

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเชื่อมต่อสัญญาณโทรศัพท์ในเส้นใยนำแสง



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2541

เลขหม.....

เลขทะเบียน..... 36708

วัน, เดือน, ปี 23 ส.ค. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fiber-Optic Link Telephone



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement  
for the Degree of Bachelor of Science  
Department of Applied Physics  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
1998

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หัวข้อ ครงงานพิเศษ	การเชื่อมต่อสัญญาณโทรศัพท์ในเส้นใยนำแสง
โดย	นายไพโรจน์ จงใจรัก นายภาณุพงศ์ ลิขิตชนสมบัติ
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล ผศ. วิชิต ศิริโชติ
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2541

### บทคัดย่อ

ในการเชื่อมต่อสัญญาณโทรศัพท์ในเส้นใยนำแสงแบบ Simplex โดยใช้เทคนิค PFM ในโครงการนี้จะประกอบส่วนใหญ่ๆ 5 ส่วนคือส่วนสัญญาณโทรศัพท์ ส่วนวงจร PFM ส่วนวงจรส่งสัญญาณ ส่วนวงจรรับสัญญาณและส่วนสายส่งสัญญาณ(เส้นใยนำแสง)โดยเมื่อสัญญาณโทรศัพท์ถูกมอดูเลตแบบพัลส์ฟรีควอนตัมมอดูเลชัน(PFM)โดยไอซี LM 566 และจะถูกเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณทางแสงผ่านไปในเส้นใยนำแสงโดยวงจรส่งสัญญาณ แล้วสัญญาณทางแสงจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณ PFM โดยวงจรรับสัญญาณจากนั้นสัญญาณ PFM จะถูกดีมอดูเลตโดยไอซี LM 565 ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าที่เหมือนสัญญาณจากโทรศัพท์ส่งแล้วนำสัญญาณนี้เข้าไปในโทรศัพท์รับให้แปลงเป็นสัญญาณเสียงต่อไป

Special Project Title	Fiber-optic Link Telephone
Name	Mr. Pairoj Jongjairak Mr. Panupong Likittanasombut
Special project Advisors	Assistant Professor Dr.Sirisak Techathaweekul Assistant Professor Wichit Sirichote
Department	Applied Physics
Academic Year	1998

### Abstract

The purpose of this is to build up a simplex telephone system for sending voice by using Pulse Frequency Modulation ( PFM ) technique via fiber-optic link. The system consist of 5 main parts , namely telephone set , PFM circuit , optical transmitter and optical receiver and optical transmission line. Voice signal gets into the telephone set and then PFM circuit which uses LM 566 , the voice signal will be converted into digital signal goes into the driving circuit of the optical transmitter part , the optical signal will be launched into a plastic optical fiber. A photodiode is used as a receiver that converts optical signal into electrical signal. This signal will be demodulated by using LM 565 and then the voice signal will be recovered at the handset of another telephone. It has been found that the system works alright.

## กิตติกรรม

โครงการพิเศษนี้จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงโดยสมบูรณ์ได้ ถ้าปราศจากความช่วยเหลือจากบุคคลดังต่อไปนี้

บิดา มารดา ผู้ให้ชีวิตและทุกสิ่งทุกอย่าง

ผศ.ดร. ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุลและผศ. วิจิตต์ ศิริโชติ ที่ให้คำปรึกษาคำแนะนำและความช่วยเหลือต่างๆทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

อ. สุน จ่างประยูร สำหรับอุปกรณ์ Oscilloscope และ Function generator ที่เยี่ยมมาก

อ.ธวัชชัย ชาวประเสริฐ สำหรับห้องทำ Project

คุณเศกสิทธิ์, คุณภาณุ, คุณปิติพันธ์และรณพ สำหรับรายงาน, Hardware , อุปกรณ์จากบ้านหม้อ

คุณเดช สำหรับห้องที่ให้พักพิงตอนทำ project และคำแนะนำต่างๆ

สุดท้ายขอขอบคุณเพื่อนและน้องๆทุกคนที่ให้การกำลังใจเสมอมา

ไพโรจน์ จงใจรัก  
ภาณุพงศ์ ลิขิตธนสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญรูป	ง
สารบัญตาราง	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์ในการทำโครงการพิเศษ	1
1.2 ประโยชน์ที่ได้รับ	1
บทที่ 2 ลักษณะพื้นฐานของแสง	2
2.1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	2
2.2 แสงเป็นคลื่น	3
2.3 แสงเป็นอนุภาค	4
2.4 ความเร็วของแสง	5
2.5 การสะท้อนแบบส่วเข้าและส่วออก	6
2.6 กฎของสเนลล์	8
2.7 เส้นโยนำแสง	9
2.8 นิวมอริคอลลอเพอเจอร์	11
2.9 การสะท้อนของเฟรสเนล	11
บทที่ 3 การสื่อสารด้วยเส้นโยนำแสง	12
3.1 วิวัฒนาการของการสื่อสารด้วยแสง	12
3.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของการสื่อสารด้วยแสง	14
3.3 เส้นโยนำแสง	15
3.3.1 โครงสร้างพื้นฐานของเส้นโยนำแสง	15
3.3.2 การเคลื่อนที่ของแสงในเส้นโยนำแสง	16
3.3.3 การแตกกระจายของรูปสัญญาณจากเส้นโยนำแสง	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 ชนิดของเส้นใยนำแสง	19
3.4 ความสูญเสียของสัญญาณในระบบการสื่อสารด้วยแสง	21
3.5 แถบการส่งสัญญาณของเส้นใยนำแสง	22
3.6 ข้อดีของการสื่อสารเส้นใยแก้วนำแสง	23
บทที่ 4 ระบบออปโตอิเล็กทรอนิกส์	24
4.1 แหล่งกำเนิดแสง	24
4.1.1 ช่วงทำงานของความยาวคลื่น	25
4.1.2 พลังงานและการเชื่อมต่อของแสง	25
4.1.3 แหล่งกำเนิดแสง LED	25
4.1.4 แหล่งกำเนิดเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์	30
4.1.4.1 การปล่อยแสงด้วยการกระตุ้น	30
4.1.4.2 Population Inversion	31
4.1.4.3 การจัดรูปลำของเลเซอร์	31
4.1.5 ความแตกต่างของแหล่งกำเนิด	32
4.1.6 ความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอด	33
4.1.7 สเปกตรัมของเลเซอร์	34
4.1.8 Fiber Transmission windows	34
4.2 วงจรรับ	36
4.2.1 การออกแบบตัวส่งแสง	36
4.2.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของตัวส่งแสง	36
4.2.3 การออกแบบตัวส่งแสงโดยใช้ LED อย่างง่าย	39
4.2.4 การออกแบบตัวส่งแสงโดยใช้เลเซอร์ไดโอดอย่างง่าย	39
4.3 อุปกรณ์รับแสง	41
4.3.1 พีเอ็นไฟโตไดโอด	42
4.3.2 พีไอเอ็นไฟโตไดโอด	43
4.3.3 อะวาแลนซ์ไฟโตไดโอด	45
4.4 คุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง	46
4.5 วงจรอุปกรณ์รับแสง	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.1	วงจรรับแสงแบบโฟโต้ไดโอด	48
4.5.2	วงจรรับแสงแบบอะวาแลนซ์ไดโอด	49
บทที่ 5	หลักการและแนวคิดในโครงการ	52
5.1	โทรศัพท์ส่ง	52
5.2	ส่วนมอดูเลชัน	52
5.3	ส่วนส่งสัญญาณ	53
5.4	ส่วนรับสัญญาณ	53
5.5	ส่วนขยายสัญญาณ	53
5.6	ส่วนดีมอดูเลชัน	54
5.7	โทรศัพท์รับ	54
บทที่ 6	การคำนวณและการออกแบบวงจร	55
6.1.1	วงจรภาคส่ง	55
6.1.2	วงจรโทรศัพท์ส่ง	55
6.1.3	วงจรพัลส์พีริเคนซีมอดูเลชัน ( PFM )	56
	วงจรรับสัญญาณ	
6.2.1	วงจรภาครับ	57
6.2.1	วงจรภาคก่อนขยายแบบทรานส์อินพีแดนซ์	61
6.2.2	วงจรขยายสัญญาณ	62
6.2.3	วงจรดีมอดูเลชัน	63
6.2.4	วงจรภาคยกระดับและขยายสัญญาณ	65
6.2.5	วงจรโทรศัพท์รับ	66
บทที่ 7	ผลการทดลองและสรุปผล	66
7.1.1	ผลการทดลอง	68
7.1.1	สัญญาณอิมพัลจากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์	68
7.1.2	สัญญาณพาหะ	69
7.1.3	สัญญาณ PFM	70
7.1.4	สัญญาณจากวงจรรับสัญญาณ	71
7.1.5	สัญญาณเอาร์ทัพจากการดีมอดูเลต	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1.6 สัญญาณอิมพุดจากโทรศัพท์ส่ง	73
7.1.7 สัญญาณ PFM	74
7.1.8 สัญญาณเอาทพุทที่เข้ามายังโทรศัพท์รับ	75
7.1.9 สรุปผลการทดลอง	76
บทที่ 8 วิจารณ์ผลการทดลองและขอบเขตในการทำโครงการ	77
8.1 วิจารณ์ผลการทดลอง	77
8.2 ขอบเขตในการทำโครงการ	78
ภาคผนวก ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์	
เอกสารอ้างอิง	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

