในการต่อขั้วและกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์อาจทำให้อุปกรณ์เสียหายในทันที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Low Cost, Miniature Fiber Optic Components with ST®, SMA, SC and FC Ports

## Technical Data

### HFBR-0400 Series

#### Features

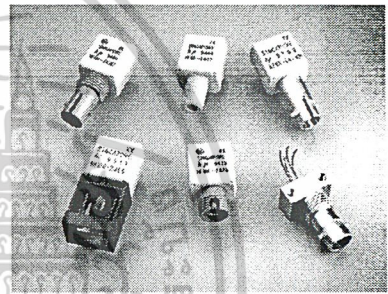
- Meets IEEE 802.3 Ethernet and 802.5 Token Ring Standards
- Low Cost Transmitters and Receivers
- Choice of ST®, SMA, SC or FC Ports
- 820 nm Wavelength Technology
- Signal Rates up to 175 Megabaud
- Link Distances up to 4 km
- Specified with 50/125  $\mu\text{m}$ , 62.5/125  $\mu\text{m}$ , 100/140  $\mu\text{m}$ , and 200  $\mu\text{m}$  HCS® Fiber
- Repeatable ST Connections within 0.2 dB Typical
- Unique Optical Port Design for Efficient Coupling
- Auto-Insertable and Wave Solderable
- No Board Mounting Hardware Required
- Wide Operating Temperature Range -40°C to 85°C
- AlGaAs Emitters 100% Burn-In Ensures High Reliability
- Conductive Port Option with the SMA and ST Threaded Port Styles

#### Applications

- Local Area Networks
- Computer to Peripheral Links
- Computer Monitor Links
- Digital Cross Connect Links
- Central Office Switch/PBX Links
- Video Links
- Modems and Multiplexers
- Suitable for Tempest Systems
- Industrial Control Links

#### Description

The HFBR-0400 Series of components is designed to provide cost effective, high performance fiber optic communication links for information systems and industrial applications with link distances of up to 4 kilometers. With the HFBR-24X6, the 125 MHz analog receiver, data rates of up to 175 megabaud are attainable.



Transmitters and receivers are directly compatible with popular "industry-standard" connectors: ST, SMA, SC and FC. They are completely specified with multiple fiber sizes; including 50/125  $\mu\text{m}$ , 62.5/125  $\mu\text{m}$ , 100/140  $\mu\text{m}$ , and 200  $\mu\text{m}$ .

Complete evaluation kits are available for ST and SMA product offerings; including transmitter, receiver, connected cable, and technical literature. In addition, ST and SMA connected cables are available for evaluation.

ST® is a registered trademark of AT&T.

HCS® is a registered trademark of the SpecTran Corporation.

## HFBR-0400 Series Part Number Guide

HFBR X4XXaa

1 = Transmitter  
2 = Receiver

4 = 820 nm Transmitter and Receiver Products

0 = SMA, Housed

1 = ST, Housed

2 = FC, Housed

E = SC, Housed

3 = SMA Port, 90 deg. Bent Leads

4 = ST Port, 90 deg. Bent Leads

5 = SMA Port, Straight Leads

6 = ST Port, Straight Leads

Option T (Threaded Port Option)

Option C (Conductive Port Receiver Option)

Option M (Metal Port Option)

Option K (Kinked Lead Option)

TA = Square pinout/straight lead

TB = Square pinout/bent leads

HA = Diamond pinout/straight leads

HB = Diamond pinout/bent leads

2 = Tx, Standard Power

4 = Tx, High Power

2 = Rx, 5 MBd, TTL Output

6 = Rx, 125 MHz, Analog Output

## LINK SELECTION GUIDE

Data Rate (MBd)	Distance (m)	Transmitter	Receiver	Fiber Size (µm)	Evaluation Kit
5	1500	HFBR-14X2	HFBR-24X2	200 HCS	N/A
5	2000	HFBR-14X4	HFBR-24X2	62.5/125	HFBR-04X0
20	2700	HFBR-14X4	HFBR-24X6	62.5/125	HFBR-0414, HFBR-0463
32	2200	HFBR-14X4	HFBR-24X6	62.5/125	HFBR-0414
55	1400	HFBR-14X4	HFBR-24X6	62.5/125	HFBR-0414
125	700	HFBR-14X4	HFBR-24X6	62.5/125	HFBR-0416
155	600	HFBR-14X4	HFBR-24X6	62.5/125	HFBR-0416
175	500	HFBR-14X4	HFBR-24X6	62.5/125	HFBR-0416

For additional information on specific links see the following individual link descriptions. Distances measured over temperature range from 0 to 70°C.

## Applications Support Guide

This section gives the designer information necessary to use the HFBR-0400 series components to

make a functional fiber-optic transceiver. HP offers a wide selection of evaluation kits for hands-on experience with fiber-optic products as well as a wide

range of application notes complete with circuit diagrams and board layouts. Furthermore, HP's application support group is always ready to assist with any design consideration.

## Application Literature

Title	Description
HFBR-0400 Series Reliability Data	Transmitter & Receiver Reliability Data
Application Bulletin 73	Low Cost Fiber Optic Transmitter & Receiver Interface Circuits
Application Bulletin 78	Low Cost Fiber Optic Links for Digital Applications up to 155 MBd
Application Note 1038	Complete Fiber Solutions for IEEE 802.3 FOIRL, 10Base-FB and 10 Base-FL
Application Note 1065	Complete Solutions for IEEE 802.5J Fiber-Optic Token Ring
Application Note 1073	HFBR-0319 Test Fixture for 1X9 Fiber Optic Transceivers
Application Note 1086	Optical Fiber Interconnections in Telecommunication Products

## HFBR-0400 Series Evaluation Kits

### HFBR-0410 ST Evaluation Kit

Contains the following :

- One HFBR-1412 transmitter
- One HFBR-2412 five megabaud TTL receiver
- Three meters of ST connected 62.5/125 (µm fiber optic cable with low cost plastic ferrules.
- Related literature

### HFBR-0414 ST Evaluation Kit

Includes additional components to interface to the transmitter and receiver as well as the PCB to reduce design time.

Contains the following:

- One HFBR-1414T transmitter
- One HFBR-2416T receiver
- Three meters of ST connected 62.5/125 µm fiber optic cable
- Printed circuit board
- ML-4622 CP Data Quantizer
- 74ACT11000N LED Driver
- LT1016CN8 Comparator
- 4.7 µH Inductor
- Related literature

### HFBR-0400 SMA Evaluation Kit

Contains the following :

- One HFBR-1402 transmitter
- One HFBR-2402 five megabaud TTL receiver
- Two meters of SMA connected 1000 µm plastic optical fiber
- Related literature

### HFBR-0416 Evaluation Kit

Contains the following:

- One fully assembled 1x9 transceiver board for 155 MBd evaluation including:
  - HFBR-1414 transmitter
  - HFBR-2416 receiver
  - circuitry
- Related literature

### HFBR-0463 Ethernet MAU Evaluation Kit

Contains the following:

- One fully assembled Media Attachment Unit (MAU) board which includes:
  - HFBR-1414 transmitter
  - HFBR-2416 receiver
  - HFBR-4663 IC
- Related literature

Note: Cable not included. Order HFBR-BXS010 separately (2 pieces)

## Package and Handling Information

### Package Information

All HFBR-0400 Series transmitters and receivers are housed in a low-cost, dual-inline package that is made of high strength, heat resistant, chemically resistant, and UL 94V-O flame retardant ULTEM® (plastic (UL File #E121562). The transmitters are easily identified by the light grey color connector port. The receivers are easily identified by the dark grey color connector port. (Black color for conductive port.) The package is designed for auto-insertion and wave soldering so it is ideal for

high volume production applications.

## Handling and Design Information

Each part comes with a protective port cap or plug covering the optics. These caps/plugs will vary by port style. When soldering, it is advisable to leave the protective cap on the unit to keep the optics clean. Good system performance requires clean port optics and cable ferrules to avoid obstructing the optical path. Clean compressed air often is sufficient to remove particles of dirt; methanol on a cotton swab also works well.

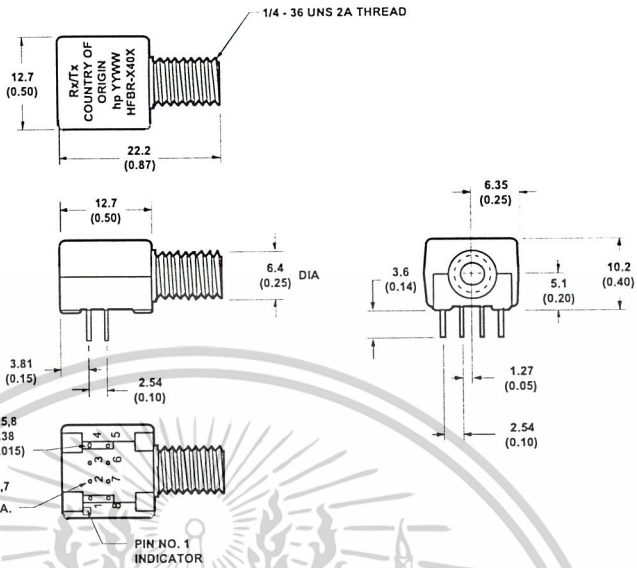
## Recommended Chemicals for Cleaning/Degreasing HFBR-0400 Products

Alcohols: methyl, isopropyl, isobutyl. Aliphatics: hexane, heptane, Other: soap solution, naphtha.

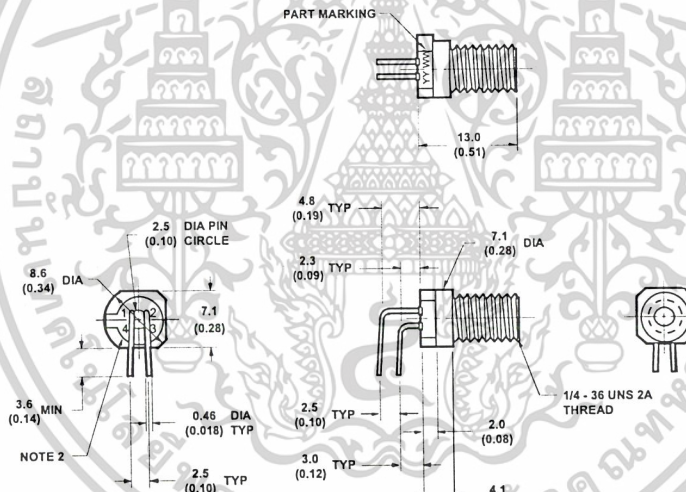
Do not use partially halogenated hydrocarbons such as 1,1,1 trichloroethane, ketones such as MEK, acetone, chloroform, ethyl acetate, methylene dichloride, phenol, methylene chloride, or N-methylpyrrolidone. Also, HP does not recommend the use of cleaners that use halogenated hydrocarbons because of their potential environmental harm.

Ultem® is a registered Trademark of the GE corporation.

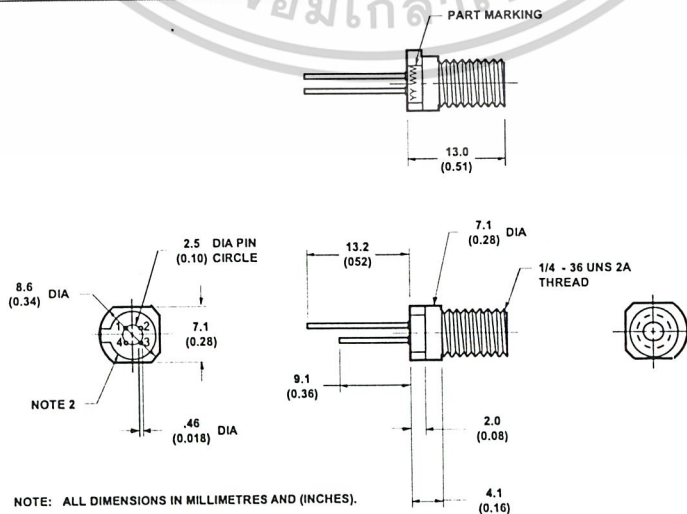
**Mechanical Dimensions**  
**HFBR-0400 SMA Series**  
**HFBR-X40X**



**HFBR-X43X**

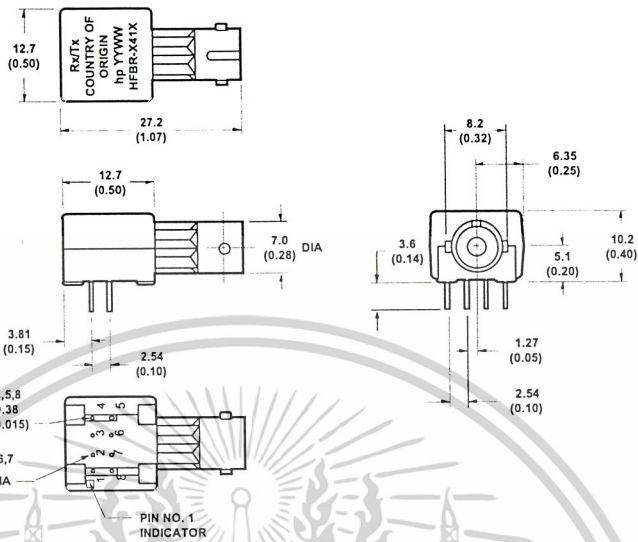


**HFBR-X45X**

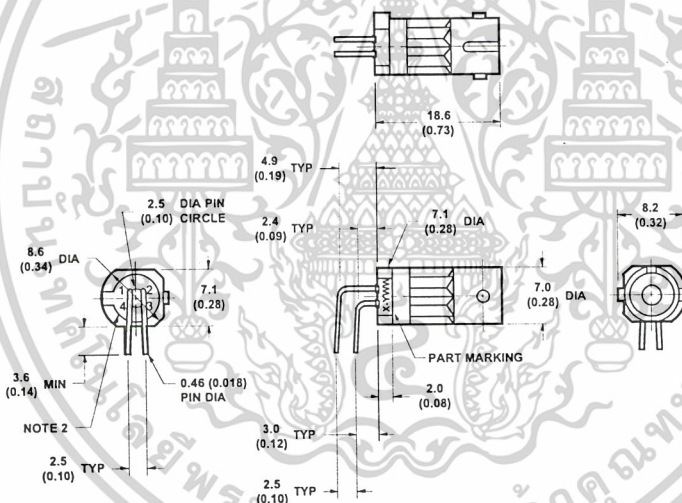


NOTE: ALL DIMENSIONS IN MILLIMETRES AND (INCHES).

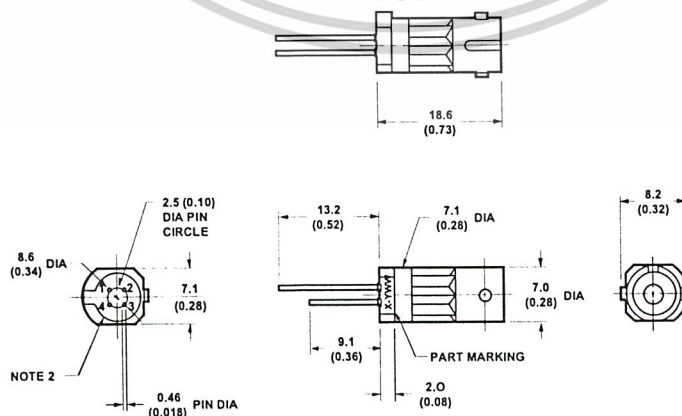
**Mechanical Dimensions**  
**HFBR-0400 ST Series**  
**HFBR-X41X**



**HFBR-X44X**



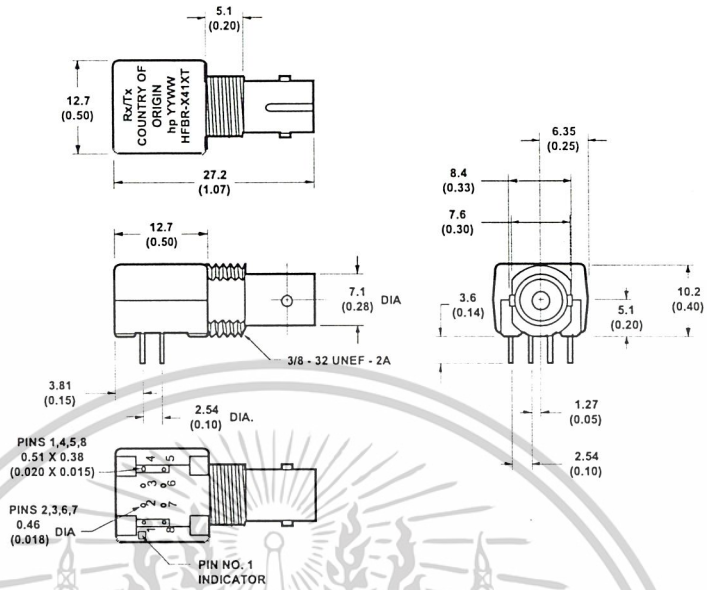
**HFBR-X46X**



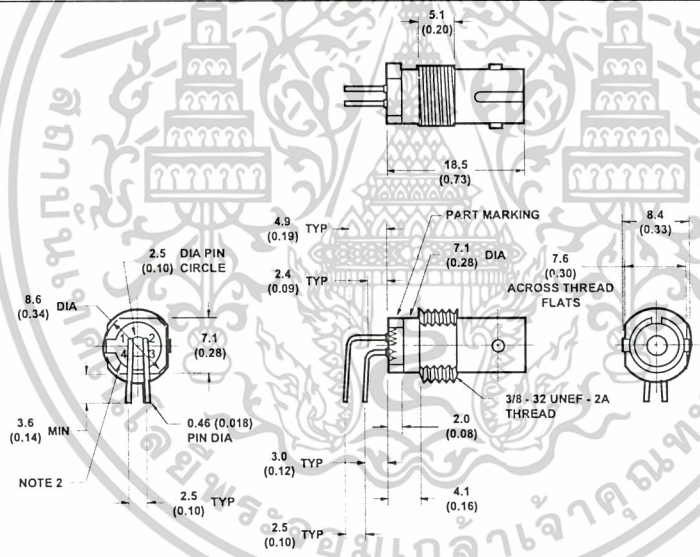
NOTE: ALL DIMENSIONS IN MILLIMETRES AND (INCHES).

**Mechanical Dimensions  
HFBR-0400T Threaded  
ST Series**

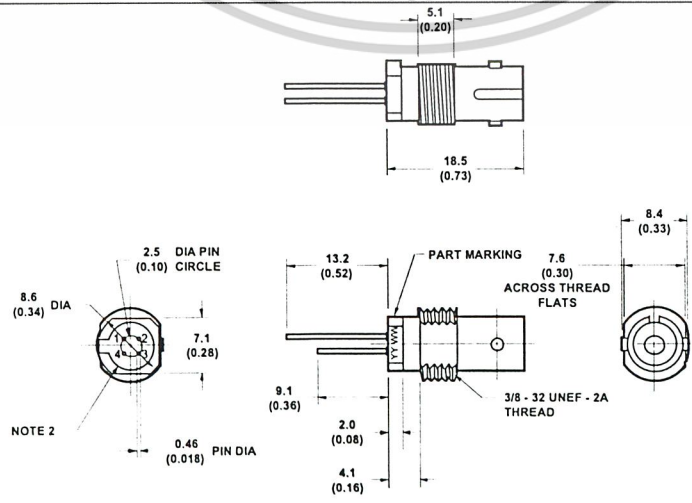
**HFBR-X41XT**



**HFBR-X44XT**

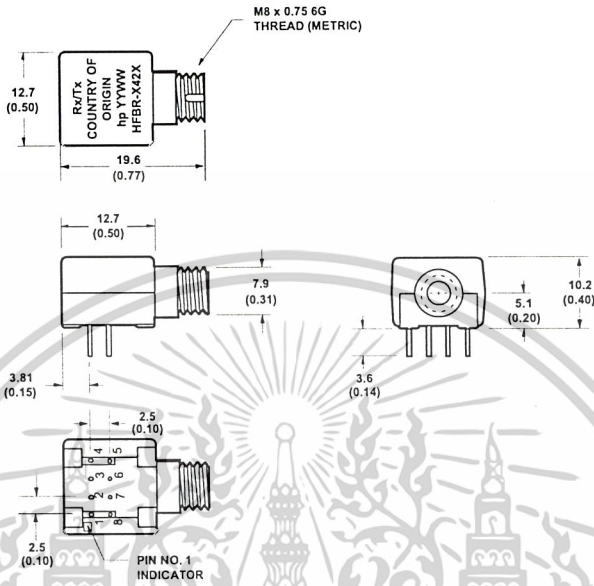


**HFBR-X46XT**



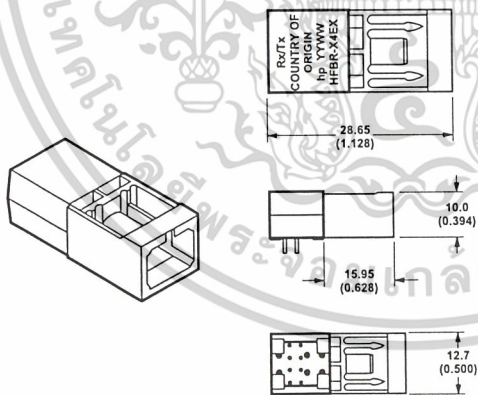
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Mechanical Dimensions  
HFBR-0400 FC Series**



**Mechanical Dimensions  
HFBR-0400 SC Series**

HFBR-X4EX



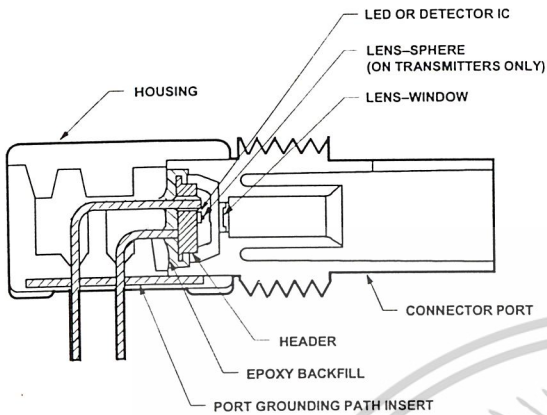
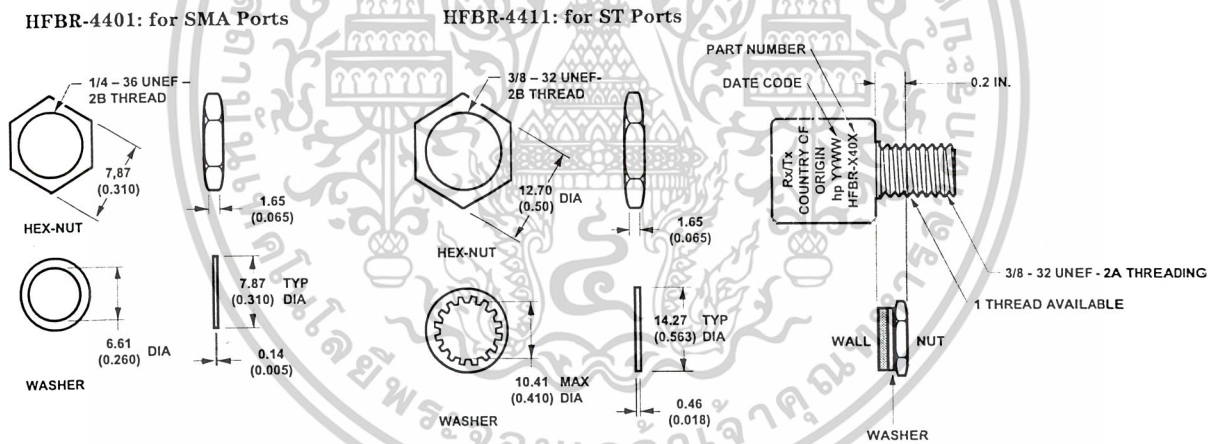


Figure 1. HFBR-0400 ST Series Cross-Sectional View.

## Panel Mount Hardware



(Each HFBR-4401 and HFBR-4411 kit consists of 100 nuts and 100 washers.)

## Port Cap Hardware

- HFBR-4402: 500 SMA Port Caps
- HFBR-4120: 500 ST Port Plugs (120 psi)
- HFBR-4412: 500 FC Port Caps
- HFBR-4417: 500 SC Port Plugs

## Options

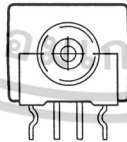
In addition to the various port styles available for the HFBR-0400 series products, there are also several extra options that can be ordered. To order an option, simply place the corresponding option number at the end of the part number. For instance, a metal-port option SMA receiver would be HFBR-2406M. You can add any number of options in series at the end of a part number. Please contact your local sales office for further information or browse HP's fiber optics home page at <http://www.hp.com/go/fiber>

### Option T (Threaded Port Option)

- Allows ST style port components to be panel mounted.
- Compatible with all current makes of ST multimode connectors
- Mechanical dimensions are compliant with MIL-STD-83522/13
- Maximum wall thickness when using nuts and washers from the HFBR-4411 hardware kit is 2.8 mm (0.11 inch)
- Available on all ST ports

### Option C (Conductive Port Receiver Option)

- Designed to withstand electrostatic discharge (ESD) of 25kV to the port
- Significantly reduces effect of electromagnetic interference (EMI) on receiver sensitivity



- Allows designer to separate the signal and conductive port grounds
- Recommended for use in noisy environments
- Available on SMA and threaded ST port style receivers only

### Option M (Metal Port Option)

- Nickel plated aluminum connector receptacle
- Designed to withstand electrostatic discharge (ESD) of 15kV to the port
- Significantly reduces effect of electromagnetic interference (EMI) on receiver sensitivity
- Allows designer to separate the signal and metal port grounds
- Recommended for use in very noisy environments
- Available on SMA, FC, ST, and threaded ST ports

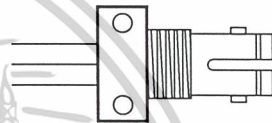
### Option K (Kinked Lead Option)

- Grounded outside 4 leads are "kinked"
- Allows components to stay anchored in the PCB during wave solder and aqueous wash processes

## Options TA, TB, HA, HB (Active Device Mount Options)

(These options are unrelated to the threaded port option T.)

- All metal, panel mountable package with a 3 or 4 pin receptacle end
- Available for HFBR-14X4, 24X2 and 24X6 components
- Choose from diamond or square pinout, straight or bent leads ADM Picture

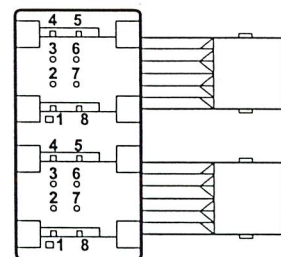


- TA = Square pinout/straight leads
- TB = Square pinout/bent leads
- HA = Diamond pinout/straight leads
- HB = Diamond pinout/bent leads

### Duplex Option

In addition to the standard options, some HFBR-0400 series products come in a duplex configuration with the transmitter on the left and the receiver on the right. This option was designed for ergonomic and efficient manufacturing. The following part numbers are available in the duplex option:

- HFBR-5414 (Duplex ST)
- HFBR-5414T (Duplex Threaded ST)
- HFBR-54E4 (Duplex SC)



# Typical Link Data

## HFBR-0400 Series

### Description

The following technical data is taken from 4 popular links using the HFBR-0400 series: the 5 MBd link, Ethernet 20 MBd link, Token Ring 32 MBd link, and the 155 MBd link. The data given

corresponds to transceiver solutions combining the HFBR-0400 series components and various recommended transceiver design circuits using off-the-shelf electrical components. This data is meant to be regarded as an

example of typical link performance for a given design and does not call out any link limitations. Please refer to the appropriate application note given for each link to obtain more information.

### 5 MBd Link (HFBR-14XX/24X2)

Link Performance -40°C to +85°C unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions	Reference
Optical Power Budget with 50/125 $\mu\text{m}$ fiber	OPB <sub>50</sub>	4.2	9.6		dB	HFBR-14X4/24X2 NA = 0.2	Note 1
Optical Power Budget with 62.5/125 $\mu\text{m}$ fiber	OPB <sub>62.5</sub>	8.0	15		dB	HFBR-14X4/24X2 NA = 0.27	Note 1
Optical Power Budget with 100/140 $\mu\text{m}$ fiber	OPB <sub>100</sub>	8.0	15		dB	HFBR-14X2/24X2 NA = 0.30	Note 1
Optical Power Budget with 200 $\mu\text{m}$ fiber	OPB <sub>200</sub>	12	20		dB	HFBR-14X2/24X2 NA = 0.37	Note 1
Date Rate Synchronous		dc		5	MBd		Note 2
Asynchronous		dc		2.5	MBd		Note 3, Fig. 7
Propagation Delay LOW to HIGH	t <sub>PLH</sub>		72		ns	T <sub>A</sub> = 25°C, P <sub>R</sub> = -21 dBm Peak  Fiber cable length = 1 m	Figs. 6, 7, 8
Propagation Delay HIGH to LOW	t <sub>PHL</sub>		46		ns		
System Pulse Width Distortion	t <sub>PLH</sub> -t <sub>PHL</sub>		26		ns		
Bit Error Rate	BER			10 <sup>-9</sup>		Data Rate <5 Bd P <sub>R</sub> > -24 dBm Peak	

#### Notes:

- OPB at T<sub>A</sub> = -40 to 85°C, V<sub>CC</sub> = 5.0 V dc, I<sub>F ON</sub> = 60 mA. P<sub>R</sub> = -24 dBm peak.
- Synchronous data rate limit is based on these assumptions: a) 50% duty factor modulation, e.g., Manchester I or BiPhase Manchester II; b) continuous data; c) PLL Phase Lock Loop demodulation; d) TTL threshold.
- Asynchronous data rate limit is based on these assumptions: a) NRZ data; b) arbitrary timing-no duty factor restriction; c) TTL threshold.

## 5 MBd Logic Link Design

If resistor  $R_1$  in Figure 2 is  $70.4 \Omega$ , a forward current  $I_F$  of  $48 \text{ mA}$  is applied to the HFBR-14X4 LED transmitter. With  $I_F = 48 \text{ mA}$  the HFBR-14X4/24X2 logic link is guaranteed to work with  $62.5/125 \mu\text{m}$  fiber optic cable over the entire range of 0 to 1750 meters at a data rate of dc to 5 MBd, with arbitrary data format and pulse width distortion typically less than 25%. By setting  $R_1 = 115 \Omega$ , the transmitter can be driven with  $I_F = 30 \text{ mA}$ , if it is desired to economize on power or achieve lower pulse distortion.

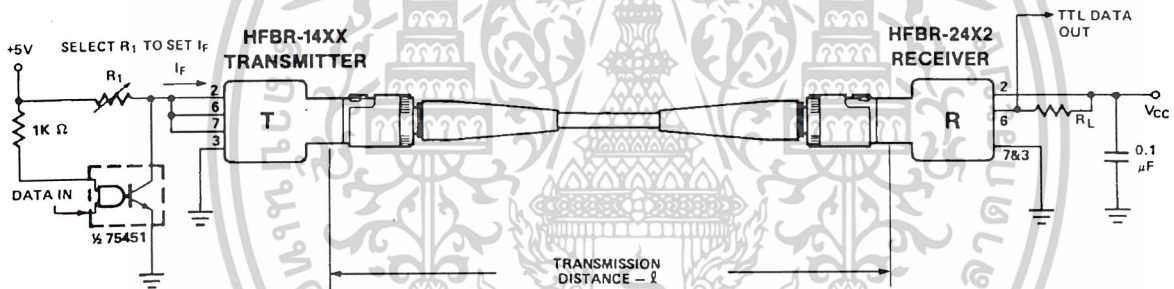
The following example will illustrate the technique for selecting the appropriate value of  $I_F$  and  $R_1$ .

Maximum distance required = 400 meters. From Figure 3 the drive current should be  $15 \text{ mA}$ . From the transmitter data  $V_F = 1.5 \text{ V (max.)}$  at  $I_F = 15 \text{ mA}$  as shown in Figure 9.

$$R_1 = \frac{V_{CC} - V_F}{I_F} = \frac{5 \text{ V} - 1.5 \text{ V}}{15 \text{ mA}}$$

$$R_1 = 233 \Omega$$

The curves in Figures 3, 4, and 5 are constructed assuming no in-line splice or any additional system loss. Should the link consist of any in-line splices, these curves can still be used to calculate link limits provided they are shifted by the additional system loss expressed in dB. For example, Figure 3 indicates that with  $48 \text{ mA}$  of transmitter drive current, a  $1.75 \text{ km}$  link distance is achievable with  $62.5/125 \mu\text{m}$  fiber which has a maximum attenuation of  $4 \text{ dB/km}$ . With  $2 \text{ dB}$  of additional system loss, a  $1.25 \text{ km}$  link distance is still achievable.



NOTE:  
IT IS ESSENTIAL THAT A BYPASS CAPACITOR ( $0.01 \mu\text{F}$  TO  $0.1 \mu\text{F}$  CERAMIC) BE CONNECTED FROM PIN 2 TO PIN 7 OF THE RECEIVER. TOTAL LEAD LENGTH BETWEEN BOTH ENDS OF THE CAPACITOR AND THE PINS SHOULD NOT EXCEED 20 mm.

Figure 2. Typical Circuit Configuration.



## Ethernet 20 MBd Link (HFBR-14X4/24X6)

(refer to Application Note 1038 for details)

### Typical Link Performance

Parameter	Symbol	Typ. <sup>[1,2]</sup>	Units	Conditions
Receiver Sensitivity		-34.4	dBm average	20 MBd D2D2 Hexadecimal Data 2 km 62.5/125 $\mu$ m fiber
Link Jitter		7.56	ns pk-pk	ECL Out Receiver
		7.03	ns pk-pk	TTL Out Receiver
Transmitter Jitter		0.763	ns pk-pk	20 MBd D2D2 Hexadecimal Data
Optical Power	P <sub>T</sub>	-15.2	dBm average	20 MBd D2D2 Hexadecimal Data Peak I <sub>F,ON</sub> = 60 mA
LED rise time	t <sub>r</sub>	1.30	ns	1 MHz Square Wave Input
LED fall time	t <sub>f</sub>	3.08	ns	
Mean difference	t <sub>r</sub> - t <sub>f</sub>	1.77	ns	
Bit Error Rate	BER	10 <sup>-10</sup>		
Output Eye Opening		36.7	ns	At AUI Receiver Output
Data Format 50% Duty Factor		20	MBd	

#### Notes:

1. Typical data at T<sub>A</sub> = 25°C, V<sub>CC</sub> = 5.0 V dc.
2. Typical performance of circuits shown in Figure 1 and Figure 3 of AN-1038 (see applications support section).

## Token Ring 32 MBd Link (HFBR-14X4/24X6)

(refer to Application Note 1065 for details)

### Typical Link Performance

Parameter	Symbol	Typ. <sup>[1,2]</sup>	Units	Conditions
Receiver Sensitivity		-34.1	dBm average	32 MBd D2D2 Hexadecimal Data 2 km 62.5/125 $\mu$ m fiber
Link Jitter		6.91	ns pk-pk	ECL Out Receiver
		5.52	ns pk-pk	TTL Out Receiver
Transmitter Jitter		0.823	ns pk-pk	32 MBd D2D2 Hexadecimal Data
Optical Power Logic Level "0"	P <sub>T ON</sub>	-12.2	dBm peak	Transmitter TTL in I <sub>F ON</sub> = 60 mA, I <sub>F OFF</sub> = 1 mA
Optical Power Logic Level "1"	P <sub>T OFF</sub>	-82.2		
LED Rise Time	t <sub>r</sub>	1.3	nsec	1 MHz Square Wave Input
LED Fall Time	t <sub>f</sub>	3.08	nsec	
Mean Difference	t <sub>r</sub> - t <sub>f</sub>	1.77	nsec	
Bit Error Rate	BER	10 <sup>-10</sup>		
Data Format 50% Duty Factor		32	MBd	

#### Notes:

1. Typical data at T<sub>A</sub> = 25°C, V<sub>CC</sub> = 5.0 V dc.
2. Typical performance of circuits shown in Figure 1 and Figure 3 of AN-1065 (see applications support section)

## 155 MBd Link (HFBR-14X4/24X6)

(refer to Application Bulletin 78 for details)

### Typical Link Performance

Parameter	Symbol	Typ. <sup>[1,2]</sup>	Units	Max.	Units	Conditions	Ref.
Optical Power Budget with 50/125 $\mu\text{m}$ fiber	OPB <sub>50</sub>	7.9	13.9		dB	NA = 0.2	Note 2
Optical Power Budget with 62.5/125 $\mu\text{m}$ fiber	OPB <sub>62</sub>	11.7	17.7		dB	NA = 0.27	
Optical Power Budget with 100/140 $\mu\text{m}$ fiber	OPB <sub>100</sub>	11.7	17.7		dB	NA = 0.30	
Optical Power Budget with 200 $\mu\text{m}$ HCSFiber	OPB <sub>200</sub>	16.0	22.0		dB	NA = 0.35	
Data Format 20% to 80% Duty Factor		1		175	MBd		
System Pulse Width Distortion	t <sub>PLH</sub> - t <sub>PHL</sub>		1		ns	PR = -7 dBm Peak 1 meter 62.5/125 $\mu\text{m}$ fiber	
Bit Error Rate	BER		10 <sup>-9</sup>			Data Rate < 100 MBaud PR > -31 dBm Peak	Note 2

#### Notes:

1. Typical data at T<sub>A</sub> = 25°C, V<sub>CC</sub> = 5.0 V dc, PECL serial interface.
2. Typical OPB was determined at a probability of error (BER) of 10<sup>-9</sup>. Lower probabilities of error can be achieved with short fibers that have less optical loss.