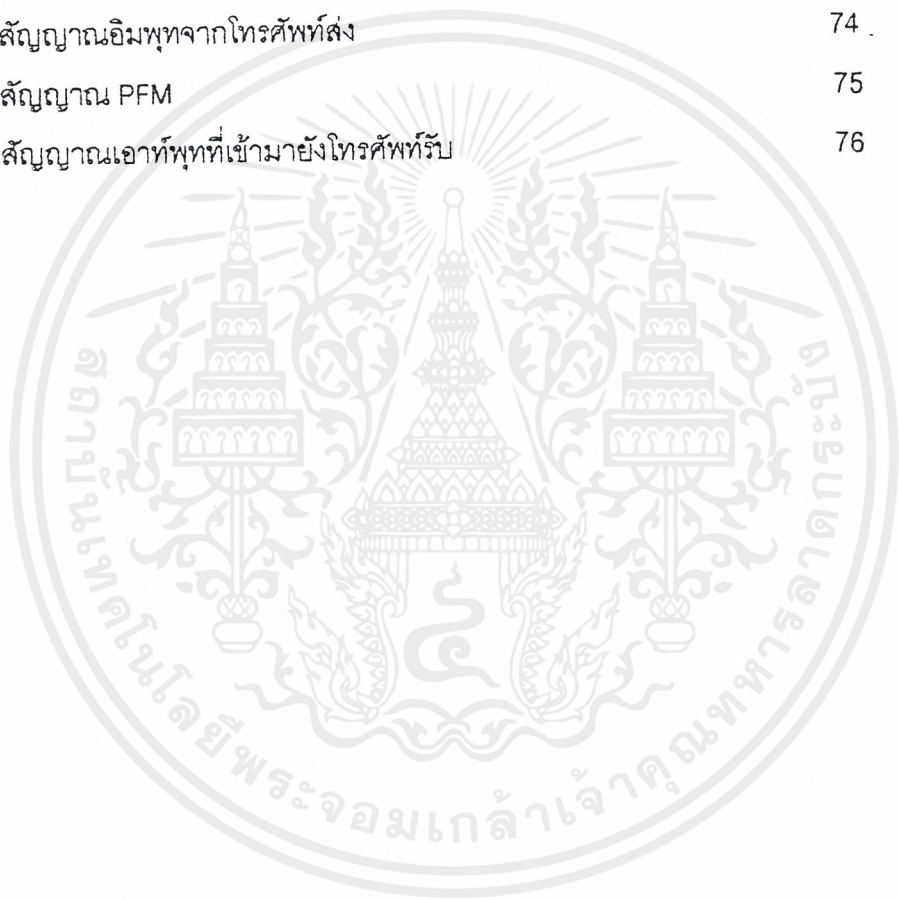
	หน้า
รูปที่ 2-1 แสดงลักษณะการเดินทางของแสง	5
รูปที่ 2-2 แสดงแสงที่เกิดการหักเหและเกิดการสะท้อน	6
รูปที่ 2-3 ( a ) การสะท้อนแบบลู่เข้า , $n_1 < n_2$	7
( b ) การสะท้อนแบบลู่ออก , $n_1 > n_2$	7
( c ) การสะท้อนกลับหมด , $n_1 \gg n_2$	7
รูปที่ 2-4 แสดงภาคตัดขวางของเส้นใยนำแสง	9
รูปที่ 2-5 แสดงการเดินทางของแสงภายในเส้นใยนำแสง	9
รูปที่ 2-6 แสดง Acceptance Cones	10
รูปที่ 3-1 แสดงการทำงานของไฟโตไฟน์	13
รูปที่ 3-2 แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของระบบการสื่อสารเส้นใยนำแสง	14
รูปที่ 3-3 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเส้นใยนำแสง	15
รูปที่ 3-4 แสดงการหักเหของแสง	16
รูปที่ 3-5 แสดงการหักเหของแสงผ่านแท่งแก้วตัน	17
รูปที่ 3-6 แสดงการเคลื่อนที่ของแสงภายในแท่งแก้ว	17
รูปที่ 3-7 แสดงการเดินทางของแสงภายในเส้นใยนำแสง	19
รูปที่ 3-8 แสดงดัชนีหักเหของแสงของเส้นใยนำแสงชนิดดัชนีชั้นบันได	20
รูปที่ 3-9 แสดงดัชนีหักเหของแสงของเส้นใยนำแสงชนิดดัชนีรูปมน	20
รูปที่ 3-10 แสดงการสูญเสียจากการโค้งงอเส้นใยนำแสง	20
รูปที่ 4-1 แสดงชื่อเรียกและชนิดต่างๆของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	24
รูปที่ 4-2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างความกว้างของสเปกตรัมของ LED และเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์	25
รูปที่ 4-3 แสดงการส่องแสงจากแหล่งกำเนิดแสงสู่เส้นใยนำแสง	26
รูปที่ 4-4 แสดงลักษณะการทำงานของ LED	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4-5 แสดงระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำ	28
รูปที่ 4-6 แสดงลักษณะการส่องแสงของ LED	29
รูปที่ 4-7 แสดงการปล่อยแสงของ LED แบบ edge-emitter diode	30
รูปที่ 4-8 แสดงไดอะแกรมของการปล่อยแสงแบบต่างๆ	31
รูปที่ 4-9 แสดงพื้นฐานของการเกิดเคมีคอนดักเตอร์เลเซอร์	32
รูปที่ 4-11 แสดง Fiber Optic transmission windows	35
รูปที่ 4-12 แสดงส่วนประกอบในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสง	37
รูปที่ 4-13 แสดงส่วนเชื่อมต่อทางแสงของตัวส่ง	37
รูปที่ 4-14 แสดงวงจรรับอย่างง่ายสำหรับ LED source	39
รูปที่ 4-15 แสดงวงจรรับของเลเซอร์ไดโอดแบบอนาล็อก	40
รูปที่ 4-16 แสดงวงจรรับของเลเซอร์ไดโอดแบบดิจิทัล	40
รูปที่ 4-17 แสดงลักษณะของ Depletion Zone	41
รูปที่ 4-18 แสดงลักษณะของ PN photodiode	42
รูปที่ 4-19 แสดงลักษณะโครงสร้างของ PIN photodiode	44
รูปที่ 4-20 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสง	44
รูปที่ 4-21 แสดงโครงสร้างของอะวานลานซ์ไฟโอดีไดโอด	45
รูปที่ 4-22 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้และกระแสไฟโอดี	47
รูปที่ 4-23 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรรับแสง	48
รูปที่ 4-24 แสดงวงจรรับแสงของ PIN และ PN photodiode	49
รูปที่ 4-25 แสดงบล็อกไดอะแกรม PIN-FET receiver circuit	49
รูปที่ 4-26 แสดงวงจรรับแบบอะวานลานซ์ไฟโอดีไดโอดอย่างง่าย	50
รูปที่ 5-1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของแนวคิดในโครงการ	52
รูปที่ 5-2 แสดงรูปสัญญาณ PFM	53
รูปที่ 6-1 แสดงวงจรทรานส์พีท	55
รูปที่ 6-2 แสดงวงจรพัลส์พีริโอดวี่มอดูเลชัน	57
รูปที่ 6-3 แสดงวงจรรับ LED ที่ใช้ในโครงการ	58
รูปที่ 6-4 แสดงวงจรสมบูรณัภาคส่ง	60
รูปที่ 6-5 แสดงวงจรภาคก่อนขยายสัญญาณ	61
รูปที่ 6-6 แสดงวงจรขยายสัญญาณ	62
รูปที่ 6-7 แสดงบล็อกไดอะแกรมของเฟสล็อกลูป	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

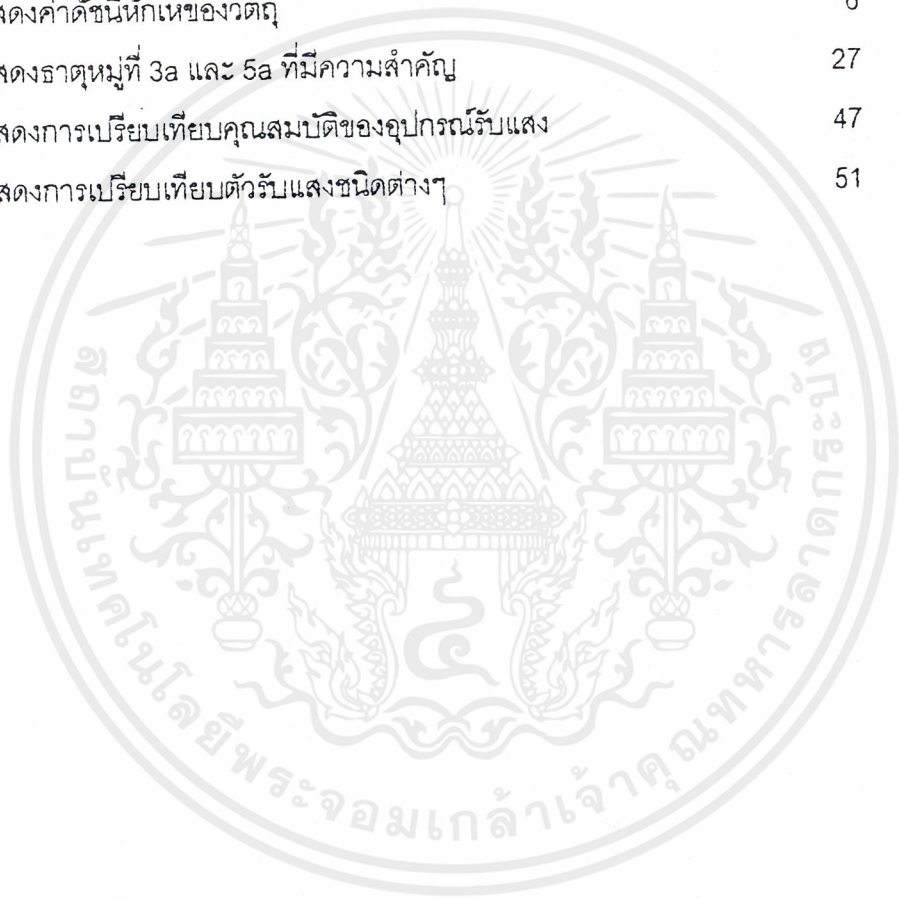
รูปที่ 6-8 แสดงวงจรมอดูเลขชั้นสัญญาณ PFM	64
รูปที่ 6-9 แสดงวงจรมอดูเลขชั้นสัญญาณและยกระดับสัญญาณ	66
รูปที่ 6-10 แสดงวงจรมอดูเลขชั้นสัญญาณทางภาครับ	67
รูปที่ 7-1 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	68
รูปที่ 7-2 แสดงสัญญาณอิมพัลส์จากฟังก์ชันเจเนอเรเตอร์	69
รูปที่ 7-3 แสดงสัญญาณพาหะ	70
รูปที่ 7-4 แสดงสัญญาณ PFM	71
รูปที่ 7-5 แสดงสัญญาณจากวงจรมอดูเลขชั้น	72
รูปที่ 7-6 แสดงสัญญาณเอทพัลส์จากวงจรมอดูเลขชั้น	73
รูปที่ 7-7 แสดงสัญญาณอิมพัลส์จากโทรศัพท์ส่ง	74
รูปที่ 7-8 แสดงสัญญาณ PFM	75
รูปที่ 7-9 แสดงสัญญาณเอทพัลส์ที่เข้ามายังโทรศัพท์รับ	76