## HFBR-14X2/14X4 Low-Cost High-Speed Transmitters

### Description

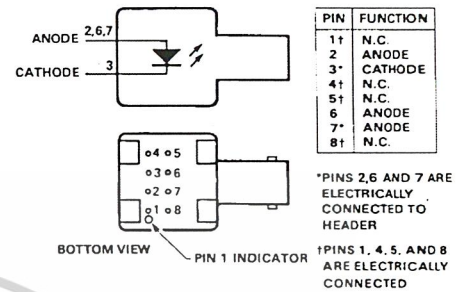
The HFBR-14XX fiber optic transmitter contains an 820 nm AlGaAs emitter capable of efficiently launching optical power into four different optical fiber sizes: 50/125  $\mu\text{m}$ , 62.5/125  $\mu\text{m}$ , 100/140  $\mu\text{m}$ , and 200  $\mu\text{m}$  HCS®. This allows the designer flexibility in choosing the fiber size. The HFBR-14XX is designed to operate with the Hewlett-Packard HFBR-24XX fiber optic receivers.

The HFBR-14XX transmitter's high coupling efficiency allows the emitter to be driven at low current levels resulting in low power consumption and increased reliability of the transmitter. The HFBR-14X4 high power transmitter is optimized for small size

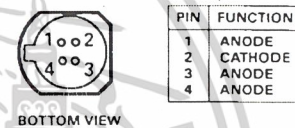
fiber and typically can launch -15.8 dBm optical power at 60 mA into 50/125  $\mu\text{m}$  fiber and -12 dBm into 62.5/125  $\mu\text{m}$  fiber. The HFBR-14X2 standard transmitter typically can launch -12 dBm of optical power at 60 mA into 100/140  $\mu\text{m}$  fiber cable. It is ideal for large size fiber such as 100/140  $\mu\text{m}$ . The high launched optical power level is useful for systems where star couplers, taps, or inline connectors create large fixed losses.

Consistent coupling efficiency is assured by the double-lens optical system (Figure 1). Power coupled into any of the three fiber types varies less than 5 dB from part to part at a given drive current and temperature. Consistent coupling efficiency reduces receiver dynamic range requirements which allows for longer link lengths.

### Housed Product



### Unhoused Product



### Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Min.	Max.	Units	Reference
Storage Temperature	$T_S$	-55	+85	$^{\circ}\text{C}$	
Operating Temperature	$T_A$	-40	+85	$^{\circ}\text{C}$	
Lead Soldering Cycle	Temp.		+260	$^{\circ}\text{C}$	
	Time		10	sec	
Forward Input Current	Peak	$I_{FPK}$	200	mA	Note 1
	dc	$I_{Fdc}$	100	mA	
Reverse Input Voltage	$V_{BR}$		1.8	V	

**Electrical/Optical Specifications** -40°C to +85°C unless otherwise specified.

Parameter	Symbol	Min.	Typ. <sup>[2]</sup>	Max.	Units	Conditions	Reference
Forward Voltage	V <sub>F</sub>	1.48	1.70	2.09	V	I <sub>F</sub> = 60 mA dc	Figure 9
			1.84			I <sub>F</sub> = 100 mA dc	
Forward Voltage Temperature Coefficient	ΔV <sub>F</sub> /ΔT		-0.22		mV/°C	I <sub>F</sub> = 60 mA dc	Figure 9
			-0.18			I <sub>F</sub> = 100 mA dc	
Reverse Input Voltage	V <sub>BR</sub>	1.8	3.8		V	I <sub>F</sub> = 100 μA dc	
Peak Emission Wavelength	λ <sub>P</sub>	792	820	865	nm		
Diode Capacitance	C <sub>T</sub>		55		pF	V = 0, f = 1 MHz	
Optical Power Temperature Coefficient	ΔP <sub>T</sub> /ΔT		-0.006		dB/°C	I = 60 mA dc	
			-0.010			I = 100 mA dc	
Thermal Resistance	θ <sub>JA</sub>		260		°C/W		Notes 3, 8
14X2 Numerical Aperture	NA		0.49				
14X4 Numerical Aperture	NA		0.31				
14X2 Optical Port Diameter	D		290		μm		Note 4
14X4 Optical Port Diameter	D		150		μm		Note 4

**HFBR-14X2 Output Power Measured Out of 1 Meter of Cable**

Parameter	Symbol	Min.	Typ. <sup>[2]</sup>	Max.	Unit	Conditions		Reference
50/125 μm Fiber Cable NA = 0.2	P <sub>T50</sub>	-21.8	-18.8	-16.8	dBm peak	T <sub>A</sub> = 25°C	I <sub>F</sub> = 60 mA dc	Notes 5, 6, 9
		-22.8		-15.8			I <sub>F</sub> = 60 mA dc	
		-20.3	-16.8	-14.4		T <sub>A</sub> = 25°C	I <sub>F</sub> = 100 mA dc	
		-21.9		-13.8		I <sub>F</sub> = 100 mA dc		
62.5/125 μm Fiber Cable NA = 0.275	P <sub>T62</sub>	-19.0	-16.0	-14.0	dBm peak	T <sub>A</sub> = 25°C	I <sub>F</sub> = 60 mA dc	
		-20.0		-13.0			I <sub>F</sub> = 60 mA dc	
		-17.5	-14.0	-11.6		T <sub>A</sub> = 25°C	I <sub>F</sub> = 100 mA dc	
		-19.1		-11.0		I <sub>F</sub> = 100 mA dc		
100/140 μm Fiber Cable NA = 0.3	P <sub>T100</sub>	-15.0	-12.0	-10.0	dBm peak	T <sub>A</sub> = 25°C	I <sub>F</sub> = 60 mA dc	
		16.0		-9.0			I <sub>F</sub> = 60 mA dc	
		-13.5	-10.0	-7.6		T <sub>A</sub> = 25°C	I <sub>F</sub> = 100 mA dc	
		-15.1		-7.0		I <sub>F</sub> = 100 mA dc		
200 μm HCS Fiber Cable NA = 0.37	P <sub>T200</sub>	-10.7	-7.1	-4.7	dBm peak	T <sub>A</sub> = 25°C	I <sub>F</sub> = 60 mA dc	
		-11.7		-3.7			I <sub>F</sub> = 60 mA dc	
		-9.2	-5.2	-2.3		T <sub>A</sub> = 25°C	I <sub>F</sub> = 100 mA dc	
		-10.8		-1.7		I <sub>F</sub> = 100 mA dc		

**CAUTION:** The small junction sizes inherent to the design of these components increase the components' susceptibility to damage from electrostatic discharge (ESD). It is advised that normal static precautions be taken in handling and assembly of these components to prevent damage and/or degradation which may be induced by ESD.

## HFBR-14X4 Output Power Measured out of 1 Meter of Cable

Parameter	Symbol	Min.	Typ. <sup>[2]</sup>	Max.	Unit	Conditions		Reference
50/125 $\mu\text{m}$ Fiber Cable NA = 0.2	PT50	-18.8	-15.8	-13.8	dBm peak	$T_A = 25^\circ\text{C}$	$I_F = 60 \text{ mA dc}$	Notes 5, 6, 9
		-19.8		-12.8				
		-17.3	-13.8	-11.4		$T_A = 25^\circ\text{C}$	$I_F = 100 \text{ mA dc}$	
		-18.9		-10.8				
62.5/125 $\mu\text{m}$ Fiber Cable NA = 0.275	PT62	-15.0	-12.0	-10.0	dBm peak	$T_A = 25^\circ\text{C}$	$I_F = 60 \text{ mA dc}$	
		-16.0		-9.0				
		-13.5	-10.0	-7.6		$T_A = 25^\circ\text{C}$	$I_F = 100 \text{ mA dc}$	
		-15.1		-7.0				
100/140 $\mu\text{m}$ Fiber Cable NA = 0.3	PT100	-9.5	-6.5	-4.5	dBm peak	$T_A = 25^\circ\text{C}$	$I_F = 60 \text{ mA dc}$	
		-10.5		-3.5				
		-8.0	-4.5	-2.1		$T_A = 25^\circ\text{C}$	$I_F = 100 \text{ mA dc}$	
		-9.6		-1.5				
200 $\mu\text{m}$ HCS Fiber Cable NA = 0.37	PT200	-5.2	-3.7	+0.8	dBm peak	$T_A = 25^\circ\text{C}$	$I_F = 60 \text{ mA dc}$	
		-6.2		+1.8				
		-3.7	-1.7	+3.2		$T_A = 25^\circ\text{C}$	$I_F = 100 \text{ mA dc}$	
		-5.3		+3.8				

## 14X2/14X4 Dynamic Characteristics

Parameter	Symbol	Min.	Typ. <sup>[2]</sup>	Max.	Units	Conditions	Reference
Rise Time, Fall Time (10% to 90%)	$t_r, t_f$		4.0	6.5	nsec No Pre-bias	$I_F = 60 \text{ mA}$ Figure 12	Note 7,
Rise Time, Fall Time (10% to 90%)	$t_r, t_f$		3.0		nsec	$I_F = 10 \text{ to } 100 \text{ mA}$	Note 7, Figure 11
Pulse Width Distortion	PWD		0.5		nsec		Figure 11

### Notes:

- For  $I_{FPK} > 100 \text{ mA}$ , the time duration should not exceed 2 ns.
- Typical data at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .
- Thermal resistance is measured with the transmitter coupled to a connector assembly and mounted on a printed circuit board.
- D is measured at the plane of the fiber face and defines a diameter where the optical power density is within 10 dB of the maximum.
- $P_T$  is measured with a large area detector at the end of 1 meter of mode stripped cable, with an ST<sup>®</sup> precision ceramic ferrule (MIL-STD-83522/13) for HFBR-1412/1414, and with an SMA 905 precision ceramic ferrule for HFBR-1402/1404.
- When changing  $\mu\text{W}$  to dBm, the optical power is referenced to 1 mW (1000  $\mu\text{W}$ ). Optical Power P (dBm) =  $10 \log P (\mu\text{W})/1000 \mu\text{W}$ .
- Pre-bias is recommended if signal rate  $> 10 \text{ MBd}$ , see recommended drive circuit in Figure 11.
- Pins 2, 6 and 7 are welded to the anode header connection to minimize the thermal resistance from junction to ambient. To further reduce the thermal resistance, the anode trace should be made as large as is consistent with good RF circuit design.
- Fiber NA is measured at the end of 2 meters of mode stripped fiber, using the far-field pattern. NA is defined as the sine of the half angle, determined at 5% of the peak intensity point. When using other manufacturer's fiber cable, results will vary due to differing NA values and specification methods.

All HFBR-14XX LED transmitters are classified as IEC 825-1 Accessible Emission Limit (AEL) Class 1 based upon the current proposed draft scheduled to go in to effect on January 1, 1997. AEL Class 1 LED devices are considered eye safe. Contact your Hewlett-Packard sales representative for more information.

**CAUTION:** The small junction sizes inherent to the design of these components increase the components' susceptibility to damage from electrostatic discharge (ESD). It is advised that normal static precautions be taken in handling and assembly of these components to prevent damage and/or degradation which may be induced by ESD.

## Recommended Drive Circuits

The circuit used to supply current to the LED transmitter can significantly influence the optical switching characteristics of the LED. The optical rise/fall times and propagation delays can be improved by using the appropriate circuit techniques. The LED drive circuit shown in

Figure 11 uses frequency compensation to reduce the typical rise/fall times of the LED and a small pre-bias voltage to minimize propagation delay differences that cause pulse-width distortion. The circuit will typically produce rise/fall times of 3 ns, and a total jitter including pulse-width distortion of less than 1 ns. This circuit is recommended for applications requiring low edge jitter

or high-speed data transmission at signal rates of up to 155 MBd. Component values for this circuit can be calculated for different LED drive currents using the equations shown below. For additional details about LED drive circuits, the reader is encouraged to read Hewlett-Packard Application Bulletin 78 and Application Note 1038.

$$R_y = \frac{(V_{CC} - V_F) + 3.97 (V_{CC} - V_F - 1.6 \text{ V})}{I_{FON} \text{ (A)}}$$

$$R_y = \frac{(5 - 1.84) + 3.97 (5 - 1.84 - 1.6)}{0.100}$$

$$R_{X1} = \frac{1}{2} \left( \frac{R_y}{3.97} \right)$$

$$R_y = \frac{3.16 + 6.19}{0.100} = 93.5 \Omega$$

$$R_{EQ2}(\Omega) = R_{X1} - 1$$

$$R_{X1} = \frac{1}{2} \left( \frac{93.5}{3.97} \right) = 11.8 \Omega$$

$$R_{X2} = R_{X3} = R_{X4} = 3(R_{EQ2})$$

$$R_{EQ2} = 11.8 - 1 = 10.8 \Omega$$

$$C(\text{pF}) = \frac{2000(\text{ps})}{R_{X1}(\Omega)}$$

$$R_{X2} = R_{X3} = R_{X4} = 3(10.8) = 32.4 \Omega$$

Example for  $I_{FON} = 100 \text{ mA}$ :  $V_F$  can be obtained from Figure 9 (= 1.84 V).

$$C = \frac{2000 \text{ ps}}{11.8 \Omega} = 169 \text{ pF}$$

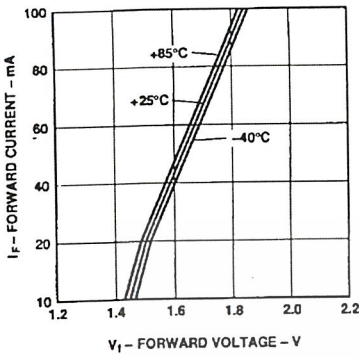


Figure 9. Forward Voltage and Current Characteristics.

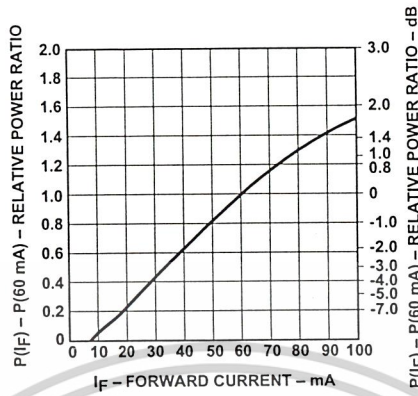


Figure 10. Normalized Transmitter Output vs. Forward Current.

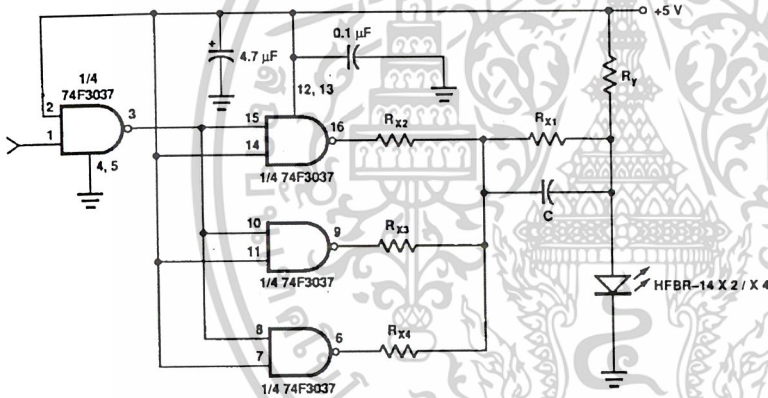


Figure 11. Recommended Drive Circuit.

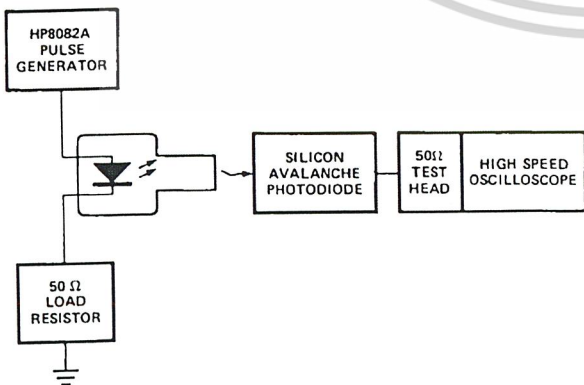


Figure 12. Test Circuit for Measuring  $t_r$ ,  $t_f$ .

## HFBR-24X2 Low-Cost 5 MBd Receiver

### Description

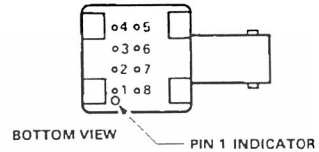
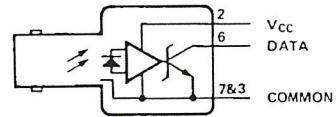
The HFBR-24X2 fiber optic receiver is designed to operate with the Hewlett-Packard HFBR-14XX fiber optic transmitter and 50/125  $\mu\text{m}$ , 62.5/125  $\mu\text{m}$ , 100/140  $\mu\text{m}$ , and 200  $\mu\text{m}$  HCS® fiber optic cable. Consistent coupling into the receiver is assured by the lensed optical system (Figure 1). Response does not vary with fiber size  $\leq 0.100 \mu\text{m}$ .

The HFBR-24X2 receiver incorporates an integrated photo IC containing a photodetector and dc amplifier driving an open-collector Schottky output transistor. The HFBR-24X2 is

designed for direct interfacing to popular logic families. The absence of an internal pull-up resistor allows the open-collector output to be used with logic families such as CMOS requiring voltage excursions much higher than  $V_{CC}$ .

Both the open-collector "Data" output Pin 6 and  $V_{CC}$  Pin 2 are referenced to "Com" Pin 3, 7. The "Data" output allows busing, strobing and wired "OR" circuit configurations. The transmitter is designed to operate from a single +5 V supply. It is essential that a bypass capacitor (0.1  $\mu\text{F}$  ceramic) be connected from Pin 2 ( $V_{CC}$ ) to Pin 3 (circuit common) of the receiver.