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 แสดงหน่วยของความถี่และความยาวคลื่น	2
ตารางที่ 2-2 แสดงช่วงการทำงานของแต่ละความถี่	3
ตารางที่ 2-3 แสดงค่าดัชนีหักเหของวัตถุ	6
ตารางที่ 4-1 แสดงธาตุหมู่ที่ 3a และ 5a ที่มีความสำคัญ	27
ตารางที่ 4-2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง	47
ตารางที่ 4-3 แสดงการเปรียบเทียบตัวรับแสงชนิดต่างๆ	51



## บทที่ 1

### บทนำ

เนื่องจากในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีทางด้านเส้นใยนำแสงได้มีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วและกว้างขวาง โดยการพัฒนาส่วนมากจะเข้าไปในด้านที่เกี่ยวกับการสื่อสารโดยผ่านเส้นใยนำแสงซึ่งเป็นเหตุให้เกิดโครงการนี้ขึ้นมาคือการศึกษาการเชื่อมต่อสัญญาณโทรศัพท์โดยผ่านเส้นใยนำแสงซึ่งความรู้ที่ได้จากโครงการนี้สามารถที่จะนำไปพัฒนาให้เกิดประโยชน์ได้ในอนาคต

#### 1.วัตถุประสงค์ในการทำโครงการพิเศษ

- 1.เพื่อศึกษาหลักการและการใช้งานเส้นใยนำแสง
- 2.เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรที่ใช้เกี่ยวกับการสื่อสารที่ใช้สัญญาณโทรศัพท์ผ่านทางเส้นใยแก้วนำแสง
- 3.เป็นการศึกษาเพื่อนำโครงการนี้ไปใช้ในอนาคต

#### 1.2ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.ทำให้เข้าใจหลักการทำงานและทฤษฎีของเส้นใยนำแสง
- 2.ทำให้เข้าใจวงจรส่วนต่างๆที่ใช้ในการเชื่อมต่อสัญญาณโทรศัพท์ผ่านเส้นใยนำแสง
- 3.เข้าใจหลักการทำงานของการเชื่อมต่อสัญญาณโทรศัพท์โดยผ่านเส้นใยแก้วนำแสง
- 4.สามารถนำเอาหลักการและวงจรบางส่วนไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในงานด้านอื่น ๆ

## บทที่ 2 ลักษณะพื้นฐานของแสง

ก่อนที่เราจะทำความเข้าใจกับเทคโนโลยีทางด้านเส้นใยนำแสงนั้น เราจะต้องมีความเข้าใจในเรื่องของแสงให้ดีเสียก่อน

### 2.1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใช้อธิบายในเรื่องของแสง โดยแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งโดยถูกจัดแบ่งได้ด้วยสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ( electromagnetic spectrum ) ดังในตาราง 2-1 ซึ่งจะแสดงหน่วยของการวัดสำหรับความถี่ และความยาวคลื่น

	Frequency Designations	
$10^{12}$ Hz	Terahertz	THz
$10^9$ Hz	Gigahertz	GHz
$10^6$ Hz	Megahertz	MHz
$10^3$ Hz	Kilohertz	KHz
	Wavelength Designations	
$10^{-3}$ m	Micrometer	$\mu\text{m}$
$10^{-9}$ m	Nanometer	Nm
$10^{-12}$ m	Femtometer	Fm

ตาราง 2-1 แสดงหน่วยของความถี่ และ ความยาวคลื่น

ช่วงการทำงานของความถี่ทั่วไป ในสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแสงจะถูกวัดในเทอมของความยาวคลื่นในช่วงนาโนเมตร ( nm ) หรือ ไมโครเมตร (  $\mu\text{m}$  ) ส่วนแสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้ ( Visible light ) จะอยู่ในช่วงสเปกตรัมที่แคบคือ 380 ( สีม่วง ) ถึง 780 ( สีแดง ) นาโน

เมตร ซึ่งการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงจะใช้ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 800 - 1600 นาโนเมตร การเลือกช่วงของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงสำหรับเส้นใยนำแสงนั้นแสงจะต้องมีความยาวคลื่นที่ทำให้มีประสิทธิภาพในการส่งผ่านเส้นใยนำแสงมากที่สุด ตามปกติจะนิยมใช้อยู่ที่ 850 , 1300 หรือ 1550 นาโนเมตร

Subsonic	0 - 10 Hz
Sound	$15 - 2 \times 10^4$ Hz
Radio frequencies AM , FM , shortwave , television	$10^3 - 10^9$ Hz
Microwaves	$10^9 - 3 \times 10^{11}$ Hz
Infrared	$3 \times 10^{11} - 5 \times 10^{14}$ Hz
Visible light	$5 \times 10^{14} - 7.7 \times 10^{14}$ Hz
Red	384 - 482 THz
Orange	482 - 503 THz
Yellow	503 - 520 THz
Green	520 - 610 THz
Blue	610 - 659 THz
Violet	659 - 769 THz
Ultraviolet	$7.7 \times 10^{14} - 3 \times 10^{17}$ Hz
X-ray	$3 \times 10^{17} - 5 \times 10^{19}$ Hz
Gamma rays	$10^{19} - 10^{21}$ Hz
Cosmic rays	$10^{22}$ Hz

ตาราง 2-2 แสดงช่วงการทำงานของแต่ละความถี่

## 2.2 แสงเป็นคลื่น

แสงจะมีค่าความเร็วประมาณ  $3 \times 10^8$  เมตร / วินาที หรือ 186,000 ไมล์ / วินาที ในอากาศ แสงจัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหมือนกับคลื่นไมโครเวฟหรือ ความถี่วิทยุอื่น ๆ แต่จะมีความยาวคลื่นสั้นความถี่สูง ซึ่งใช้อธิบายเรื่องคลื่นคือ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปในทิศทางตั้งฉากซึ่งกันและกัน และสนามไฟฟ้าจะมีผลต่อระบบการสื่อสารด้วยแสงมากกว่า สนามแม่เหล็กโดยแสงจะกล่าวได้ว่าเกิดการโพลาไรซ์ในทิศทางกลับไปกลับมาของสนามไฟฟ้า ถ้าสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าที่มีทิศทางไปตามแนวเชิงเส้นแบบนี้จะถูกเรียกว่าเกิดโพลาไรซ์ ถ้ามีทิศไปตามแนววงกลมหรือวงรี คลื่นก็จะเกิดโพลาไรซ์เชิงวงกลมหรือวงรี ซึ่งโพลาไรซ์ที่เกิดขึ้นแต่ละชนิดนั้นจะถูกนำไปใช้พิจารณาในการออกแบบเลนส์ของระบบเส้นใยนำแสง

ความยาวคลื่นคือคลื่นไซน์ที่เคลื่อนที่ในทิศทาง Z จุดบนคลื่นที่เคลื่อนที่ไปได้ระยะทางหนึ่งในช่วงเวลา T โดยมีค่าความเร็วของแสงในอากาศคือ  $c$  ( $3 \times 10^8$  เมตร / วินาที) ค่าที่ได้ออกมาคือ ความยาวคลื่นแสดงให้เห็นได้ในรูป  $T \times c$  คลื่นไซน์สามารถแสดงในรูปของค่าความถี่โดยค่าเวลา T จะเป็นส่วนกลับกับค่าความถี่สามารถเขียนได้เป็นสมการได้ดังนี้

$$\lambda = T \times c$$

และ  $T = 1/f$

ดังนั้น  $\lambda = c/f$

โดยที่  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่น

$c$  คือ ความเร็วของแสง

$f$  คือ ความถี่

### 2.3 แสงเป็นอนุภาค

แสงนอกจากจะเป็นคลื่นแล้วยังมีคุณสมบัติเป็นอนุภาคด้วยดังเช่นที่รู้จักกันคือโฟตอน โฟตอนถูกอธิบายได้ด้วยควมถี่ของคลื่นกับระดับพลังงานสูง และความถี่สูง ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญที่จะบ่งบอกถึงการทำงานของ LED ( Light Emitting Diode ) เมื่อ LED ให้แสงออกมา อิเล็กตรอนในไดโอดจะให้พลังงานที่จะทำให้เกิดโฟตอนอิเล็กตรอนใน LED จะกระโดดข้ามพลังงานที่แตกต่างกันเป็นผลทำให้เกิดความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน แม้ว่าแสงจะมาจาก LED ชนิดเดียวกัน ในทางตรงกันข้ามเลเซอร์ให้แสงออกมาอิเล็กตรอนทั้งหมดจะกระโดดข้ามไปยังระดับพลังงานที่ใกล้เคียงกันและจะมีค่าความยาวคลื่นค่าเดียวพลังงานโฟตอนหนึ่งตัวจะมีค่าดังสมการ

$$E = h \times f = (h \times c) / \lambda \quad (\text{จูลส์})$$

พลังงานของโฟตอนไม่สำคัญมากเท่ากับจำนวนของโฟตอน ( N ) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดค่าของ N แสดงให้เห็นถึงจำนวนของโฟตอนที่ผ่านเข้าไปในเส้นใยนำแสงสมการที่ได้จะเป็นดังนี้

$$N = E \times \lambda / h \times c$$

- โดยที่
- N คือ จำนวนของโฟตอน
  - E คือ พลังงานของโฟตอน ( จูลส์ )
  - $\lambda$  คือ ความยาวคลื่น
  - h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ ( จูลส์-วินาที )
  - c คือ ความเร็วของแสง ( เมตร/วินาที )

## 2.4 ความเร็วของแสง

แสงจะมีความเร็ว  $3 \times 10^8$  เมตร/วินาที ซึ่งเป็นค่าในตัวกลางที่เป็นอากาศแต่ถ้าแสงเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่ตัวกลางอีกชนิดหนึ่งมันจะเกิดการเปลี่ยนความเร็วและการหักเห ดังในรูป



รูปที่ 2-1 แสดงลักษณะการเดินทางของแสง

องค์ประกอบที่ทำให้แสงเกิดการเปลี่ยนค่าความเร็วก็คือ ค่าดัชนีหักเห หรือ ดัชนีของการหักเห ค่าดัชนีของการหักเห ( $n$ ) ของตัวกลางสามารถอธิบายได้ด้วยอัตราส่วนระหว่างค่าความเร็วแสงในอากาศ ( $c$ ) กับความเร็วแสงในตัวกลางอีกชนิดหนึ่ง ( $v$ ) โดยค่าดัชนีหักเหมักมีค่ามากกว่า 1 ซึ่งแปรค่าไปตามช่วงสีของแสง ถ้ามีความยาวคลื่นสั้นจะมีค่าดัชนีหักเหสูง ค่าดัชนีหักเหเป็นไปตามสมการ

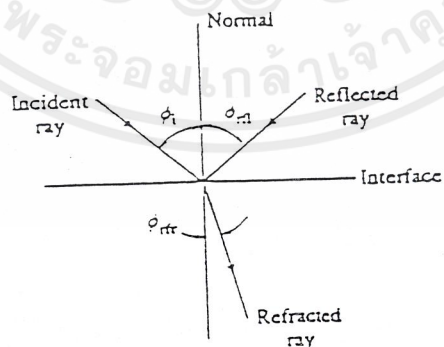
$$n = c / v$$

วัตถุ	ดัชนีหักเห ( n )	ความเร็วแสงในวัตถุ v ( x 10 <sup>8</sup> m/s )
สุญญากาศ	1.000	300
อากาศ	1.0003	299.9
น้ำ	1.33	225.56
แก้ว	1.46-1.96	205.48-153
เพชร	2.42	123.97
ซิลิกอน	3.4	88.23
แคลเซียมฟลูออไรด์	3.6	83.33

ตาราง 2-3 แสดงค่าดัชนีหักเหของวัตถุ

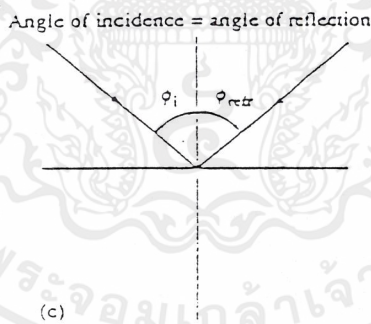
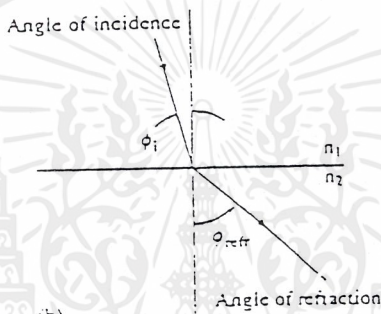
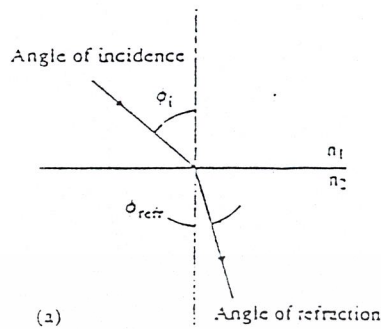
## 2.5 การสะท้อนแบบคู่เข้าและคู่ออก

เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางจากอากาศไปยังตัวกลางอีกชนิดหนึ่งจะเกิดการหักเหเกิดขึ้นนอกจากนั้นจะมีบางส่วนที่สะท้อนกลับไปในทิศทางเดียวกันกับแสงที่ตกกระทบ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าของมุมที่แสงตกกระทบด้วย ดังรูป



รูปที่ 2-2 แสดงแสงที่เกิดการหักเหและเกิดการสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- รูปที่ 2-3 (a) การสะท้อนแบบลู่เข้า  $n_1 < n_2$   
 (b) การสะท้อนแบบลู่ออก  $n_1 > n_2$   
 (c) การสะท้อนกลับหมด  $n_1 \gg n_2$

เมื่อแสงผ่านตัวกลางตัวหนึ่งที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่าตัวกลางตัวที่สอง ลำหักเหของแสงจะลู่เข้าสู่เส้นปกติเรียกว่า การสะท้อนภายใน แต่ถ้าค่ามุมตกกระทบเพิ่มขึ้นและมุมของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสะท้อนมีค่าเข้าสู่ 90 องศา แสงจะไม่ผ่านเข้าสู่ตัวกลางที่สองโดยจะเกิดสะท้อนกลับไปที่บริเวณผิวหน้าเราเรียกมุมนี้ว่า มุมวิกฤต (critical angle) ถ้าค่ามุมตกกระทบเพิ่มขึ้นจนมากกว่าค่ามุมวิกฤตจะเกิดการสะท้อนกลับหมดที่บริเวณผิวหน้าทั้งหมดโดยไม่ผ่านเข้าไปสู่ตัวกลางตัวที่สองเลย มุมระหว่างแสงที่ตกกระทบกับเส้นปกติเรียกว่า มุมของการสะท้อน โดยมุมของการสะท้อนจะเท่ากับมุมตกกระทบเมื่อมุมตกกระทบมีค่ามากกว่ามุมวิกฤต

## 2.6 กฎของสเนลล์

กฎของสเนลล์จะหักเหเมื่อค่าของมุมตกกระทบมีค่าไม่เท่ากับมุมสะท้อน แสงจะเกิดการหักเหขึ้นในตัวกลางที่สอง โดยค่าของมุมตกกระทบจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าของมุมวิกฤต ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหของตัวกลางตัวที่หนึ่งและตัวกลางที่สอง คือ  $n_1$  และ  $n_2$  ส่วนค่ามุมของการตกกระทบและการสะท้อนคือ  $\theta_1$  และ  $\theta_2$  โดยอธิบายเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sin\theta_1/\sin\theta_2 = n_2 / n_1$$

กฎของสเนลล์เป็นเรื่องที่สำคัญเรื่องหนึ่งในเรื่องเส้นใยนำแสง ถูกใช้เป็นทฤษฎีที่ใช้ อธิบายการเดินทางของแสงภายในเส้นใยนำแสง โดยการที่แสงเดินทางไปในเส้นใยนำแสงค่าของมุมการตกกระทบจะมากกว่าค่าของมุมวิกฤต มุมวิกฤตที่เกิดขึ้นเมื่อมุมของการตกกระทบจากรังสีการส่งผ่านจะเกิดการสะท้อนไปตามผิวของรอยต่อได้ดีกว่ามุมของการตกกระทบจากรังสีที่เข้ามา จากกฎของสเนลล์เมื่อกำหนดให้  $\theta_1 = \theta_c$  เมื่อ  $\theta_2$  มีค่าเท่ากับ 90 องศา และ  $\sin\theta_2 = 1$

$$\sin\theta_c = n_2 / n_1$$

หรือ

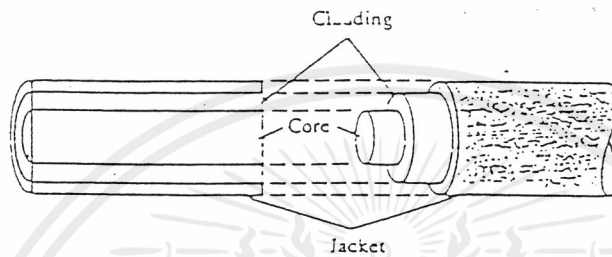
$$\theta_c = \sin^{-1} n_2 / n_1$$

สำหรับกรณีนี้  $\theta = 90 - \theta_c$  สำหรับค่าของมุมที่น้อยกว่ามุมวิกฤต สำหรับผลรวมของการสะท้อนภายในจะถูกนำไปแทน ดังนั้นถ้าทราบค่ามุมวิกฤตก็จะทราบค่าอัตราส่วนของ การหักเหซึ่งเป็นค่าที่จะนำไปใช้ตัดสินใจในการออกแบบชนิดของวัสดุที่ใช้ทำคอร์ (core) หรือ แคลดดิง (cladding)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

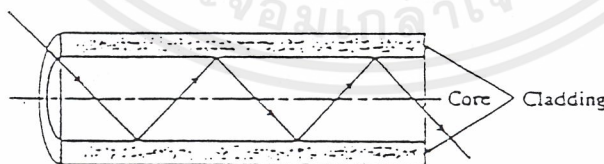
## 2.7 เส้นใยนำแสง

ในสภาวะเริ่มต้นแสงจะปฏิบัติตัวเป็นเหมือนรังสี โดยมีการแพร่กระจายไปตามคลื่นตัวนำและมีการจำกัดขอบเขตทางฟิสิกส์แสงบางส่วนจะเคลื่อนที่ไปตามแนวเส้นที่มีการเคลื่อนที่ขึ้นลงของคลื่นตัวนำเหมือนกับการสะท้อน รังสีบางส่วนจะเกิดการสูญเสียในคลื่นตัวนำแต่ส่วนที่เหลือก็จะเกิดการสะท้อนต่อไป ดังในรูป 2-4



รูปที่ 2-4 แสดงภาคตัดขวางของเส้นใยนำแสง

สายตัวนำจะประกอบไปด้วย 2 ชั้นที่เป็นแก้วหรือพลาสติก โดยชั้นในหรือคอร์เป็นส่วนที่แสงมีการเคลื่อนที่มีค่าดัชนีหักเห คือ  $n_1$  และรอบๆคอร์จะหุ้มด้วยชั้นที่เรียกว่า แคลดดิง มีค่าดัชนีหักเหคือ  $n_2$  และชั้นทั้ง 2 จะมีสารที่เป็นตัวหุ้มอีกชั้นหนึ่ง ค่าดัชนีหักเหของคอร์จะมีค่าสูงกว่าของแคลดดิงซึ่งผลรวมการสะท้อนภายในจะเกิดขึ้นเมื่อ  $n_{\text{core}} > n_{\text{cladding}}$  ดังในรูปที่ 2-5