### Housed Product



PIN	FUNCTION
1†	N.C.
2	$V_{CC}$ (5 V)
3*	COMMON
4†	N.C.
5†	N.C.
6	DATA
7*	COMMON
8†	N.C.

\*PINS 3 AND 7 ARE ELECTRICALLY CONNECTED TO HEADER  
†PINS 1, 4, 5, AND 8 ARE ELECTRICALLY CONNECTED

### Unhoused Product



PIN	FUNCTION
1	$V_{CC}$ (5 V)
2	COMMON
3	DATA
4	COMMON

### Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Min.	Max.	Units	Reference
Storage Temperature	$T_S$	-55	+85	$^{\circ}\text{C}$	
Operating Temperature	$T_A$	-40	+85	$^{\circ}\text{C}$	
Lead Soldering Cycle	Temp.		+260	$^{\circ}\text{C}$	Note 1
	Time		10	sec	
Supply Voltage	$V_{CC}$	-0.5	7.0	V	
Output Current	$I_O$		25	mA	
Output Voltage	$V_O$	-0.5	18.0	V	
Output Collector Power Dissipation	$P_{OAV}$		40	mW	
Fan Out (TTL)	N		5		Note 2

**Electrical/Optical Characteristics** -40°C to + 85°C unless otherwise specifiedFiber sizes with core diameter  $\leq 100 \mu\text{m}$  and  $\text{NA} \leq 0.35$ ,  $4.75 \text{ V} \leq V_{\text{CC}} \leq 5.25 \text{ V}$ 

Parameter	Symbol	Min.	Typ. <sup>[3]</sup>	Max.	Units	Conditions	Reference
High Level Output Current	$I_{\text{OH}}$		5	250	$\mu\text{A}$	$V_{\text{O}} = 18$ $P_{\text{R}} < -40 \text{ dBm}$	
Low Level Output Voltage	$V_{\text{OL}}$		0.4	0.5	V	$I_{\text{O}} = 8 \text{ mA}$ $P_{\text{R}} > -24 \text{ dBm}$	
High Level Supply Current	$I_{\text{CCH}}$		3.5	6.3	mA	$V_{\text{CC}} = 5.25 \text{ V}$ $P_{\text{R}} < -40 \text{ dBm}$	
Low Level Supply Current	$I_{\text{CCL}}$		6.2	10	mA	$V_{\text{CC}} = 5.25 \text{ V}$ $P_{\text{R}} > -24 \text{ dBm}$	
Equivalent N.A.	NA		0.50				
Optical Port Diameter	D		400		$\mu\text{m}$		Note 4

**Dynamic Characteristics**-40°C to +85°C unless otherwise specified;  $4.75 \text{ V} \leq V_{\text{CC}} \leq 5.25 \text{ V}$ ;  $\text{BER} \leq 10^{-9}$ 

Parameter	Symbol	Min.	Typ. <sup>[3]</sup>	Max.	Units	Conditions	Reference
Peak Optical Input Power Logic Level HIGH	$P_{\text{RH}}$			-40	dBm pk	$\lambda_{\text{P}} = 820 \text{ nm}$	Note 5
Peak Optical Input Power Logic Level LOW	$P_{\text{RL}}$	-25.4		-9.2	dBm pk	$T_{\text{A}} = +25^{\circ}\text{C}$ , $I_{\text{OL}} = 8 \text{ mA}$	Note 5
		2.9		120	$\mu\text{W pk}$	$I_{\text{OL}} = 8 \text{ mA}$	
		-24.0		-10.0	dBm pk	$I_{\text{OL}} = 8 \text{ mA}$	
		4.0		100	$\mu\text{W pk}$		
Propagation Delay LOW to HIGH	$t_{\text{PLHR}}$		65		ns	$T_{\text{A}} = 25^{\circ}\text{C}$ , $P_{\text{R}} = -21 \text{ dBm}$ , Data Rate = 5 MBd	Note 6
Propagation Delay HIGH to LOW	$t_{\text{PHLR}}$		49		ns		

**Notes:**

- 2.0 mm from where leads enter case.
- 8 mA load ( $5 \times 1.6 \text{ mA}$ ),  $R_{\text{L}} = 560 \Omega$ .
- Typical data at  $T_{\text{A}} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $V_{\text{CC}} = 5.0 \text{ Vdc}$ .
- D is the effective diameter of the detector image on the plane of the fiber face. The numerical value is the product of the actual detector diameter and the lens magnification.
- Measured at the end of 100/140  $\mu\text{m}$  fiber optic cable with large area detector.
- Propagation delay through the system is the result of several sequentially-occurring phenomena. Consequently it is a combination of data-rate-limiting effects and of transmission-time effects. Because of this, the data-rate limit of the system must be described in terms of time differentials between delays imposed on falling and rising edges.
- As the cable length is increased, the propagation delays increase at 5 ns per meter of length. Data rate, as limited by pulse width distortion, is not affected by increasing cable length if the optical power level at the receiver is maintained.

**CAUTION:** The small junction sizes inherent to the design of these components increase the components' susceptibility to damage from electrostatic discharge (ESD). It is advised that normal static precautions be taken in handling and assembly of these components to prevent damage and/or degradation which may be induced by ESD.

## HFBR-24X6 Low-Cost 125 MHz Receiver Description

The HFBR-24X6 fiber optic receiver is designed to operate with the Hewlett-Packard HFBR-14XX fiber optic transmitters and 50/125  $\mu\text{m}$ , 62.5/125  $\mu\text{m}$ , 100/140  $\mu\text{m}$  and 200  $\mu\text{m}$  HCS<sup>®</sup> fiber optic cable. Consistent coupling into the receiver is assured by the lensed optical system (Figure 1). Response does not vary with fiber size for core diameters of 100  $\mu\text{m}$  or less.

The receiver output is an analog signal which allows follow-on circuitry to be optimized for a variety of distance/data rate requirements. Low-cost external components can be used to convert the analog output to logic compatible signal levels for various data formats and data rates up to 175 Mb/d. This distance/data rate tradeoff results in increased optical power budget at lower data rates which can be used for additional distance or splices.

The HFBR-24X6 receiver contains a PIN photodiode and low noise transimpedance pre-amplifier

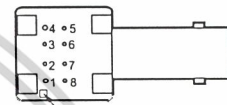
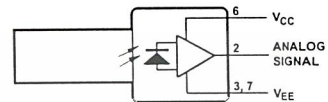
integrated circuit. The HFBR-24X6 receives an optical signal and converts it to an analog voltage. The output is a buffered emitter-follower. Because the signal amplitude from the HFBR-24X6 receiver is much larger than from a simple PIN photodiode, it is less susceptible to EMI, especially at high signaling rates. For very noisy environments, the conductive or metal port option is recommended. A receiver dynamic range of 23 dB over temperature is achievable (assuming  $10^{-9}$  BER).

The frequency response is typically dc to 125 MHz. Although the HFBR-24X6 is an analog receiver, it is compatible with digital systems. Please refer to Application Bulletin 78 for simple and inexpensive circuits that operate at 155 Mb/d or higher.

The recommended ac coupled receiver circuit is shown in Figure 12. It is essential that a 10 ohm resistor be connected between pin 6 and the power supply, and a 0.1  $\mu\text{F}$  ceramic bypass capacitor be connected between the power supply and ground. In addition, pin 6 should be filtered to protect the

receiver from noisy host systems. Refer to AN 1038, 1065, or AB 78 for details.

### Housed Product



BOTTOM VIEW PIN NO. 1 INDICATOR

PIN	FUNCTION
1†	N.C.
2	SIGNAL
3*	VEE
4†	N.C.
5†	N.C.
6	VCC
7*	VEE
8†	N.C.

\* PINS 3 AND 7 ARE ELECTRICALLY CONNECTED TO THE HEADER.

† PINS 1, 4, 5, AND 8 ARE ISOLATED FROM THE INTERNAL CIRCUITRY, BUT ARE ELECTRICALLY CONNECTED TO EACH OTHER.

### Unhoused Product



BOTTOM VIEW

PIN	FUNCTION
1	SIGNAL
2*	VEE
3	VCC
4*	VEE

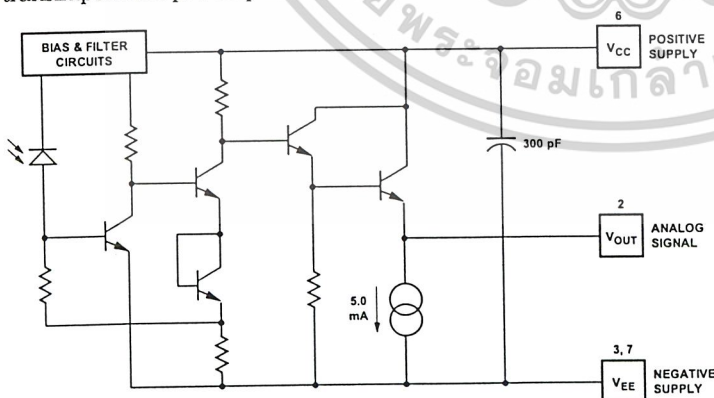


Figure 11. Simplified Schematic Diagram.

**CAUTION:** The small junction sizes inherent to the design of these components increase the components' susceptibility to damage from electrostatic discharge (ESD). It is advised that normal static precautions be taken in handling and assembly of these components to prevent damage and/or degradation which may be induced by ESD.

## Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Min.	Max.	Units	Reference
Storage Temperature	T <sub>S</sub>	-55	+85	°C	
Operating Temperature	T <sub>A</sub>	-40	+85	°C	
Lead Soldering Cycle	Temp.		+260	°C	Note 1
	Time		10	s	
Supply Voltage	V <sub>CC</sub>	-0.5	6.0	V	
Output Current	I <sub>O</sub>		25	mA	
Signal Pin Voltage	V <sub>SIG</sub>	-0.5	V <sub>CC</sub>	V	

**Electrical/Optical Characteristics** -40°C to +85°C; 4.75 V ≤ Supply Voltage ≤ 5.25 V,  
R<sub>LOAD</sub> = 511 Ω, Fiber sizes with core diameter ≤ 100 μm, and N.A. ≤ -0.35 unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Min.	Typ. <sup>[2]</sup>	Max.	Units	Conditions	Reference
Responsivity	R <sub>p</sub>	5.3	7	9.6	mV/μW	T <sub>A</sub> = 25°C @ 820 nm, 50 MHz	Note 3, 4 Figure 16
		4.5		11.5	mV/μW	@ 820 nm, 50 MHz	
RMS Output Noise Voltage	V <sub>NO</sub>		0.40	0.59	mV	Bandwidth Filtered @ 75 MHz P <sub>R</sub> = 0 μW	Note 5 Figure 13
				0.70	mV	Unfiltered Bandwidth P <sub>R</sub> = 0 μW	
Equivalent Input Optical Noise Power (RMS)	P <sub>N</sub>		-43.0	-41.4	dBm	Bandwidth Filtered @ 75 MHz	
			0.050	0.065	μW		
Optical Input Power (Overdrive)	P <sub>R</sub>			-7.6	dBm pk	T <sub>A</sub> = 25°C	Figure 14 Note 6
				175	μW pk		
				-8.2	dBm pk		
				150	μW pk		
Output Impedance	Z <sub>o</sub>		30		Ω	Test Frequency = 50 MHz	
dc Output Voltage	V <sub>o dc</sub>	-4.2	-3.1	-2.4	V	P <sub>R</sub> = 0 μW	
Power Supply Current	I <sub>EE</sub>		9	15	mA	R <sub>LOAD</sub> = 510 Ω	
Equivalent N.A.	NA		0.35				
Equivalent Diameter	D		324		μm		Note 7

**CAUTION:** The small junction sizes inherent to the design of these components increase the components' susceptibility to damage from electrostatic discharge (ESD). It is advised that normal static precautions be taken in handling and assembly of these components to prevent damage and/or degradation which may be induced by ESD.

**Dynamic Characteristics** -40°C to +85°C; 4.75 V ≤ Supply Voltage ≤ 5.25 V; R<sub>LOAD</sub> = 511 Ω, C<sub>LOAD</sub> = 5 pF unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Min.	Typ. <sup>[2]</sup>	Max.	Units	Conditions	Reference
Rise/Fall Time 10% to 90%	t <sub>r</sub> , t <sub>f</sub>		3.3	6.3	ns	P <sub>R</sub> = 100 μW peak	Figure 15
Pulse Width Distortion	PWD		0.4	2.5	ns	P <sub>R</sub> = 150 μW peak	Note 8, Figure 14
Overshoot			2		%	P <sub>R</sub> = 5 μW peak, t <sub>r</sub> = 1.5 ns	Note 9
Bandwidth (Electrical)	BW		125		MHz	-3 dB Electrical	
Bandwidth - Rise Time Product			0.41		Hz • s		Note 10

**Notes:**

- 2.0 mm from where leads enter case.
- Typical specifications are for operation at T<sub>A</sub> = 25°C and V<sub>CC</sub> = +5 V dc.
- For 200 μm HCS fibers, typical responsivity will be 6 mV/μW. Other parameters will change as well.
- Pin #2 should be ac coupled to a load ≥ 510 ohm. Load capacitance must be less than 5 pF.
- Measured with a 3 pole Bessel filter with a 75 MHz, -3 dB bandwidth. Recommended receiver filters for various bandwidths are provided in Application Bulletin 78.
- Overdrive is defined at PWD = 2.5 ns.
- D is the effective diameter of the detector image on the plane of the fiber face. The numerical value is the product of the actual detector diameter and the lens magnification.
- Measured with a 10 ns pulse width, 50% duty cycle, at the 50% amplitude point of the waveform.
- Percent overshoot is defined as:

$$\left( \frac{V_{PK} - V_{100\%}}{V_{100\%}} \right) \times 100\%$$

- The conversion factor for the rise time to bandwidth is 0.41 since the HFBR-24X6 has a second order bandwidth limiting characteristic.

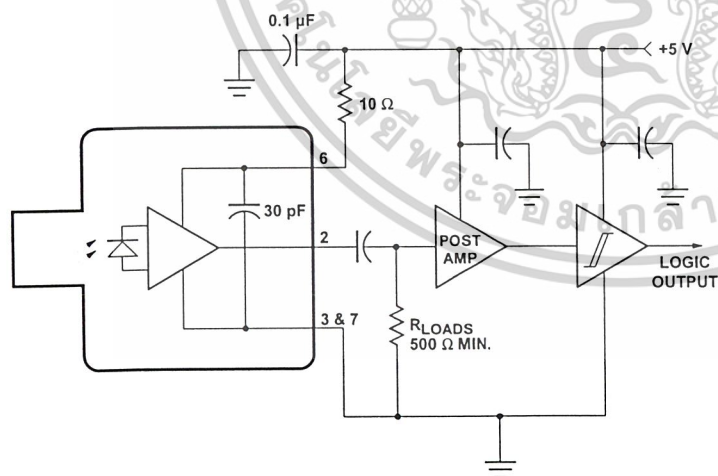


Figure 12. Recommended ac Coupled Receiver Circuit. (See AB 78 and AN 1038 for more information.)

**CAUTION:** The small junction sizes inherent to the design of these components increase the components' susceptibility to damage from electrostatic discharge (ESD). It is advised that normal static precautions be taken in handling and assembly of these components to prevent damage and/or degradation which may be induced by ESD.

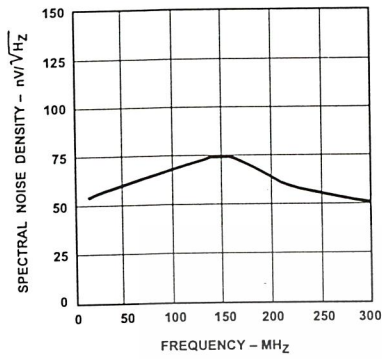


Figure 13. Typical Spectral Noise Density vs. Peak Input Power.

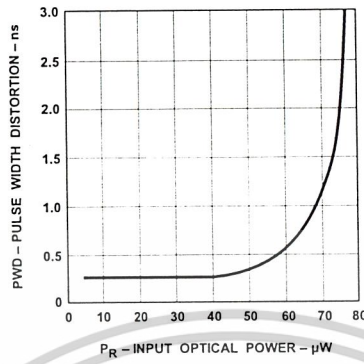


Figure 14. Typical Pulse Width Density vs. Frequency.

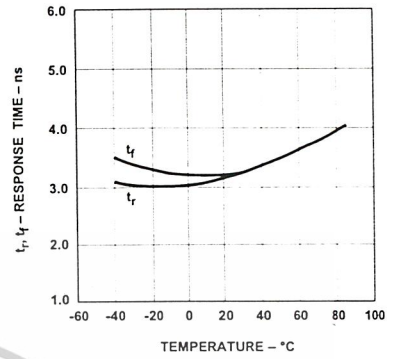


Figure 15. Typical Rise and Fall Times vs. Temperature.

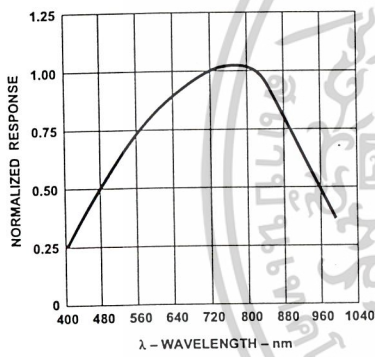


Figure 16. Receiver Spectral Response Normalized to 820 nm.

# Conductive Port Option for Low Cost Miniature Link Components

## Technical Data

### Option C

#### Features

- Significantly Decreases Effect of Electromagnetic Interference (EMI) on Receiver Sensitivity
- Available with Both SMA and Threaded ST Styled Port Receivers
- Allows the Designer to Separate the Signal and Conductive Port Grounds

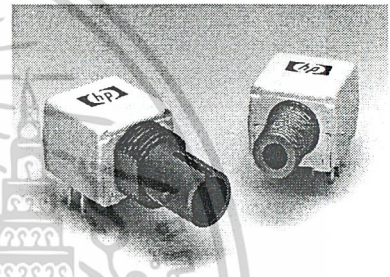
#### Description

The conductive port option for the Low Cost Miniature Link component family consists of a grounding path from the conductive port to four grounding pins as shown in the package outline drawing. Signal ground is separate from the four grounding pins to give the designer more flexibility. This option is available with all SMA and ST panel mount styled port receivers. Electrical/optical performance of the receivers is not affected by the conductive port. Refer to the HFBR-0400 data sheets for more information.