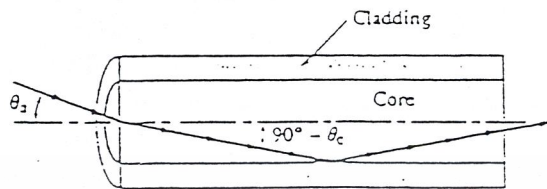


รูปที่ 2-5 แสดงการเดินทางของแสงภายในเส้นใยนำแสง

แสงจะถูกส่งผ่านเข้าไปในคอร์ด้วยมุมตกกระทบที่มากกว่ามุมวิกฤตจะเกิดการกลับไปกลับมาที่บริเวณรอยต่อของคอร์และแคลดดิง จากกฎของสเนลล์เมื่อมุมตกกระทบมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 9 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่ามุมวิกฤตแสงทั้งหมดจะเกิดการสะท้อนเมื่อมุมของการตกกระทบเท่ากับมุมของการสะท้อนจะเคลื่อนที่ไปตลอดตามเส้นใยนำแสงด้วยผลรวมการสะท้อนภายใน ทุกลำแสงที่ชนกลับไปกลับมารอบที่บริเวณรอยต่อที่มีค่ามุมตกกระทบน้อยกว่ามุมวิกฤตแสงจะไม่สะท้อนกลับไปยังแนวขอบเขตจะถูกดูดกลืนหรือสูญเสียไปในแคลดดิ้งเรียกว่า acceptance cone ดังในรูป 2-6



รูปที่ 2-6 แสดง acceptance cone

ซึ่งส่วนใหญ่จะเคลื่อนไปตามเส้นใยนำแสงเพื่อรับและแพร่กระจายแสงจาก LED ซึ่งมีสนามของแสงขนาดใหญ่ ปัญหาที่เกิดจากการกระจัดกระจายของแสงหรือการกระจายของพัลส์เป็นผลมาจากการผลิต เส้นใยนำแสงส่วน acceptance cone ที่แคบต้องการแหล่งกำเนิดแสงดังเช่น เลเซอร์ การรับลำแสงของเส้นใยนำแสงสามารถบ่งบอกได้ด้วยค่าความแตกต่างของการหักเห ค่าความแตกต่างที่ได้จะถูกเรียกว่า ค่าดัชนีหักเหการสะท้อน อธิบายได้ดังสมการ

$$\Delta = (n_{\text{core}} - n_{\text{cladding}}) / n_{\text{core}}$$

จากสมการใช้สำหรับค่ามุมวิกฤต ถ้ามีค่ามุมน้อยกว่า  $90^\circ - \theta_c$  จะถูกนำหรือจะผ่านเข้าไปในคอร์แสงที่ผ่านเข้าไปในคอร์บางส่วนอาจจะผ่านเข้ามาจากภายนอก ค่าของมุมที่แสงเข้ามาจากภายนอกระหว่างลำแสงกับแกนเส้นใยนำแสงสามารถเขียนออกมาได้โดยกฎของการหักเห

$$\sin \theta_i / \sin (90^\circ - \theta_c) = n_2 / n_1$$

เมื่อกำหนดค่าดัชนีหักเหของอากาศเป็น 1 และ  $n_1$  มีค่าเท่ากับ 1 จะได้ว่า

$$\sin \theta = n_2 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_c}$$

จากสมการข้างบนและจากสมการมุมวิกฤต จะได้ค่ามุม acceptance  $\theta$  ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงสารที่ผ่านเข้ามาในคอร์ดและยังคงทำให้เกิดการนำในคลื่นตัวนำได้

$$\sin \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

เมื่อ

$n_1$  คือ ค่าดัชนีหักเหของคอร์ด

$n_2$  คือ ค่าดัชนีหักเหของแคลดดิ้ง

## 2.8 นิวเมอริคอลลอเพอเจอร์

นิวเมอริคอลลอเพอเจอร์ (NA) คือค่าทางตัวเลขที่แสดงถึงขีดความสามารถของการรับแสงเข้าสู่เส้นใยนำแสง มีสมการทั่วไปเป็นดังนี้

$$NA = \sin \theta$$

หรือ

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

ค่า NA มักจะมีค่าน้อยกว่า 1

## 2.9 การสะท้อนของเฟรสเนล

แสงที่ผ่านมาจากค่าดัชนีหักเหของตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวหนึ่ง จะมีบางส่วนของแสงจะสะท้อนกลับไปเรียกว่า การสะท้อนเฟรสเนล สามารถอธิบายเป็นสมการได้ดังนี้

$$\rho = (n_2 - n_1 / n_2 + n_1)^2$$

เมื่อ

$n_1$  คือ ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ 1

$n_2$  คือ ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ 2

ค่าสูญเสียสามารถคำนวณออกมาได้ในรูปของหน่วยเดซิเบล (dB) ดังนี้

$$dB = 10 \log_{10} (1 - \rho)$$

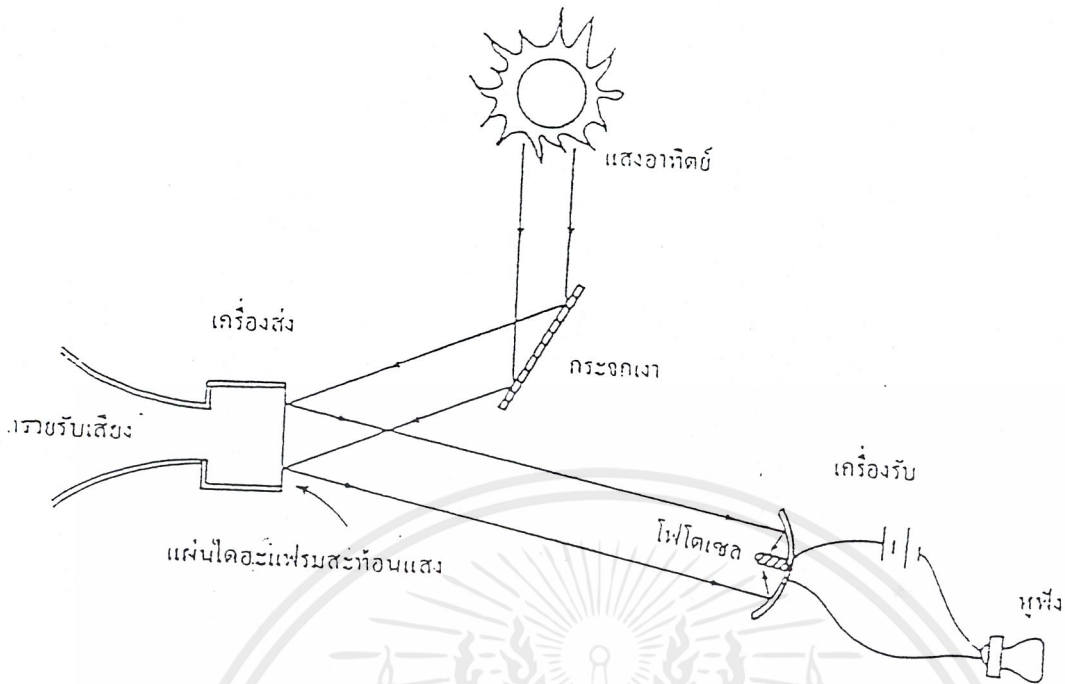
### บทที่ 3

#### การสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง

การสื่อสารยุคใหม่ที่กำลังมีวิวัฒนาการก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วมากในปัจจุบันคงได้แก่การสื่อสารด้วยแสง ทั้งนี้เพราะระบบการสื่อสารด้วยแสงที่เราสามารถควบคุมสถานภาพแวดล้อมได้นั้นจะมีข้อได้เปรียบเหนือการสื่อสารที่ใช้สัญญาณไฟฟ้าอยู่หลายประการจึงทำให้เกิดการค้นคว้าและพัฒนาเกี่ยวกับระบบการสื่อสารนี้อย่างต่อเนื่องและจริงจัง สถานภาพแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของระบบการสื่อสารด้วยแสงมากที่สุดนั่นคือ สถานภาพของตัวกลางที่ใช้สำหรับให้แสงเดินทางจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ สิ่งที่นิยมใช้เป็นตัวกลางสำหรับการสื่อสารระบบนี้คือ เส้นใยนำแสง ฉะนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงเส้นใยนำแสงเป็นหลัก

#### 3.1 วิวัฒนาการของการสื่อสารด้วยแสง

ในปี 1870 จอห์น ทิดัล ( John Tydal ) ได้ทำการทดลองให้เห็นว่าแสงนั้นสามารถเดินทางได้ตามสายน้ำที่ถูกเหวออกจากภาชนะที่มีแสงสว่างส่องอยู่ภายในได้และกล่าวกันว่า บันทึกเรื่องราวต่าง ๆ เหล่านี้คือ ต้นเหตุที่มาของการคิดค้นเกี่ยวกับเส้นใยนำแสงในปัจจุบัน ถ้าไม่นับกระຈกที่ใช้สะท้อนแสงอาทิตย์หรือการสื่อสารแบบโบราณแล้ว สิ่งประดิษฐ์ชิ้นแรกที่เกี่ยวข้องกับระบบการสื่อสารด้วยแสงนั้นก็คือโฟโตโฟน ( Photo Phone ) ของเล็กซานเดอร์ เกรแฮม เบล ( Alexander Graham Bel ) ซึ่งได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นในปี 1880 ส่วนประกอบนั้นมีแสดงไว้ในรูปที่ 3 - 1 การทำงานของโฟโตโฟนนั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อมีเสียงพูดเข้าไปในกรวยรับเสียง เสียงจะทำให้แผ่นไดอะแฟรม ( diaphragm ) ซึ่งสะท้อนแสงติดอยู่กับกรวยรับเสียงนั้นสั่นเป็นเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแสงที่สะท้อนออกมาจากแผ่นไดอะแฟรมนั้น ดังนั้นแสงที่ถูกสะท้อนนี้จะพุ่งไปยังเครื่องรับซึ่งมีโฟโตเซลล์ ( photo cell ) เป็นตัวรับแสงและควบคุมการไหลของไฟฟ้าในวงจรที่มีแสดงไว้ดังรูป เพราะฉะนั้นโฟโตโฟนจึงสามารถที่จะส่งข่าวสารที่เป็นเสียงได้โดยใช้แสงเป็นตัวพาหนะจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากสถานภาพของสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ มีอิทธิพล ต่อการส่งสัญญาณในระบบนี้มาก จึงทำให้ระยะการใช้งานของโฟโตโฟนนั้นสั้นมากคือเพียงประมาณ 200 เมตร เท่านั้น จึงทำให้ไม่มีบทบาทที่สำคัญมากนัก