#### Applications

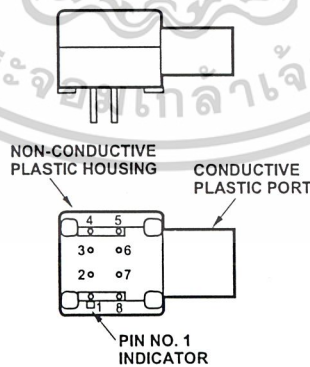
HP recommends that the designer use separate ground paths for the signal ground and the conductive port ground in order to minimize the effects of coupled noise on the receiver circuitry. If the designer notices that extreme noise is present on the system chassis, care should be taken to electrically isolate the conductive port from the chassis.

In the case of ESD, the conductive port option does not alleviate the need for system recovery procedures. A 15 kV ESD event entering through the port will not



cause catastrophic failure for any HFBR-0400 receivers, but may cause soft errors. The conductive port option can reduce the amount of soft errors due to ESD events, but does not guarantee error-free performance.

#### Package Outline



Pin	Function
1	Port Ground Pin
2	Part Dependent
3	Part Dependent
4	Port Ground Pin
5	Port Ground Pin
6	Part Dependent
7	Part Dependent
8	Port Ground Pin

## Reliability Information

Low Cost Miniature Link components with the Conductive Port Option are as reliable as standard HFBR-0400 components. The following tests were performed to verify the mechanical reliability of this option.

## Ordering Information

To order the Conductive Port Option with a particular receiver component, place a "C" after the base part number. For example, to order an HFBR-2406 with this option, order an HFBR-2406C. As another example, to order an HFBR-2416T with this option, order an HFBR-2416TC.

This option is available with the following part numbers:

HFBR-2402	HFBR-2442T
HFBR-2404	HFBR-2444T
HFBR-2406	HFBR-2446T
HFBR-2412T	HFBR-2452
HFBR-2414T	HFBR-2454
HFBR-2416T	HFBR-2456
HFBR-2432	HFBR-2462T
HFBR-2434	HFBR-2464T
HFBR-2436	HFBR-2466T

## Mechanical and Environmental Tests<sup>[1]</sup>

Test	MIL-STD-883/ Other Reference	Test Conditions	Units Tested	Total Failed
Temperature Cycling	1010 Condition B	-55°C to +125°C 15 min. dwell/5 min. transfer 100 cycles	70	0
Thermal Shock	1011 Condition B	-55°C to +125°C 5 min. dwell/10 sec. transfer 500 cycles	45	0
High temp. Storage	1008 Condition B	T <sub>A</sub> = 125°C 1000 hours	50	0
Mechanical Shock	2002 Condition B	1500 g/0.5 ms 5 impacts each axis	40	0
Port <sup>[2]</sup> Strength	T <sub>A</sub> = 25°C	6 Kg-cm no port damage	20	0
Seal Dye Penetrant (Zyglo)	1014 Condition D	45 psi, 10 hours No leakage into microelectronic cavity	15	0
Solderability	2003	245°C	10	0
Resistance to Solvents	2015	3 one min. immersion brush after solvent	13	0
Chemical Resistance	-	5 minutes in Acetone, Methanol, Boiling Water	12	0
Temperature- Humidity	-	T <sub>A</sub> = 85°C, RH = 85% Biased, 500 hours	30	0
Lead Integrity	2004 Condition B2	8 oz. wt. to each lead tested for three 90° arcs of the case	16	0
Electrostatic Discharge (ESD)	IEC-801-2	Direct contact discharge to port, 0-15 kV <sup>[3]</sup>	16	0

### Notes:

- Tests were performed on both SMA and ST products with the conductive port option.
- The Port Strength test was designed to address the concerns with hand tightening the SMA connector to the fiber optic port. The limit is set to a level beyond most reasonable hand fastening loading.
- HP has previously used an air discharge method to measure ESD; results using this method vary with air temperature and humidity. The direct contact discharge method is preferred due to better repeatability and conformance with IEC procedures. ESD immunity measured with the air discharge method is generally higher than with the direct contact discharge method.

# Threaded ST Port Option for Low Cost Miniature Link Components

## Technical Data

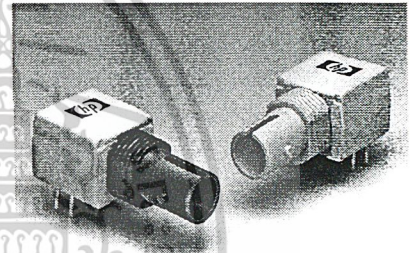
### Option T

#### Features

- Threading Allows ST Styled Port Components to be Panel Mounted
- Compatible with all Current Makes of ST Multimode Connectors
- Mechanical Dimensions are Compliant with MIL-STD-83522/13

#### Panel Mounting

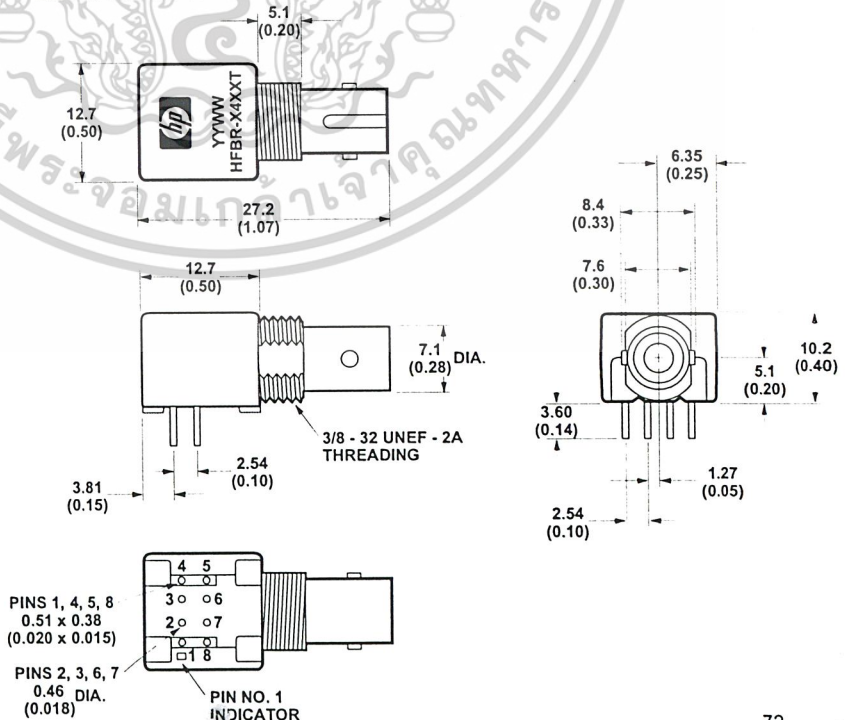
Low Cost Miniature Link components with the Threaded ST Port Option are suitable for panel mounting to chassis walls. The maximum wall thickness possible when using nuts and washers from the HFBR-4411 kit is 0.11 inch (2.8 mm).



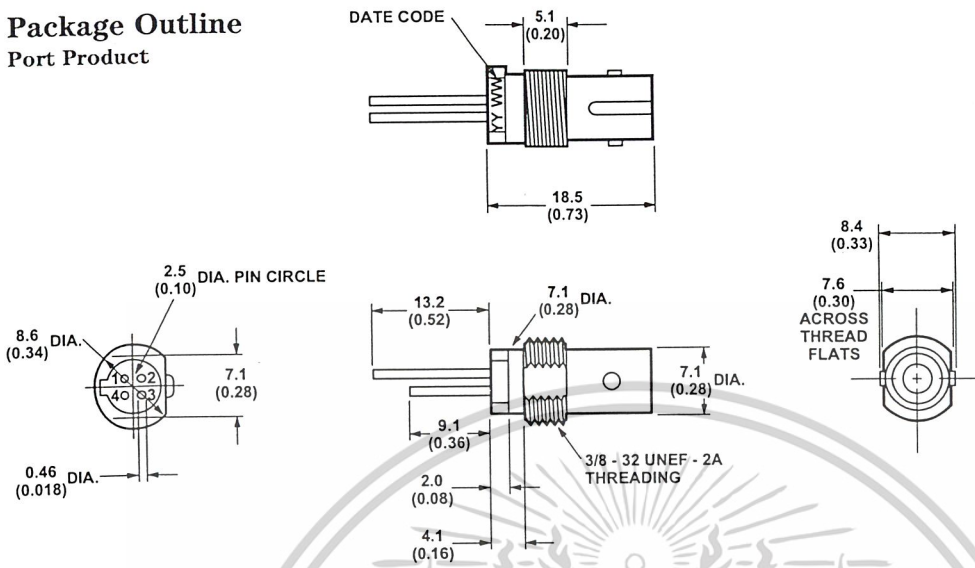
#### Description

Low Cost Miniature Link components with the Threaded ST Port Option come with 0.2 inch (5.1 mm) of 3/8-32 UNEF-2A threads on the port. This option is available with all HFBR-0400, ST styled port components. Components with this option retain the same superior electrical/optical and mechanical performance as that of the base HFBR-0400 components. Refer to the HFBR-0400 data sheets for more information on electrical/optical performance and the HFBR-0400 Reliability data sheet for more information on mechanical durability.

#### Package Outline Housed Product



**Package Outline**  
Port Product



ALL DIMENSIONS IN MILLIMETERS AND (INCHES).

The HFBR-4411 kit consists of 100 nuts and 100 washers with dimensions as shown in Figure 1. These kits are available from HP or any authorized distributor. Any standard size nut and washer will work, provided the total thickness of the wall, nut, and washer does not exceed 0.2 inch (5.1mm).

When preparing the chassis wall for panel mounting, use the

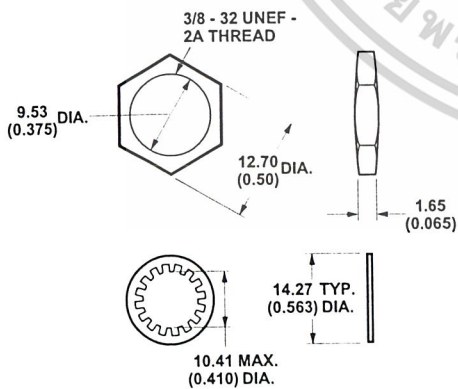
mounting template in Figure 2. When tightening the nut, torque should not exceed 0.8 N-m (8.0 in-lb).

**Ordering Information**

To order the Threaded ST Port Option with a particular component, place a "T" after the base part number. For example, to order an HFBR-2416 with this option, order an HFBR-2416T.

This option is available with the following part numbers:

- HFBR-1412
- HFBR-1414
- HFBR-1442
- HFBR-1444
- HFBR-1462
- HFBR-1464
- HFBR-2412
- HFBR-2414



ALL DIMENSIONS IN MILLIMETERS AND (INCHES).

INTERNAL TOOTH LOCK WASHER

Figure 2. Recommended Cut-out for Panel Mounting.

ALL DIMENSIONS IN MILLIMETERS AND (INCHES).

Figure 1. HFBR-4411 Mechanical Dimensions.

# Metal Port Option for HFBR-0400 Series Components

## Technical Data

### Option M

#### Features

- Nickel Plated Aluminum Connector Receptacle
- Withstands Electro-static Discharge (ESD) of 15 kV to the Port
- Significantly Decreases Effect of Electro-magnetic Interference (EMI) on Receiver Sensitivity
- Allows Separate Signal and Metal Port Grounds
- Available with SMA, ST, Threaded ST, and FC Styled Ports

#### Description

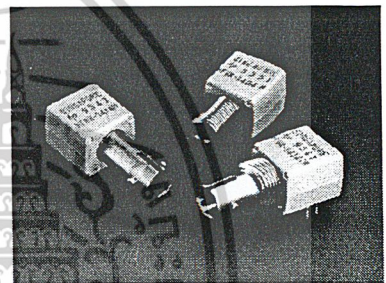
The metal port option for the HFBR-0400 Series gives designers the ability to have a metal connector receptacle with the familiar HFBR-0400 dual in-line package (DIP). The metal port option components have an internal electrical connection between the metal port and the four grounding pins, as shown in the package outline drawing. Signal ground is separate from the four grounding pins to give the flexibility in connecting the port to signal or chassis ground.

This feature aids in maintaining the integrity of the signal ground if the chassis is exposed to electrical noise. In addition, when the metal port is in good electrical contact with a well-grounded chassis, the metal port provides additional EMI shielding from electrically noisy circuits.

#### Applications

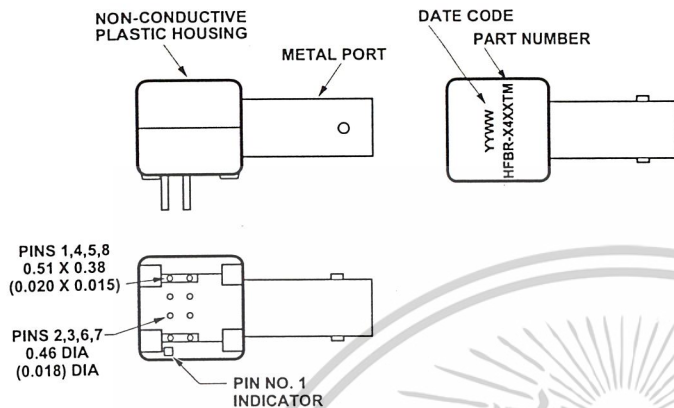
HP recommends that the designer use separate ground paths for the signal ground and the conductive metal port ground in order to minimize the effects of external coupled noise on receiver circuitry. If noise is present on the system chassis, care should be taken to electrically isolate the metal port from the chassis.

In the case of ESD, the metal port option does not alleviate the need for system recovery procedures. A 15 kV ESD event entering through the connector port will not cause catastrophic failure, but the metal port does not guarantee error-free performance during an ESD event.



The Metal Port Option is available with SMA, ST, Threaded ST (panel mount) and FC styled port transmitters and receivers. The electrical/optical specifications, the mechanical dimensions, and the pinouts of the components with metal ports are identical to the standard plastic port products.

## Package Outline



Pin	Function
1	Port Ground Pin
2	Part Dependent
3	Part Dependent
4	Port Ground Pin
5	Port Ground Pin
6	Part Dependent
7	Part Dependent
8	Port Ground Pin

## Ordering Information

This option will be available with the following part numbers:

### Transmitters

HFBR-1402  
HFBR-1412  
HFBR-1412T  
HFBR-1422  
HFBR-1404  
HFBR-1414  
HFBR-1414T  
HFBR-1424

### Receivers

HFBR-2402  
HFBR-2412  
HFBR-2412T  
HFBR-2422  
HFBR-2406  
HFBR-2416  
HFBR-2416T  
HFBR-2426

Refer to the HFBR-14XX and HFBR-24XX data sheets for electrical/optical/mechanical specifications for each part. To order the Metal Port Option with a particular transmitter or receiver component, simply add the letter "M" to the end of the standard part number. For example, HFBR-1412T with the metal port option is HFBR-1412TM.

## Reliability Information

Low Cost Miniature Link Components with the Metal Port Option use the same semiconductor devices and manufacturing processes as standard HFBR-0400 components, so reliability data for the HFBR-0400 Series is directly applicable. The tests listed below demonstrate the mechanical reliability of this package.

## Mechanical and Environmental Tests

Test	MIL-STD-883 or Other Reference	Test Conditions	Units Tested	Total Failed
Temperature Cycling	1010 Condition B	-55 to +125°C, 15 minutes dwell, 5 minutes transfer, 170 cycles	40	0
Unbiased Pressure Pot Test		121°C, 100% relative humidity, 2 atmospheres, 48 hours	5	0
Mechanical Shock	2002 Condition B	5 blows each X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2 1500 G, 0.5 msec. pulse	40	0
Vibration Variable Frequency	2007 Condition A	50 G, 20 to 2000 Hz. 4, 4 minute cycles each X, Y, Z	40	0

## LM6161/LM6261/LM6361 High Speed Operational Amplifier

### General Description

The LM6161 family of high-speed amplifiers exhibits an excellent speed-power product in delivering 300 V/ $\mu$ s and 50 MHz unity gain stability with only 5 mA of supply current. Further power savings and application convenience are possible by taking advantage of the wide dynamic range in operating supply voltage which extends all the way down to +5V. These amplifiers are built with National's VIP™ (Vertically Integrated PNP) process which provides fast PNP transistors that are true complements to the already fast NPN devices. This advanced junction-isolated process delivers high speed performance without the need for complex and expensive dielectric isolation.

- High unity gain freq 50 MHz
- Low supply current 5 mA
- Fast settling 120 ns to 0.1%
- Low differential gain <0.1%
- Low differential phase 0.1°
- Wide supply range 4.75V to 32V
- Stable with unlimited capacitive load
- Well behaved; easy to apply

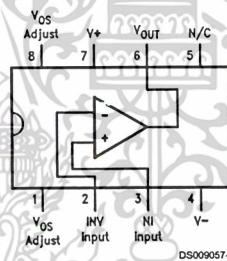
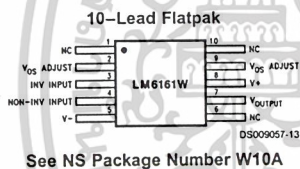
### Applications

- Video amplifier
- High-frequency filter
- Wide-bandwidth signal conditioning
- Radar
- Sonar

### Features

- High slew rate 300 V/ $\mu$ s

### Connection Diagrams



Temperature Range			Package	NSC Drawing
Military -55°C ≤ T <sub>A</sub> ≤ +125°C	Industrial -25°C ≤ T <sub>A</sub> ≤ +85°C	Commercial 0°C ≤ T <sub>A</sub> ≤ +70°C		
	LM6261N	LM6361N	8-Pin Molded DIP	N08E
LM6161J/883 5962-8962101PA		LM6361J	8-Pin Ceramic DIP	J08A
	LM6261M	LM6361M	8-Pin Molded Surface Mt.	M08A
LM6161WG/883 5962-8962101XA			10-Lead Ceramic SOIC	WG10A
LM6161W/883 5962-8962101HA			10-Pin Ceramic Flatpak	W10A

VIP™ is a trademark of National Semiconductor Corporation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Absolute Maximum Ratings (Note 12)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/ Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage ( $V^+ - V^-$ )	36V
Differential Input Voltage (Note 8)	$\pm 8V$
Common-Mode Voltage Range (Note 10)	$(V^+ - 0.7V)$ to $(V^- + 0.7V)$
Output Short Circuit to GND (Note 1)	Continuous
Soldering Information	
Dual-In-Line Package (N, J) Soldering (10 sec.)	260°C
Small Outline Package (M) Vapor Phase (60 sec.)	215°C
Infrared (15 sec.)	220°C

See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.

Storage Temp Range	-65°C to +150°C
Max Junction Temperature	150°C
ESD Tolerance (Notes 6, 7)	$\pm 7000V$

### Operating Ratings (Note 12)

Temperature Range (Note 2)	
LM6161	$-55^\circ C \leq T_J \leq +125^\circ C$
LM6261	$-25^\circ C \leq T_J \leq +85^\circ C$
LM6361	$0^\circ C \leq T_J \leq +70^\circ C$
Supply Voltage Range	4.75V to 32V

### DC Electrical Characteristics

The following specifications apply for Supply Voltage =  $\pm 15V$ ,  $V_{CM} = 0$ ,  $R_L \geq 100 k\Omega$  and  $R_S = 50\Omega$  unless otherwise noted. Boldface limits apply for  $T_J = T_{MIN}$  to  $T_{MAX}$ ; all other limits  $T_J = 25^\circ C$ .

Symbol	Parameter	Conditions	Typ	LM6161	LM6261	LM6361	Units
				Limit (Notes 3, 11)	Limit (Note 3)	Limit (Note 3)	
$V_{OS}$	Input Offset Voltage		5	7	7	20	mV
				10	9	22	Max
$V_{OS}$ Drift	Input Offset Voltage Average Drift		10				$\mu V/^\circ C$
$I_b$	Input Bias Current		2	3	3	5	$\mu A$
				6	5	6	Max
$I_{OS}$	Input Offset Current		150	350	350	1500	nA
				800	600	1900	Max
$I_{OS}$ Drift	Input Offset Current Average Drift		0.4				$nA/^\circ C$
$R_{IN}$	Input Resistance	Differential	325				k $\Omega$
$C_{IN}$	Input Capacitance	$A_v = +1 @ 10 MHz$	1.5				pF
$A_{VOL}$	Large Signal Voltage Gain	$V_{OUT} = \pm 10V$ , $R_L = 2 k\Omega$ (Note 9)	750	550	550	400	V/V
				300	400	350	Min
$V_{CM}$	Input Common-Mode Voltage Range	Supply = $\pm 15V$	+14.0	+13.9	+13.9	+13.8	Volts
				+13.8	+13.8	+13.7	Min
				-13.2	-12.9	-12.9	Volts
				-12.7	-12.7	-12.7	Min
				Supply = +5V (Note 4)	4.0	3.9	3.9
3.8	3.8	3.7	Min				
			1.8	2.0	2.0	2.1	Volts
				2.2	2.2	2.2	Max
CMRR	Common-Mode Rejection Ratio	$-10V \leq V_{CM} \leq +10V$	94	80	80	72	dB
				74	76	70	Min
PSRR	Power Supply Rejection Ratio	$\pm 10V \leq V^* \leq \pm 16V$	90	80	80	72	dB
				74	76	70	Min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### DC Electrical Characteristics (Continued)

The following specifications apply for Supply Voltage =  $\pm 15V$ ,  $V_{CM} = 0$ ,  $R_L \geq 100\text{ k}\Omega$  and  $R_S = 50\Omega$  unless otherwise noted. Boldface limits apply for  $T_J = T_{MIN}$  to  $T_{MAX}$ ; all other limits  $T_J = 25^\circ\text{C}$ .

Symbol	Parameter	Conditions	Typ	LM6161	LM6261	LM6361	Units
				Limit (Notes 3, 11)	Limit (Note 3)	Limit (Note 3)	
$V_O$	Output Voltage Swing	Supply = $\pm 15V$ and $R_L = 2\text{ k}\Omega$	+14.2	+13.5 <b>+13.3</b>	+13.5 <b>+13.3</b>	+13.4 <b>+13.3</b>	Volts Min
			-13.4	-13.0 <b>-12.7</b>	-13.0 <b>-12.8</b>	-12.9 <b>-12.8</b>	Volts Min
		Supply = +5V and $R_L = 2\text{ k}\Omega$ (Note 4)	4.2	3.5 <b>3.3</b>	3.5 <b>3.3</b>	3.4 <b>3.3</b>	Volts Min
			1.3	1.7 <b>2.0</b>	1.7 <b>1.9</b>	1.8 <b>1.9</b>	Volts Max
	Output Short Circuit Current	Source	65	30 <b>20</b>	30 <b>25</b>	30 <b>25</b>	mA Min
		Sink	65	30 <b>20</b>	30 <b>25</b>	30 <b>25</b>	mA Min
$I_S$	Supply Current		5.0	6.5 <b>6.8</b>	6.5 <b>6.7</b>	6.8 <b>6.9</b>	mA Max

### AC Electrical Characteristics

The following specifications apply for Supply Voltage =  $\pm 15V$ ,  $V_{CM} = 0$ ,  $R_L \geq 100\text{ k}\Omega$  and  $R_S = 50\Omega$  unless otherwise noted. Boldface limits apply for  $T_J = T_{MIN}$  to  $T_{MAX}$ ; all other limits  $T_J = 25^\circ\text{C}$ .

Symbol	Parameter	Conditions	Typ	LM6161	LM6261	LM6361	Units
				Limit (Notes 3, 11)	Limit (Note 3)	Limit (Note 3)	
GBW	Gain-Bandwidth Product	@ $f = 20\text{ MHz}$	50	40 <b>30</b>	40 <b>35</b>	35 <b>32</b>	MHz Min
		Supply = $\pm 5V$	35				MHz
SR	Slew Rate	$A_V = +1$ (Note 8)	300	200 <b>180</b>	200 <b>180</b>	200 <b>180</b>	V/ $\mu\text{s}$ Min
		Supply = $\pm 5V$ (Note 8)	200				V/ $\mu\text{s}$
PBW	Power Bandwidth	$V_{OUT} = 20\text{ V}_{PP}$	4.5				MHz
$t_S$	Settling Time	10V Step to 0.1% $A_V = -1$ , $R_L = 2\text{ k}\Omega$	120				ns
$\phi_m$	Phase Margin		45				Deg
$A_D$	Differential Gain	NTSC, $A_V = +4$	<0.1				%
$\phi_D$	Differential Phase	NTSC, $A_V = +4$	0.1				Deg
$e_{np-p}$	Input Noise Voltage	$f = 10\text{ kHz}$	15				nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
$i_{np-p}$	Input Noise Current	$f = 10\text{ kHz}$	1.5				pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$

**Note 1:** Continuous short-circuit operation at elevated ambient temperature can result in exceeding the maximum allowed junction temperature of  $150^\circ\text{C}$ .

**Note 2:** The typical junction-to-ambient thermal resistance of the molded plastic DIP (N) is  $105^\circ\text{C/W}$ , the molded plastic SO (M) package is  $155^\circ\text{C/W}$ , and the cerdip (J) package is  $125^\circ\text{C/W}$ . All numbers apply for packages soldered directly into a printed circuit board.

**Note 3:** Limits are guaranteed by testing or correlation.

**Note 4:** For single supply operation, the following conditions apply:  $V^+ = 5V$ ,  $V^- = 0V$ ,  $V_{CM} = 2.5V$ ,  $V_{OUT} = 2.5V$ . Pin 1 & Pin 8 ( $V_{OS}$  Adjust) are each connected to Pin 4 ( $V^-$ ) to realize maximum output swing. This connection will degrade  $V_{OS}$ ,  $V_{OS}$  Drift, and Input Voltage Noise.

**Note 5:**  $C_L \leq 5\text{ pF}$ .

**Note 6:** In order to achieve optimum AC performance, the input stage was designed without protective clamps. Exceeding the maximum differential input voltage results in reverse breakdown of the base-emitter junction of one of the input transistors and probable degradation of the input parameters (especially  $V_{OS}$ ,  $I_{OS}$ , and Noise).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## AC Electrical Characteristics (Continued)

**Note 7:** The average voltage that the weakest pin combinations (those involving Pin 2 or Pin 3) can withstand and still conform to the datasheet limits. The test circuit used consists of the human body model of 100 pF in series with 1500Ω.

**Note 8:**  $V_{IN} = 8V$  step. For supply = ±5V,  $V_{IN} = 5V$  step.

**Note 9:** Voltage Gain is the total output swing (20V) divided by the input signal required to produce that swing.

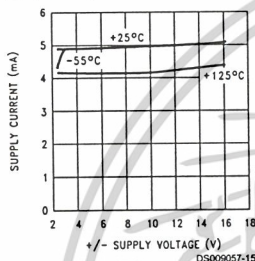
**Note 10:** The voltage between  $V^+$  and either input pin must not exceed 36V.

**Note 11:** A military RETS electrical test specification is available on request. At the time of printing, the RETS6161X specs complied with all **Boldface** limits in this column.

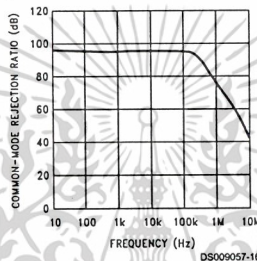
**Note 12:** Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is intended to be functional, but do not guarantee specific performance limits. For guaranteed specifications and test conditions, see the Electrical Characteristics. The guaranteed specifications apply only for the test conditions listed.

## Typical Performance Characteristics ( $R_L = 10\text{ k}\Omega$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)

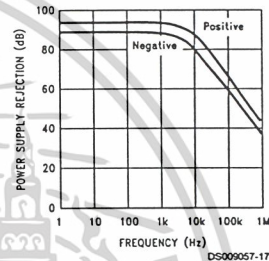
Supply Current vs Supply Voltage



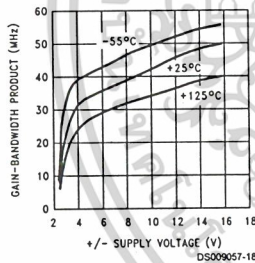
Common-Mode Rejection Ratio



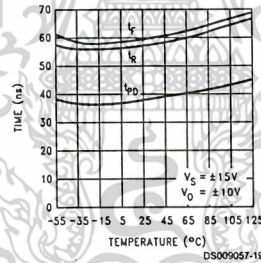
Power Supply Rejection Ratio



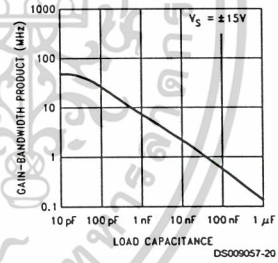
Gain-Bandwidth Product



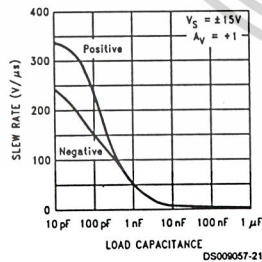
Propagation Delay Rise and Fall Times



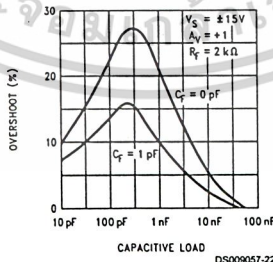
Gain-Bandwidth Product vs Load Capacitance



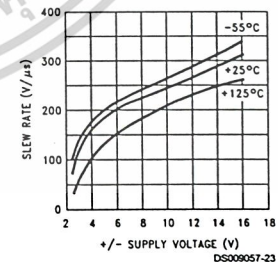
Slew Rate vs Load Capacitance



Overshoot vs Capacitive Load



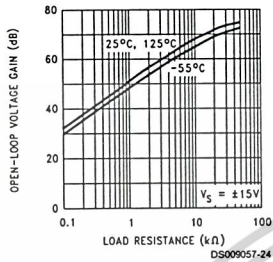
Slew Rate



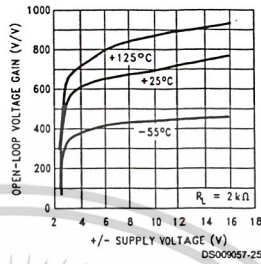
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Typical Performance Characteristics** ( $R_L = 10\text{ k}\Omega$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise specified) (Continued)

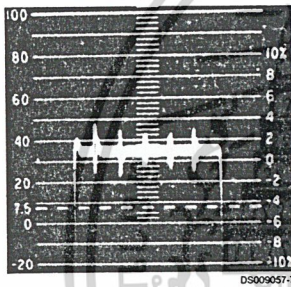
**Voltage Gain vs Load Resistance**



**Gain vs Supply Voltage**



**Differential Gain (Note 13)**

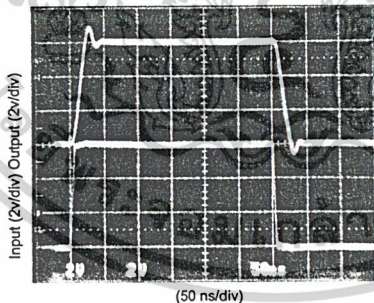


**Differential Phase (Note 13)**



**Note 13:** Differential gain and differential phase measured for four series LM6361 op amps configured as unity-gain followers, in series with an LM6321 buffer. Error added by LM6321 is negligible. Test performed using Tektronix Type 520 NTSC test system.

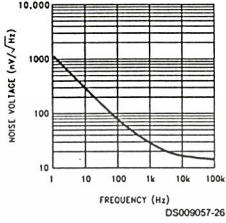
**Step Response;  $A_v = +1$**



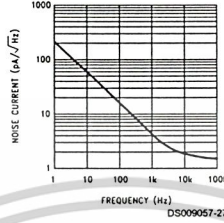
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Typical Performance Characteristics** ( $R_L = 10\text{ k}\Omega$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise specified) (Continued)

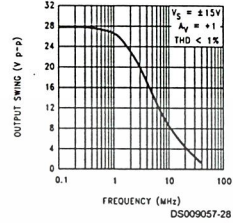
**Input Noise Voltage**



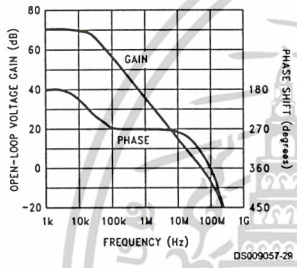
**Input Noise Current**



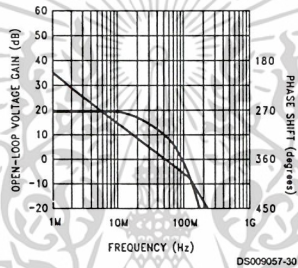
**Power Bandwidth**



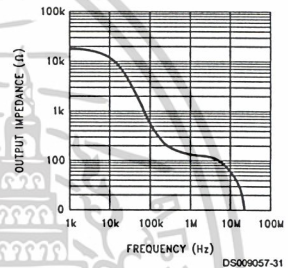
**Open-Loop Frequency Response**



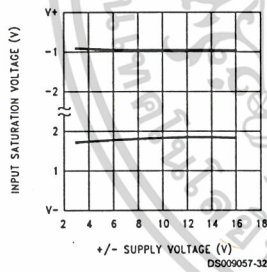
**Open-Loop Frequency Response**



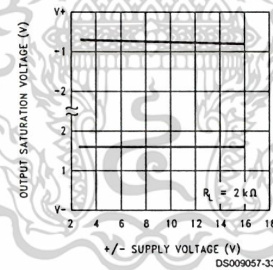
**Output Impedance (Open-Loop)**



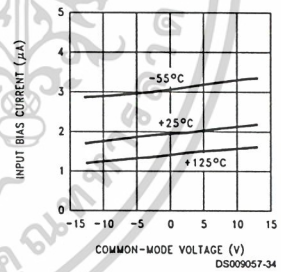
**Common-Mode Input Saturation Voltage**



**Output Saturation Voltage**

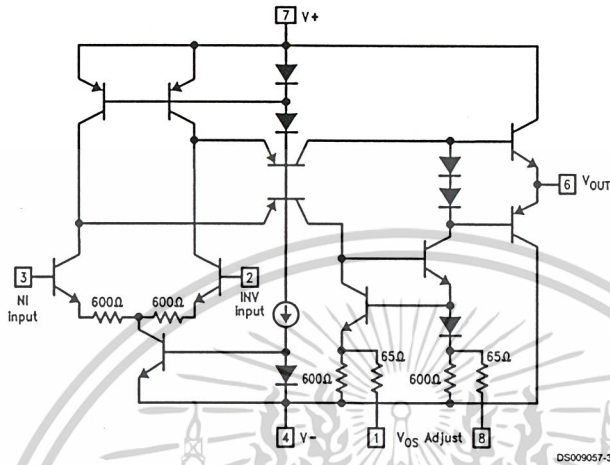


**Bias Current vs Common-Mode Voltage**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Simplified Schematic



## Applications Tips

The LM6361 has been compensated for unity-gain operation. Since this compensation involved adding emitter-degeneration resistors to the op amp's input stage, the open-loop gain was reduced as the stability increased. Gain error due to reduced  $A_{VOL}$  is most apparent at high gains; thus, for gains between 5 and 25, the less-compensated LM6364 should be used, and the uncompensated LM6365 is appropriate for gains of 25 or more. The LM6361, LM6364, and LM6365 have the same high slew rate, regardless of their compensation.

The LM6361 is unusually tolerant of capacitive loads. Most op amps tend to oscillate when their load capacitance is greater than about 200 pF (especially in low-gain circuits). The LM6361's compensation is effectively increased with load capacitance, reducing its bandwidth and increasing its stability.

Power supply bypassing is not as critical for the LM6361 as it is for other op amps in its speed class. Bypassing will, how-

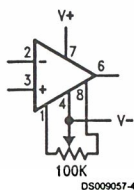
ever, improve the stability and transient response and is recommended for every design. 0.01  $\mu\text{F}$  to 0.1  $\mu\text{F}$  ceramic capacitors should be used (from each supply "rail" to ground); if the device is far away from its power supply source, an additional 2.2  $\mu\text{F}$  to 10  $\mu\text{F}$  of tantalum may provide extra noise reduction.

Keep all leads short to reduce stray capacitance and lead inductance, and make sure ground paths are low-impedance, especially where heavier currents will be flowing. Stray capacitance in the circuit layout can cause signal coupling across adjacent nodes and can cause gain to unintentionally vary with frequency.

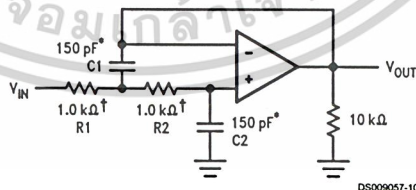
Breadboarded circuits will work best if they are built using generic PC boards with a good ground plane. If the op amps are used with sockets, as opposed to being soldered into the circuit, the additional input capacitance may degrade circuit performance.