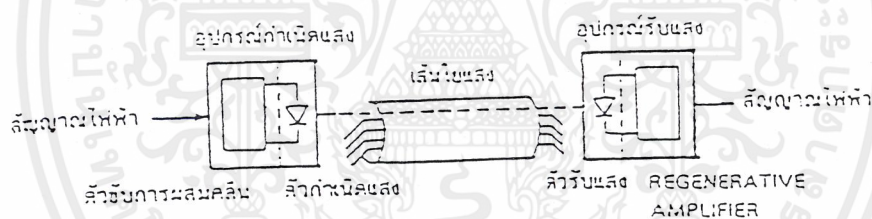


รูปที่ 3-1 แสดงการทำงานของโฟโต้โฟน

แม้ว่าในปี 1960 Dr. Theodore Maiman จะคิดค้นวิธีผลิตแสงเลเซอร์ออกมาได้เป็นผลสำเร็จ แต่แสงเลเซอร์ที่ผลิตออกมาได้เป็นผลสำเร็จก็ตาม แต่แสงเลเซอร์ที่ผลิตออกมาด้วยวิธีนี้ก็ยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการสื่อสารจนกระทั่งในปี 1970 จึงได้มีการผลิตเลเซอร์ไดโอดซึ่งสามารถใช้เป็นตัวผลิตสัญญาณเพื่อการสื่อสารขึ้นได้สำเร็จ และทำการสื่อสารร่วมกับเส้นใยแก้วนำแสงขึ้นได้เป็นครั้งแรก อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของเลเซอร์ไดโอดและเส้นใยนำแสงสมัยนั้น เมื่อคิดเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียในการสื่อสารในระบบไฟฟ้าที่มีอยู่ก็ยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานจริง อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่ได้ในสมัยนั้นก็ทำให้เกิดแรงบันดาลใจอันยิ่งใหญ่ให้เกิดมีการพัฒนาระบบการสื่อสารด้วยแสงขึ้นมาอย่างจริงจัง ประเด็นสำคัญในการพัฒนาก็คือความต้องการที่จะลดค่าความลดทอนในเส้นใยนำแสงให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะน้อยได้จนบัดนี้ นับว่าการพัฒนาได้ประสบความสำเร็จเป็นอย่างมาก โดยพิจารณาจากปี 1970 ค่าความลดทอนในเส้นใยนำแสงมีค่ามากถึง 20 dB / กิโลเมตร แต่ในปัจจุบันการลดทอนของเส้นใยนำแสงนั้นได้มีการปรับปรุงให้มีค่าลดลงเหลือเพียงประมาณ 0.2 dB / กิโลเมตร เท่านั้น

### 3.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของการสื่อสารด้วยแสง

ส่วนประกอบพื้นฐานของการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง แสดงดังรูปที่ 3-2 โดยทั่วไปแล้วสัญญาณไฟฟ้าที่ส่งจากอุปกรณ์ปลาย ( Terminal equipment ) ต่างๆ เช่น โทรศัพท์ เครื่องป้อนข้อมูล ( data terminal ) โทรสาร ( Facsimile ) เป็นต้น จะถูกอุปกรณ์เปลี่ยนไฟฟ้าเป็นแสง ( E/O convertor ) เปลี่ยนให้เป็นสัญญาณแสง ( นั่นคือ ความแรงของสัญญาณไฟฟ้าจะเปลี่ยนเป็นความเข้มของแสง หรือ " 1" , " 0" ของสัญญาณไฟฟ้าจะเปลี่ยนเป็นแสงที่สว่างและมีมืด ) และส่งเข้าไปในเส้นใยนำแสง สัญญาณที่เดินทางเข้าไปในเส้นใยนำแสงนั้นสัญญาณของมันจะอ่อนลง เมื่อเดินทางในระยะทางที่เพิ่มขึ้นพร้อมทั้งรูปคลื่นก็ขยายกว้างออกไปด้วย . เมื่อไปถึงอุปกรณ์ที่เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นไฟฟ้า ( O / E convertor ) ของทางด้านรับสัญญาณ แสงที่ถูกส่งออกมาจะถูกเปลี่ยนจากแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า และส่งไปยังอุปกรณ์ปลาย เพื่อทำให้เปลี่ยนเป็นสัญญาณของโทรศัพท์ เครื่องป้อนข้อมูล โทรภาพ และอื่นๆ



รูปที่ 3-2 แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง

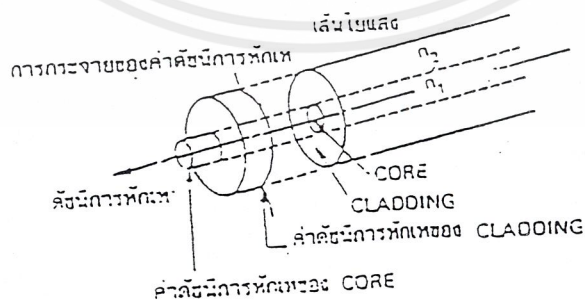
อเนึ่งอุปกรณ์เปลี่ยนไฟฟ้าเป็นแสงนั้นทำได้ โดยใช้อุปกรณ์กำเนิดแสงได้แก่ LED หรือ Semiconductor laser ส่วนอุปกรณ์เปลี่ยนแสงให้เป็นไฟฟ้านั้นทำได้โดยใช้ไดโอดแสง ( photodiode ), ทรานซิสเตอร์แสง ( phototransistor ) นอกจากนี้กรณีในระยะทางของสายส่งยาว อาจจำเป็นต้องติดตั้งตัวทวนสัญญาณ ( repeater ) ณ ตำแหน่งที่เหมาะสม ตัวทวนสัญญาณนี้ จะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงที่เข้ามาให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า จากนั้นจึงทำการขยายแล้ว เปลี่ยนกลับให้เป็นสัญญาณแสงอีกและส่งเข้าไปในเส้นใยนำแสง ในช่วงต่อไป

### 3.3 เส้นใยนำแสง

#### 3.3.1 โครงสร้างพื้นฐานของเส้นใยนำแสง

โดยทั่วไปแล้วเส้นใยนำแสงเป็นเส้นใยขนาดเล็กที่ทำจากแก้ว สิ่งที่เราพบเห็นบ่อย ๆ คือ เส้นใยที่ใช้ในการนำแสงของดอกไม้เรืองแสงสำหรับตั้งประดับเพื่อความสวยงามที่มีขายตามห้างสรรพสินค้าทั่วไป โดยการป้อนแสงสีแดง สีเหลือง สีเขียวเข้าไปปลายข้างหนึ่งของเส้นใยนำแสง และเราจะมองเห็นแสงออกมาจากปลายอีกข้างหนึ่งของเส้นใยนำแสงนี้ได้

โครงสร้างพื้นฐานของเส้นใยนำแสงประกอบด้วยสารไดอิเล็กตริก 2 ชนิด ที่มีค่าดัชนีหักเหไม่เท่ากัน โดยสารไดอิเล็กตริกที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงต่ำจะเป็นส่วนที่ห่อหุ้มส่วนที่อยู่ตรงกลาง ส่วนตรงกลางนั้นมีค่าดัชนีหักเหของแสงสูงเรียกว่า คอร์ และส่วนหุ้มด้านนอกที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงต่ำเรียกว่า แคลดดิง ยกตัวอย่างเช่น ที่คอร์ของเส้นใยนำแสง มีค่าดัชนีหักเหของแสงคงที่ แต่มีค่าดัชนีหักเหของ คอร์ และ แคลดดิง เปลี่ยนแปลงในลักษณะของชั้นบันได เส้นใยนำแสงแบบนี้เรียกว่า step-index optical fiber ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในรูป 3-3 เส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์และเส้นผ่าศูนย์กลางของแคลดดิง จะมีค่าต่างกันตามชนิดของเส้นใยนำแสง สำหรับเส้นใยนำแสงแบบ Multimode นั้น เส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์มีค่า 40-100  $\mu\text{m}$  ส่วนเส้นใยนำแสงแบบ single mode นั้น เส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์มีค่า 5-15  $\mu\text{m}$  สำหรับส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกของแคลดดิงนั้น กำหนดให้มีค่าเหมือนกันหมดไม่ว่าจะเป็นเส้นใยนำแสงแบบไหนโดยมีค่า 100-200  $\mu\text{m}$  นอกจากนี้ค่าดัชนีหักเหของคอร์จะมีค่ามากกว่าค่าดัชนีหักเหของแคลดดิง โดยที่เส้นใยนำแสงแบบ Multimode จะมีค่า 1-5 % แต่ถ้าเป็นเส้นใยนำแสงแบบ single mode จะมีค่า 0.1-0.5 % มากกว่าค่าดัชนีหักเหของแคลดดิง เป็นต้น



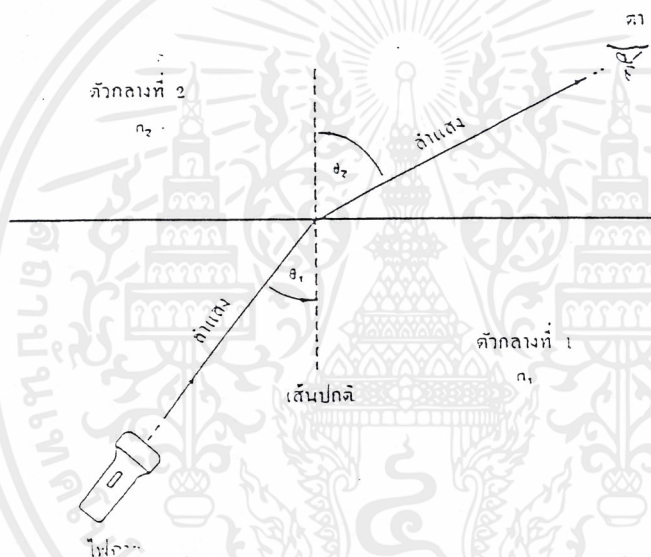
รูปที่ 3-3 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเส้นใยนำแสง

### 3.3.2 การเคลื่อนที่ของแสงในเส้นใยนำแสง

ดังเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางสองชนิดที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกันแล้ว ก็จะมีการหักเหของแสงเกิดขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎของสเนลล์ ( snell' s law ) คือ

$$\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = n_2 / n_1 \dots\dots\dots(1)$$

โดยในที่นี้  $n_1$  และ  $n_2$  คือค่าดัชนีหักเหของแสงของตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2 ตามลำดับ ส่วน  $\theta_1$  และ  $\theta_2$  คือค่าของมุมที่ลำแสงทำกับเส้นปกติ ( normal line ) บนผิวรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง แสดงดังรูป 3-4



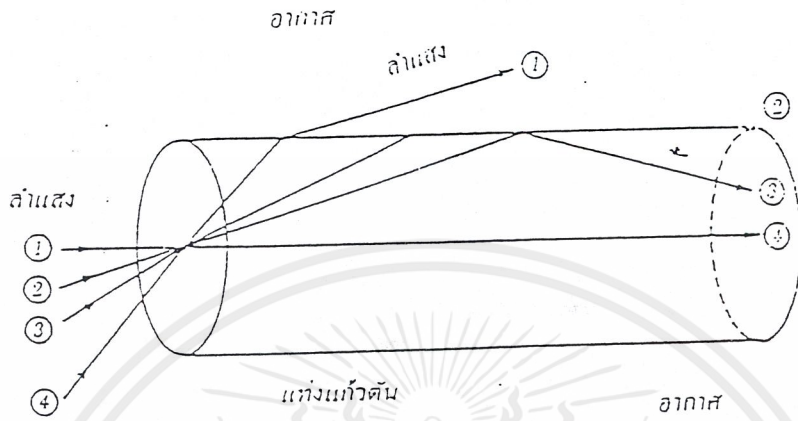
รูปที่ 3-4 แสดงการหักเหของแสง

ดังนั้นเมื่อมีการฉายแสงเข้าสู่แท่งแก้วตันที่วางอยู่ในอากาศด้วยค่ามุมตกกระทบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3-5 แล้วเราจะพบว่าเนื่องจากมุมตกกระทบของลำแสงที่ 1 มีขนาดเล็กดังนั้นลำแสงนี้จึงเดินทางหักเหทะลุผ่านแท่งแก้วออกไปได้ เมื่อมุมตกกระทบของลำแสงนั้นโตขึ้นเรื่อยๆ แล้ว ก็ย่อมจะมีค่ามุมตกกระทบอยู่มุมหนึ่งที่ทำให้แสงนั้นเกิดการหักเหไปในแนวที่ขนานไปกับผนังของแท่งแก้วนั้นพอดี ซึ่งเรียกมุมตกกระทบที่สามารถทำให้แสงเดินทางขนานไปกับแท่งแก้วได้นั้น เรียกว่ามุมรับแสงสูงสุด ( $\theta_{max}$ ) ดังเช่นการเดินทางของลำแสงที่ 2 ค่ามุมตกกระทบของลำแสงดังกล่าวมีชื่อว่า มุมวิกฤต ( critical angle ) โดยค่าของมุมวิกฤตนี้สามารถหาได้จากสมการ

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

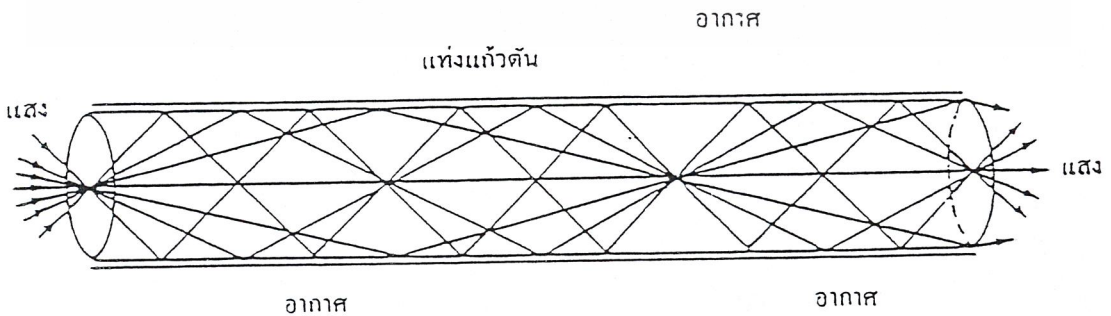
$$\theta_{\max} = \sin^{-1}[(n_1/n_2)\sin\theta_c] \dots\dots\dots(2)$$

$$\theta_c = \cos^{-1}(n_2/n_1) \dots\dots\dots(3)$$



รูปที่ 3-5 แสดงการหักเหของแสงผ่านแท่งแก้วตัน

ดังที่เราทราบกันดีอยู่แล้วว่าเมื่อมุมตกกระทบของลำแสงโตขึ้นเกินกว่ามุมวิกฤตตั้งกรณีของลำแสงที่ 3 นั้น ลำแสงนี้ก็ไม่สามารถหักเหออกไปจากแท่งแก้วได้ และจะเกิดการสะท้อนกลับของลำแสงนั้นกลับไปในแท่งแก้วนั้นอีก และถ้าแท่งแก้วนี้ยาวมากลำแสงนี้ก็สะท้อนกลับไปกลับมาอยู่ในแท่งแก้วนี้เรื่อยไป ดังแสดงในรูปที่ 3-6 โดยการสะท้อนของแสงในลักษณะนี้เรียกว่าการสะท้อนกลับหมด ลักษณะเช่นนี้เอง ทำให้แสงสามารถเดินทางจากปลายข้างหนึ่งไปยังปลายอีกข้างหนึ่งของแท่งแก้วนั้นได้ ในทำนองเดียวกัน ลักษณะการเคลื่อนที่ของแสงในเส้นใยนำแสงนั้นก็เป็นเช่นเดียวกับการเคลื่อนที่ของแสงตามรูปที่ 3-6 นี้เอง เพราะแกนของเส้นใยนำแสงซึ่งใช้เพื่อเป็นทางเดินของสัญญาณแสงนั้น ก็มีลักษณะโครงสร้างเหมือนกับแท่งแก้วทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็กๆมากเท่านั้น



รูปที่ 3-6 แสดงการเคลื่อนที่ของแสงภายในแท่งแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การแตกกระจายของรูปสัญญาณจากเส้นใยนำแสง

จากรูปที่ 3-5 เราจะพบว่า เพราะแท่งแก้วนั้นมีขนาดใหญ่ ดังนั้นแนวของลำแสงที่มีมุมตกกระทบมากกว่ามุมวิกฤตก็ย่อมมีได้หลายแนว จึงทำให้แนวการเดินทางของลำแสงที่สะท้อนไปมาระหว่างผนังของแท่งแก้วนี้เกิดขึ้นได้หลายแนวด้วยกัน ฉะนั้นจึงเป็นการแน่นอนว่าแสงที่เดินทางไปแล้วจะแยกกันออกมาเป็นลำแสงที่แยกกันออกไปแต่ละแนวทางนี้ย่อมจะใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านจากปลายข้างหนึ่งของแท่งแก้วไปสู่ปลายอีกข้างหนึ่งนั้นจะไม่เท่ากัน ดังนั้นถ้าลำแสงแต่ละลำแสงที่เคลื่อนที่ผ่านแท่งแก้วนี้ทำหน้าที่เป็นคลื่นพาหของสัญญาณเดียวกันอยู่แล้ว สัญญาณนั้นก็จะต้องเดินทางไปยังปลายอีกข้างหนึ่งของแท่งแก้วได้ไม่พร้อมกัน จึงเป็นเหตุให้สัญญาณผลลัพธ์ที่เกิดจากผลรวมของสัญญาณจากลำแสงแต่ละลำนั้นเกิดการกระจายตัวอย่างเช่น ถ้าลักษณะของสัญญาณที่มีก่อนหน้านั้นเป็นพัลส์ที่เหลี่ยมแคบๆ สัญญาณผลลัพธ์ก็อาจจะกลายเป็นพัลส์ที่กว้างๆที่มีลักษณะไม่เป็นรูปสี่เหลี่ยม ดังนี้ เป็นต้น ลักษณะที่สัญญาณเกิดความผิดเพี้ยนดังกล่าวมาแล้วนี้ เราเรียกว่า ยืดขยายตัว (dispersion) ของสัญญาณนั้น จากเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นจึงเกิดความจำเป็นที่ต้องสร้างเส้นใยนำแสงให้มีขนาดเล็กทั้งนี้เพื่อลดจำนวนของแนวแสงให้น้อยลง อันจะทำให้เกิดการแตกกระจายของสัญญาณนั้นน้อยลงด้วยนั่นเอง

โดยวิธีวิเคราะห์คุณสมบัติของแสงด้วยทฤษฎีขั้นสูงแล้ว พบว่า ในการที่แสงสะท้อนไปมาอยู่ได้ในแท่งแก้วหรือเส้นใยนำแสงนั้น นอกจากมุมตกกระทบของลำแสงแต่ละลำบนผนังของแท่งแก้วหรือเส้นใยนำแสงนั้นต้องมีค่าโตกว่ามุมวิกฤตแล้ว เรายังได้ทราบเพิ่มเติมอีกว่า ค่าของมุมตกกระทบของลำแสงเหล่านั้นมีค่าไม่ต่อเนื่องกัน หากแต่จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นแบบดิสครีต ซึ่งก็หมายความว่า ลำแสงต่างๆ ที่เคลื่อนที่อยู่ได้ในเส้นใยนำแสงนั้นจะเกิดขึ้นโดยแยกกันออกเป็นลำๆ ซึ่งสามารถนับจำนวนได้อย่างแน่นอน ในเส้นใยนำแสงนั้นจำนวนลำแสงที่เกิดขึ้นเหล่านั้นจะเป็นตัวบอกจำนวนโหมด (mode) ของเส้นใยนำแสงยกตัวอย่างเช่น เส้นใยนำแสงที่มีแนวลำแสงอยู่เพียงแนวเดียวเราเรียกว่า เส้นใยนำแสงโหมดเดียว (single mode fiber) แต่ในเส้นใยนำแสงที่มีแนวลำแสงเกิดขึ้นได้เป็นจำนวนมากเราเรียกเส้นใยนำแสงนั้นว่าเป็นเส้นใยนำแสงมัลติโหมด (multimode fiber)