## Typical Applications

### Offset Voltage Adjustment



### 1 MHz Low-Pass Filter

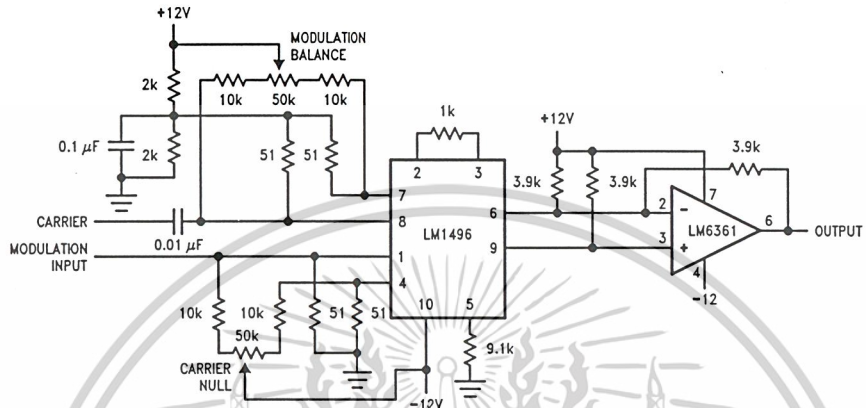


†1% tolerance  
 \*Matching determines filter precision  
 $f_c = (2\pi \sqrt{(R1 R2 C1 C2)})^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Typical Applications (Continued)

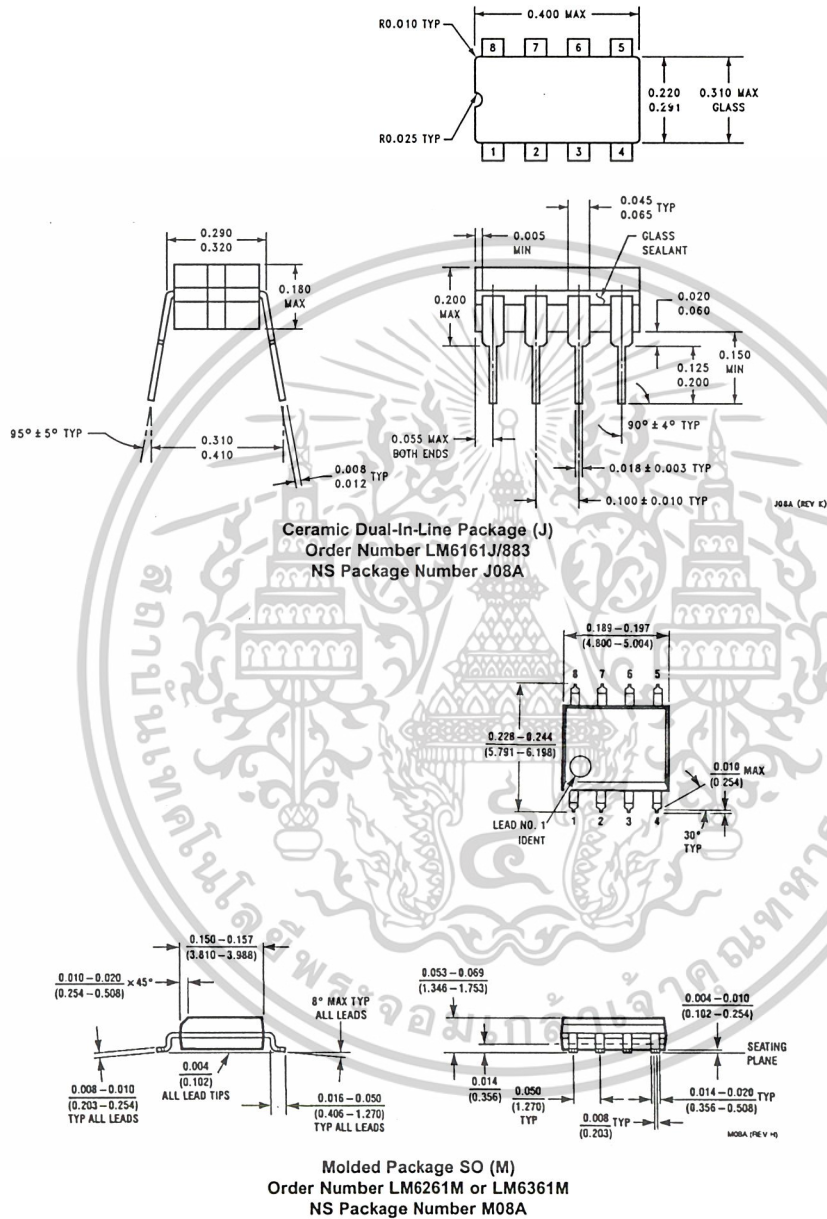
### Modulator with Differential-to-Single-Ended Converter



DS009057-11

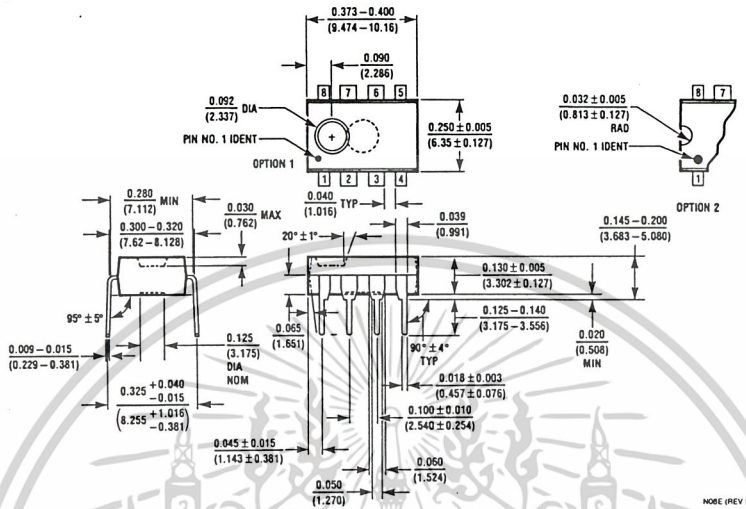
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Physical Dimensions** inches (millimeters) unless otherwise noted

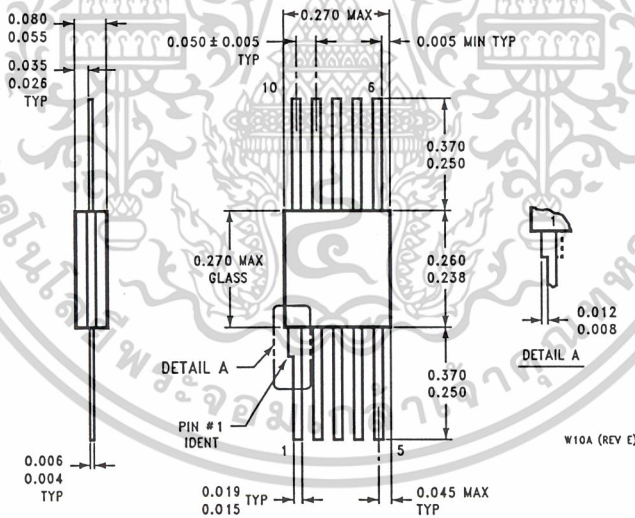


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Physical Dimensions** inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)



**Moulded Dual-In-Line Package (N)**  
Order Number LM6261N or LM6361N  
NS Package Number N08E



**10-Pin Ceramic Flatpak**  
Order Number LM6161W/883  
NS Package Number W10A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Notes



**LIFE SUPPORT POLICY**

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT AND GENERAL COUNSEL OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

 National Semiconductor Corporation  
Americas  
Tel: 1-800-272-9959  
Fax: 1-800-737-7018  
Email: support@nsc.com  
[www.national.com](http://www.national.com)

National Semiconductor Europe  
Fax: +49 (0) 1 80-530 85 86  
Email: europe.support@nsc.com  
Deutsch Tel: +49 (0) 1 80-530 85 85  
English Tel: +49 (0) 1 80-532 78 32  
Français Tel: +49 (0) 1 80-532 93 58  
Italiano Tel: +49 (0) 1 80-534 16 80

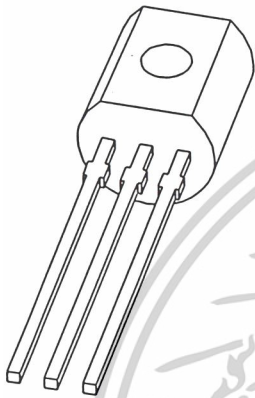
National Semiconductor Asia Pacific Customer Response Group  
Tel: 65-2544466  
Fax: 65-2504466  
Email: sea.support@nsc.com

National Semiconductor Japan Ltd.  
Tel: 81-3-5639-7560  
Fax: 81-3-5639-7507

National does not assume any responsibility for use of any circuitry described, no circuit patent licenses are implied and National reserves the right at any time without notice to change said circuitry and specifications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DATA SHEET



## 2N3904 NPN switching transistor

Product specification  
Supersedes data of 1997 Jul 15

1999 Apr 23

# NPN switching transistor

2N3904

## FEATURES

- Low current (max. 200 mA)
- Low voltage (max. 40 V).

## APPLICATIONS

- High-speed switching.

## DESCRIPTION

NPN switching transistor in a TO-92; SOT54 plastic package. PNP complement: 2N3906.

## PINNING

PIN	DESCRIPTION
1	collector
2	base
3	emitter

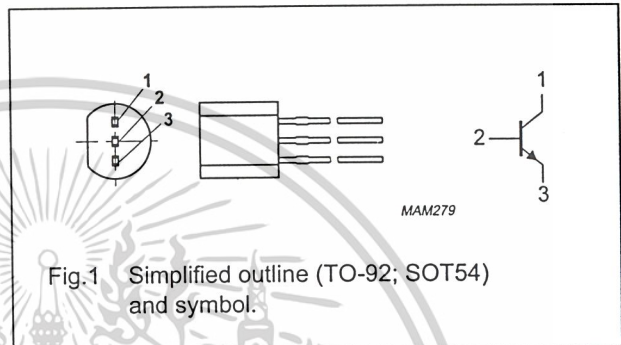


Fig.1 Simplified outline (TO-92; SOT54) and symbol.

## LIMITING VALUES

In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
$V_{CBO}$	collector-base voltage	open emitter	-	60	V
$V_{CEO}$	collector-emitter voltage	open base	-	40	V
$V_{EBO}$	emitter-base voltage	open collector	-	6	V
$I_C$	collector current (DC)		-	200	mA
$I_{CM}$	peak collector current		-	300	mA
$I_{BM}$	peak base current		-	100	mA
$P_{tot}$	total power dissipation	$T_{amb} \leq 25\text{ }^\circ\text{C}$ ; note 1	-	500	mW
$T_{stg}$	storage temperature		-65	+150	$^\circ\text{C}$
$T_j$	junction temperature		-	150	$^\circ\text{C}$
$T_{amb}$	operating ambient temperature		-65	+150	$^\circ\text{C}$

## Note

1. Transistor mounted on an FR4 printed-circuit board.

## NPN switching transistor

2N3904

## THERMAL CHARACTERISTICS

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	VALUE	UNIT
$R_{th\ j-a}$	thermal resistance from junction to ambient	note 1	250	K/W

## Note

1. Transistor mounted on an FR4 printed-circuit board.

## CHARACTERISTICS

 $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
$I_{CBO}$	collector cut-off current	$I_E = 0; V_{CB} = 30\text{ V}$	–	50	nA
$I_{EBO}$	emitter cut-off current	$I_C = 0; V_{EB} = 6\text{ V}$	–	50	nA
$h_{FE}$	DC current gain	$V_{CE} = 1\text{ V}$ ; note 1 $I_C = 0.1\text{ mA}$ $I_C = 1\text{ mA}$ $I_C = 10\text{ mA}$ $I_C = 50\text{ mA}$ $I_C = 100\text{ mA}$	60 80 100 60 30	– – 300 – –	
$V_{CEsat}$	collector-emitter saturation voltage	$I_C = 10\text{ mA}; I_B = 1\text{ mA}$ ; note 1 $I_C = 50\text{ mA}; I_B = 5\text{ mA}$ ; note 1	–	200 200	mV mV
$V_{BEsat}$	base-emitter saturation voltage	$I_C = 10\text{ mA}; I_B = 1\text{ mA}$ ; note 1 $I_C = 50\text{ mA}; I_B = 5\text{ mA}$ ; note 1	–	850 950	mV mV
$C_c$	collector capacitance	$I_E = I_C = 0; V_{CB} = 5\text{ V}; f = 1\text{ MHz}$	–	4	pF
$C_e$	emitter capacitance	$I_C = I_E = 0; V_{EB} = 500\text{ mV}; f = 1\text{ MHz}$	–	8	pF
$f_T$	transition frequency	$I_C = 10\text{ mA}; V_{CE} = 20\text{ V}; f = 100\text{ MHz}$	300	–	MHz
F	noise figure	$I_C = 100\text{ }\mu\text{A}; V_{CE} = 5\text{ V}; R_S = 1\text{ k}\Omega$ ; $f = 10\text{ Hz to }15.7\text{ kHz}$	–	5	dB

Switching times (between 10% and 90% levels); see Fig.2

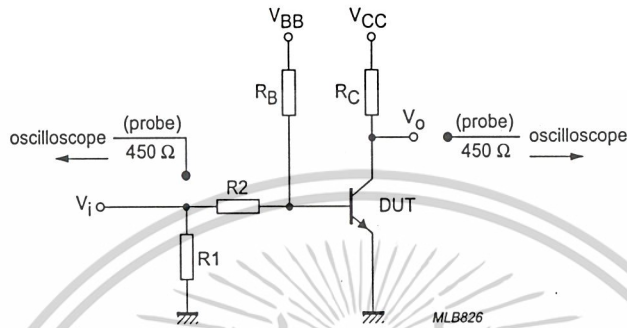
$t_{on}$	turn-on time	$I_{Con} = 10\text{ mA}; I_{Bon} = 1\text{ mA};$ $I_{Boff} = -1\text{ mA}$	–	65	ns
$t_d$	delay time		–	35	ns
$t_r$	rise time		–	35	ns
$t_{off}$	turn-off time		–	240	ns
$t_s$	storage time		–	200	ns
$t_f$	fall time		–	50	ns

## Note

1. Pulse test:  $t_p \leq 300\text{ }\mu\text{s}$ ;  $\delta \leq 0.02$ .

NPN switching transistor

2N3904



$V_i = 5\text{ V}$ ;  $T = 500\ \mu\text{s}$ ;  $t_p = 10\ \mu\text{s}$ ;  $t_r = t_f \leq 3\ \text{ns}$ .  
 $R_1 = 56\ \Omega$ ;  $R_2 = 2.5\ \text{k}\Omega$ ;  $R_B = 3.9\ \text{k}\Omega$ ;  $R_C = 270\ \Omega$ .  
 $V_{BB} = -1.9\ \text{V}$ ;  $V_{CC} = 3\ \text{V}$ .  
 Oscilloscope input impedance  $Z_i = 50\ \Omega$ .

Fig.2 Test circuit for switching times.

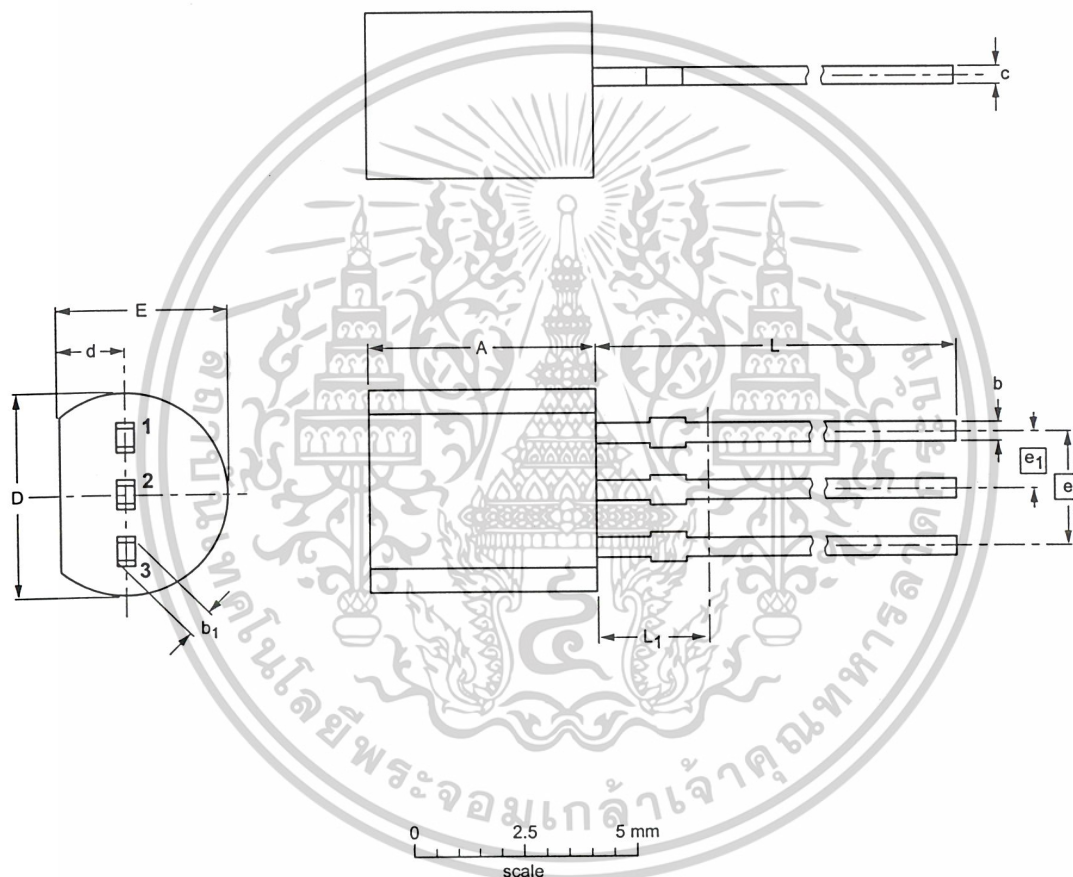
NPN switching transistor

2N3904

PACKAGE OUTLINE

Plastic single-ended leaded (through hole) package; 3 leads

SOT54



DIMENSIONS (mm are the original dimensions)

UNIT	A	b	b <sub>1</sub>	c	D	d	E	e	e <sub>1</sub>	L	L <sub>1</sub> (1)
mm	5.2 5.0	0.48 0.40	0.66 0.56	0.45 0.40	4.8 4.4	1.7 1.4	4.2 3.6	2.54	1.27	14.5 12.7	2.5

Note

1. Terminal dimensions within this zone are uncontrolled to allow for flow of plastic and terminal irregularities.

OUTLINE VERSION	REFERENCES			EUROPEAN PROJECTION	ISSUE DATE
	IEC	JEDEC	EIAJ		
SOT54		TO-92	SC-43		97-02-28

## NPN switching transistor

2N3904

## DEFINITIONS

Data sheet status	
Objective specification	This data sheet contains target or goal specifications for product development.
Preliminary specification	This data sheet contains preliminary data; supplementary data may be published later.
Product specification	This data sheet contains final product specifications.
Limiting values	
Limiting values given are in accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134). Stress above one or more of the limiting values may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only and operation of the device at these or at any other conditions above those given in the Characteristics sections of the specification is not implied. Exposure to limiting values for extended periods may affect device reliability.	
Application information	
Where application information is given, it is advisory and does not form part of the specification.	

## LIFE SUPPORT APPLICATIONS

These products are not designed for use in life support appliances, devices, or systems where malfunction of these products can reasonably be expected to result in personal injury. Philips customers using or selling these products for use in such applications do so at their own risk and agree to fully indemnify Philips for any damages resulting from such improper use or sale.

NPN switching transistor

2N3904

NOTES



# Philips Semiconductors – a worldwide company

**Argentina:** see South America

**Australia:** 34 Waterloo Road, NORTH RYDE, NSW 2113,  
Tel. +61 2 9805 4455, Fax. +61 2 9805 4466

**Austria:** Computerstr. 6, A-1101 WIEN, P.O. Box 213,  
Tel. +43 1 60 101 1248, Fax. +43 1 60 101 1210

**Belarus:** Hotel Minsk Business Center, Bld. 3, r. 1211, Volodarski Str. 6,  
220050 MINSK, Tel. +375 172 20 0733, Fax. +375 172 20 0773

**Belgium:** see The Netherlands

**Brazil:** see South America

**Bulgaria:** Philips Bulgaria Ltd., Energoproject, 15th floor,  
51 James Bourchier Blvd., 1407 SOFIA,  
Tel. +359 2 68 9211, Fax. +359 2 68 9102

**Canada:** PHILIPS SEMICONDUCTORS/COMPONENTS,  
Tel. +1 800 234 7381, Fax. +1 800 943 0087

**China/Hong Kong:** 501 Hong Kong Industrial Technology Centre,  
72 Tat Chee Avenue, Kowloon Tong, HONG KONG,  
Tel. +852 2319 7888, Fax. +852 2319 7700

**Colombia:** see South America

**Czech Republic:** see Austria

**Denmark:** Sydhavnsgade 23, 1780 COPENHAGEN V,  
Tel. +45 33 29 3333, Fax. +45 33 29 3905

**Finland:** Sinikalliontie 3, FIN-02630 ESPOO,  
Tel. +358 9 615 800, Fax. +358 9 6158 0920

**France:** 51 Rue Carnot, BP317, 92156 SURESNES Cedex,  
Tel. +33 1 4099 6161, Fax. +33 1 4099 6427

**Germany:** Hammerbrookstraße 69, D-20097 HAMBURG,  
Tel. +49 40 2353 60, Fax. +49 40 2353 6300

**Hungary:** see Austria

**India:** Philips INDIA Ltd, Band Box Building, 2nd floor,  
254-D, Dr. Annie Besant Road, Worli, MUMBAI 400 025,  
Tel. +91 22 493 8541, Fax. +91 22 493 0966

**Indonesia:** PT Philips Development Corporation, Semiconductors Division,  
Gedung Philips, Jl. Buncit Raya Kav.99-100, JAKARTA 12510,  
Tel. +62 21 794 0040 ext. 2501, Fax. +62 21 794 0080

**Ireland:** Newstead, Clonskeagh, DUBLIN 14,  
Tel. +353 1 7640 000, Fax. +353 1 7640 200

**Israel:** RAPAC Electronics, 7 Kehilat Saloniki St, PO Box 18053,  
TEL AVIV 61180, Tel. +972 3 645 0444, Fax. +972 3 649 1007

**Italy:** PHILIPS SEMICONDUCTORS, Piazza IV Novembre 3,  
20124 MILANO, Tel. +39 2 6752 2531, Fax. +39 2 6752 2557

**Japan:** Philips Bldg 13-37, Kohnan 2-chome, Minato-ku,  
TOKYO 108-8507, Tel. +81 3 3740 5130, Fax. +81 3 3740 5077

**Korea:** Philips House, 260-199 Itaewon-dong, Yongsan-ku, SEOUL,  
Tel. +82 2 709 1412, Fax. +82 2 709 1415

**Malaysia:** No. 76 Jalan Universiti, 46200 PETALING JAYA, SELANGOR,  
Tel. +60 3 750 5214, Fax. +60 3 757 4880

**Mexico:** 5900 Gateway East, Suite 200, EL PASO, TEXAS 79905,  
Tel. +9-5 800 234 7381, Fax +9-5 800 943 0087

**Middle East:** see Italy

**Netherlands:** Postbus 90050, 5600 PB EINDHOVEN, Bldg. VB,  
Tel. +31 40 27 82785, Fax. +31 40 27 88399

**New Zealand:** 2 Wagener Place, C.P.O. Box 1041, AUCKLAND,  
Tel. +64 9 849 4160, Fax. +64 9 849 7811

**Norway:** Box 1, Manglerud 0612, OSLO,  
Tel. +47 22 74 8000, Fax. +47 22 74 8341

**Pakistan:** see Singapore

**Philippines:** Philips Semiconductors Philippines Inc.,  
106 Valero St. Salcedo Village, P.O. Box 2108 MCC, MAKATI,  
Metro MANILA, Tel. +63 2 816 6380, Fax. +63 2 817 3474

**Poland:** Ul. Lukiska 10, PL 04-123 WARSZAWA,  
Tel. +48 22 612 2831, Fax. +48 22 612 2327

**Portugal:** see Spain

**Romania:** see Italy

**Russia:** Philips Russia, Ul. Usatcheva 35A, 119048 MOSCOW,  
Tel. +7 095 755 6918, Fax. +7 095 755 6919

**Singapore:** Lorong 1, Toa Payoh, SINGAPORE 319762,  
Tel. +65 350 2538, Fax. +65 251 6500

**Slovakia:** see Austria

**Slovenia:** see Italy

**South Africa:** S.A. PHILIPS Pty Ltd., 195-215 Main Road Martindale,  
2092 JOHANNESBURG, P.O. Box 7430 Johannesburg 2000,  
Tel. +27 11 470 5911, Fax. +27 11 470 5494

**South America:** Al. Vicente Pinzon, 173, 6th floor,  
04547-130 SÃO PAULO, SP, Brazil,  
Tel. +55 11 821 2333, Fax. +55 11 821 2382

**Spain:** Balmes 22, 08007 BARCELONA,  
Tel. +34 93 301 6312, Fax. +34 93 301 4107

**Sweden:** Koltbygatan 7, Akalla, S-16485 STOCKHOLM,  
Tel. +46 8 5985 2000, Fax. +46 8 5985 2745

**Switzerland:** Allmendstrasse 140, CH-8027 ZÜRICH,  
Tel. +41 1 488 2741 Fax. +41 1 488 3263

**Taiwan:** Philips Semiconductors, 6F, No. 96, Chien Kuo N. Rd., Sec. 1,  
TAIPEI, Taiwan Tel. +886 2 2134 2886, Fax. +886 2 2134 2874

**Thailand:** PHILIPS ELECTRONICS (THAILAND) Ltd.,  
209/2 Sanpavuth-Bangna Road Prakanong, BANGKOK 10260,  
Tel. +66 2 745 4090, Fax. +66 2 398 0793

**Turkey:** Talatpasa Cad. No. 5, 80640 GÜLTEPE/ISTANBUL,  
Tel. +90 212 279 2770, Fax. +90 212 282 6707

**Ukraine:** PHILIPS UKRAINE, 4 Patrice Lumumba str., Building B, Floor 7,  
252042 KIEV, Tel. +380 44 264 2776, Fax. +380 44 268 0461

**United Kingdom:** Philips Semiconductors Ltd., 276 Bath Road, Hayes,  
MIDDLESEX UB3 5BX, Tel. +44 181 730 5000, Fax. +44 181 754 8421

**United States:** 811 East Arques Avenue, SUNNYVALE, CA 94088-3409,  
Tel. +1 800 234 7381, Fax. +1 800 943 0087

**Uruguay:** see South America

**Vietnam:** see Singapore

**Yugoslavia:** PHILIPS, Trg N. Pasica 5/v, 11000 BEOGRAD,  
Tel. +381 11 62 5344, Fax. +381 11 63 5777

For all other countries apply to: Philips Semiconductors,  
International Marketing & Sales Communications, Building BE-p, P.O. Box 218,  
5600 MD EINDHOVEN, The Netherlands, Fax. +31 40 27 24825

Internet: <http://www.semiconductors.philips.com>

© Philips Electronics N.V. 1999

SCA63

All rights are reserved. Reproduction in whole or in part is prohibited without the prior written consent of the copyright owner.

The information presented in this document does not form part of any quotation or contract, is believed to be accurate and reliable and may be changed without notice. No liability will be accepted by the publisher for any consequence of its use. Publication thereof does not convey nor imply any license under patent- or other industrial or intellectual property rights.

Printed in The Netherlands

115002/00/03/pp8

Date of release: 1999 Apr 23

Document order number: 9397 750 05386

Let's make things better.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้ทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
Philips Semiconductors  PHILIPS  
แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีไปใช้

# LF351

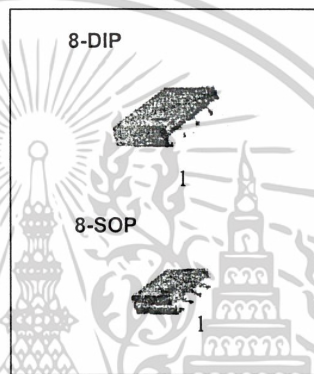
## Single Operational Amplifier (JFET)

### Features

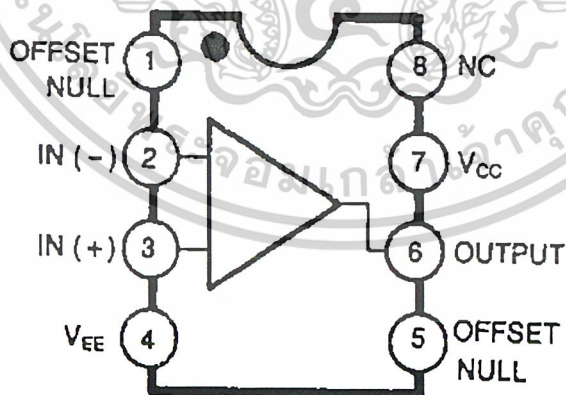
- Internally trimmed offset voltage: 10mV
- Low input bias current : 50pA
- Wide gain bandwidth : 4MHz
- High slew rate : 13V/μs
- High input impedance :  $10^{12}\Omega$

### Description

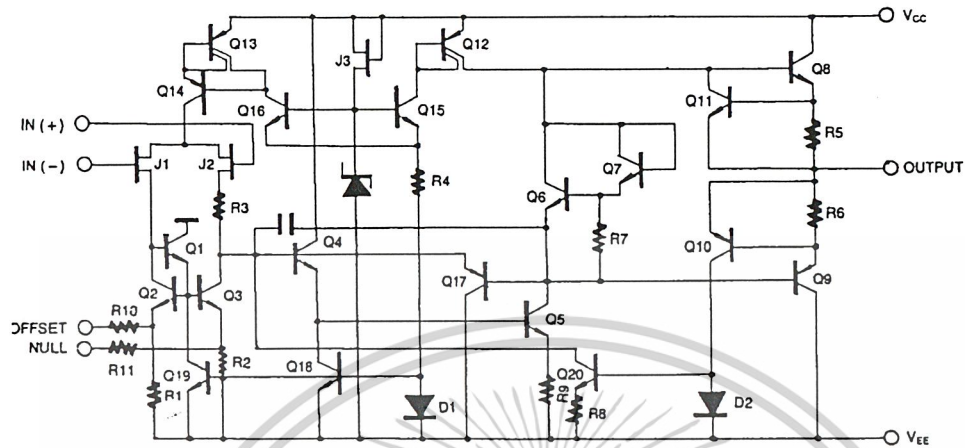
The LF351 is JFET input operational amplifier with an internally compensated input offset voltage. The JFET input device provides wide bandwidth, low input bias currents and offset currents.



### Internal Block Diagram



Schematic Diagram



Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage	VCC	±18	V
Differential Input Voltage	VI(DIFF)	30	V
Input Voltage Range	VI	±15	V
Output Short Circuit Duration	-	Continuous	-
Power Dissipation	PD	500	mW
Operating Temperature	TOPR	0 ~ +70	°C
Storage Temperature Range	TSTG	-65 ~ +150	°C

## Electrical Characteristics

( $V_{CC} = +15V$ ,  $V_{EE} = -15V$ ,  $T_A = 25^\circ C$ . unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Input Offset Voltage	$V_{IO}$	$R_S = 10k\Omega$ $0^\circ C \leq T_A \leq 70^\circ C$	-	5.0	10	mV
			-	-	13	
Input Offset Voltage Drift (Note1)	$\Delta V_{IO}/\Delta T$	$R_S = 10k\Omega$ $0^\circ C \leq T_A \leq 70^\circ C$	-	10	-	$\mu V/^\circ C$
Input Offset Current	$I_{IO}$	$0^\circ C \leq T_A \leq 70^\circ C$	-	25	100	pA
			-	-	4	nA
Input Bias Current	$I_{BAIS}$	$0^\circ C \leq T_A \leq 70^\circ C$	-	50	200	pA
			-	-	8	nA
Input Resistance (Note1)	$R_I$	-	-	$10^{12}$	-	$\Omega$
Large Signal Voltage Gain	$G_V$	$V_{O(P-P)} = \pm 10V$ $R_L = 2k\Omega$ $0^\circ C \leq T_A \leq 70^\circ C$	25	100	-	V/mV
			15	-	-	
Output Voltage Swing	$V_{O(P-P)}$	$R_L = 10k\Omega$	$\pm 12$	$\pm 13.5$	-	V
Input Voltage Range	$V_{I(R)}$	-	$\pm 11$	+15 -12	-	V
Common Mode Rejection Ratio	CMRR	$R_S \leq 10k\Omega$	70	100	-	dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$R_S \leq 10k\Omega$	70	100	-	dB
Power Supply Current	$I_{CC}$	-	-	2.3	3.4	mA
Slew Rate (Note1)	SR	$G_V = 1$	-	13	-	V/ $\mu s$
Gain-Bandwidth Product (Note1)	GBW	-	-	4	-	MHz

### Note :

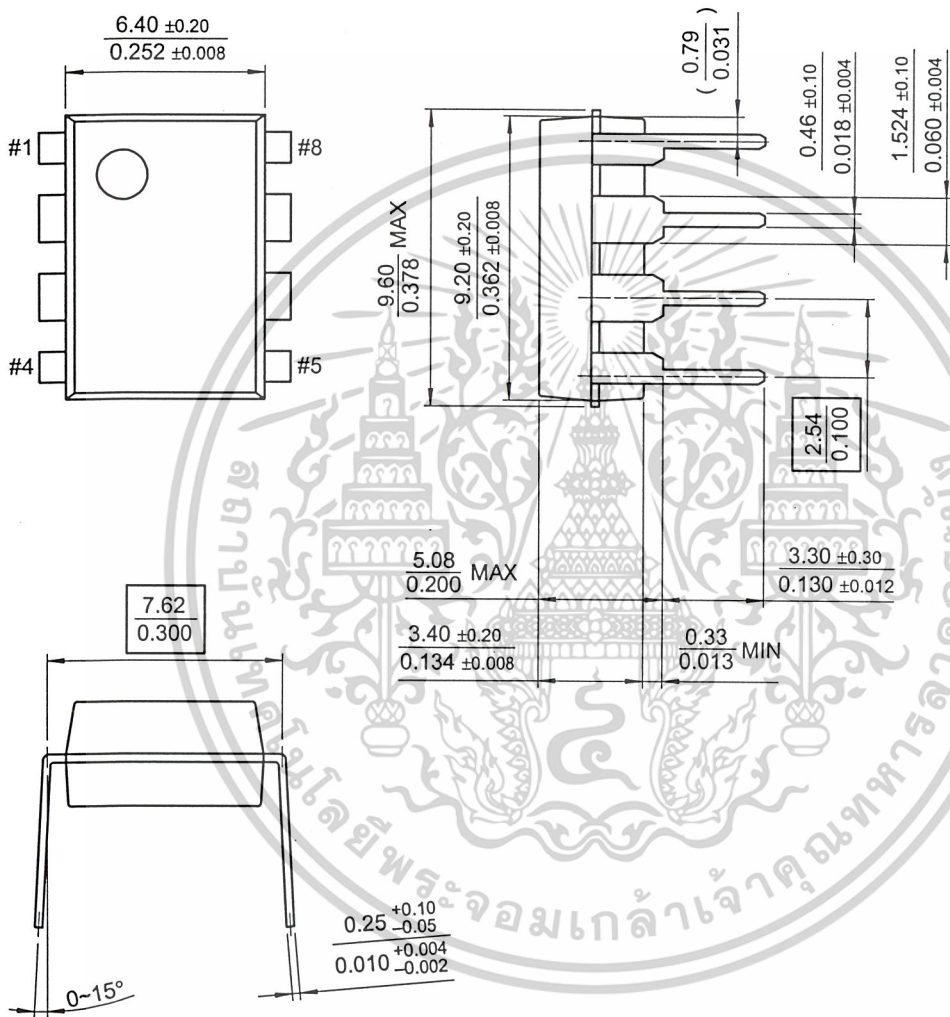
1. Guaranteed by design.

# Mechanical Dimensions

## Package

Dimensions in millimeters

### 8-DIP





## Ordering Information

Product Number	Package	Operating Temperature
LF351N	8-DIP	0 ~ + 70°C
LF351M	8-SOP	





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**DISCLAIMER**

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS.

**LIFE SUPPORT POLICY**

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

- 1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury of the user.
- 2. A critical component in any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

[www.fairchildsemi.com](http://www.fairchildsemi.com)

6/1/01 0.0m 001  
Stock#DSxxxxxxx  
© 2001 Fairchild Semiconductor Corporation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หนังสืออ้างอิง

1. “ OPTOELECTRONICS ”, 103-141
2. Harol B.killen,Fiber Optic Communication, McGraw-Hill, 1988
3. Forseph C.Palais, Fiber Optic Communication, McGraw-Hill, 1988
4. Kimberil S.Hansen, Fiber Optic Reference Guide, Focal Press, 1996
5. ผศ.อภิรักษ์ มัธยานนท์, การสื่อสารเส้นใยแสง, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้