การแตกกระจายของสัญญาณอันเนื่องมาจากที่แสงแต่ละโหมดเดินทางโดยใช้ระยะเวลาที่แตกต่างกันมีชื่อว่าโหมดดิสเพอร์ชัน (mode dispersion) นอกจากการแตกกระจายของสัญญาณชนิดนี้แล้วยังมีสาเหตุอื่นที่ทำให้เกิดการแตกกระจายของสัญญาณอีกก็คือการแตกกระจายของสัญญาณอันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอในเนื้อสารในเส้นใยนำแสงนั้นซึ่งเรียกว่า แมททีเรียลดิสเพอร์ชัน (material dispersion) นอกจากนี้แล้วยังมีการแตกกระจายของสัญญาณอันเนื่องมาจากความแตกต่างของความยาวคลื่นในลำแสงที่เคลื่อนที่ไปตามเส้นใยนำ

แสงนั้นซึ่งเราเรียกว่าเวฟเลนทึสเพอร์ชัน ( wavelength dispersion ) ข้อดีของเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดียวจะเกิดการแตกกระจายของสัญญาณน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเส้นใยนำแสงแบบมัลติโหมด

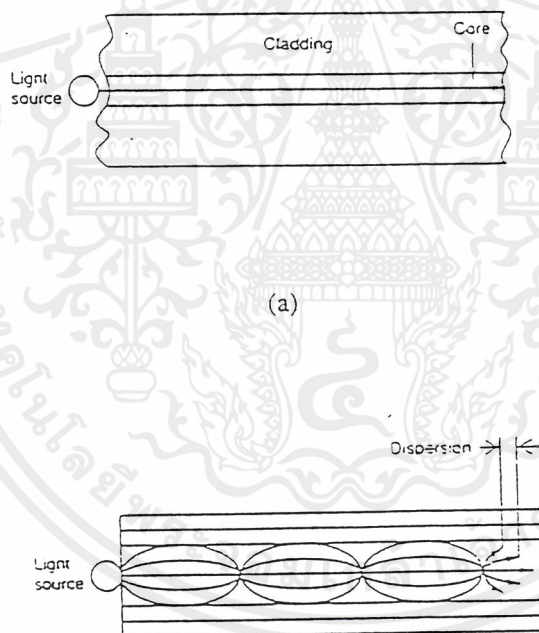
### 3.3.4 ชนิดของเส้นใยนำแสง

ชนิดของเส้นใยนำแสงสามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆได้ตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีการหักเห แบ่งตามจำนวนโหมด แบ่งตามสารที่ใช้ผลิต แบ่งตามกรรมวิธีการผลิต แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเส้นใยนำแสงเพียง 3 ชนิดเท่านั้นคือ

#### 1. แบ่งตามลักษณะการเดินทางของแสง ( propagation mode ) คือ

1.1 เส้นใยนำแสง single mode โดยแนวลำแสงที่เคลื่อนที่ภายในเส้นใยนำแสงมีเพียงแนวลำแสงเดียวเท่านั้น

1.2 เส้นใยนำแสง Multimode โดยแนวลำแสงที่เคลื่อนที่ที่อยู่ภายในเส้นใยนำแสงมีหลายแนวลำแสงด้วยกัน



(b)

รูปที่ 3-7 แสดงการเดินทางของแสงภายในเส้นใยนำแสง

a) Single mode step-index cable

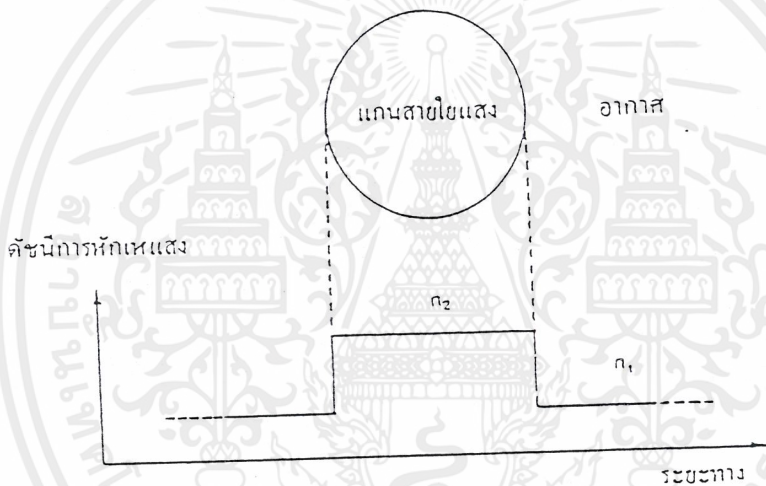
b) multimode graded-index cable

2. แบ่งตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ ค่าดัชนีหักเหของแสง คือ

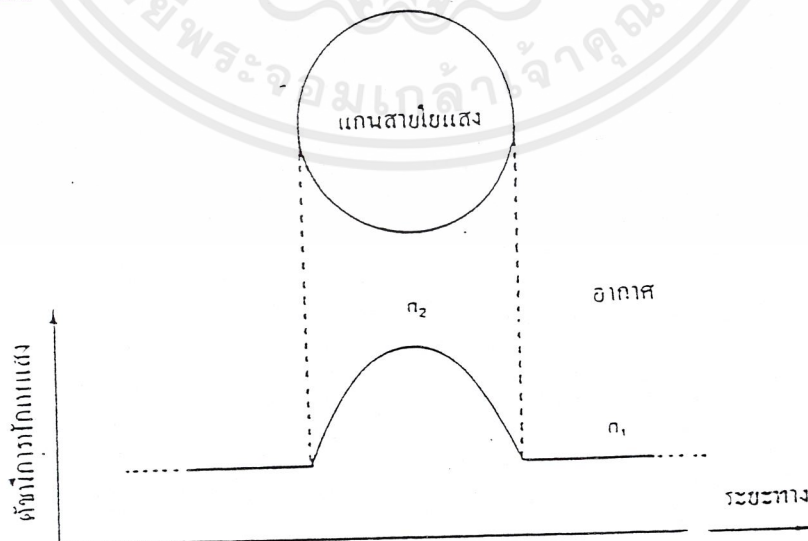
2.1 เส้นใยนำแสงชนิดดัชนีชั้นบันได (step-index fiber)

2.2 เส้นใยนำแสงชนิดดัชนีรูปมน (graded-index fiber)

โดยเส้นใยนำแสงชนิดดัชนีชั้นบันไดนั้นแกนของตัวเส้นใยนำแสงดังกล่าวมีค่าดัชนีหักเหของแสงที่สม่ำเสมอเท่ากันตลอดทั้งเส้น ซึ่งเขียนกราฟแสดงค่าดัชนีหักเหของแกนของเส้นใยนำแสง เมื่อเปรียบเทียบกับดัชนีหักเหของอากาศที่อยู่รอบตัวมันแล้วจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3-8 ซึ่งมีลักษณะเหมือนว่าเป็นชั้นบันได ส่วนเส้นใยนำแสงชนิดดัชนีรูปมนนั้นดัชนีหักเหของแสงค่อยๆเปลี่ยนแปลงไปอย่างช้าๆ เมื่อเปรียบเทียบกับดัชนีหักเหของอากาศที่อยู่รอบตัวมันแล้วจะมีลักษณะตามรูปที่ 3-9



รูปที่ 3-8 แสดงดัชนีหักเหของแสงของเส้นใยนำแสงชนิดดัชนีชั้นบันได (step-index fiber)



รูปที่ 3-9 แสดงดัชนีหักเหของเส้นใยนำแสงชนิดดัชนีรูปมน (graded-index fiber)

เส้นใยนำแสงชนิดดัชนีรูปมน (graded-index fiber) ถูกสร้างขึ้นเพื่อปรับปรุงลดการแตกกระจายของสัญญาณที่เกิดขึ้นจากเส้นใยนำแสงแบบมัลติโหมดให้น้อยลง โดยลำแสงทุกลำที่เคลื่อนที่ผ่านเส้นใยนำแสงชนิดนี้จะมีเวลาการเดินทางในเวลาเท่ากันจึงเป็นเหตุให้เกิดการแตกกระจายของเส้นใยนำแสงน้อยลง

โดยทั่วไปแล้วเส้นใยนำแสง single mode มี bandwidth กว้างที่สุด รองลงมาคือเส้นใยนำแสง multimode แบบ graded index และถัดมาคือเส้นใยนำแสง multimode แบบ step-index

### 3. แบ่งตามชนิดของสารที่ใช้ผลิต

3.1 Silica glass optic fiber ซึ่งเป็นสารไดออกไซด์ที่บริสุทธิ์เป็น Silica glass นอกจากจะใช้ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ที่บริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่แล้วยังใช้สารอื่นเติมลงไปเพื่อให้ค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงตามต้องการ สารอื่นที่เติมลงไปนี้เรียกว่า โดปานท์ (dopant) ได้แก่ เจอร์มันเนียม (Ga), โบรอน (B), ฟลูออรีน (F) เป็นต้น

3.2 Multi component glass optic fiber ซึ่งใช้สารไดออกไซด์ที่บริสุทธิ์เป็นแก้วหลายชนิดปนกัน ส่วนมากจะใช้โซดาแคลเซียม (soda calcium) แก้วที่โบรอนและซิลิคอนผสมสารอื่นๆเป็นหลักส่วนสารเจือได้แก่ โซเดียม (Na) แคลเซียม (Ca)

3.3 plastic optic fiber ซึ่งใช้สารไดออกไซด์ที่บริสุทธิ์เป็นพลาสติกในการทำเส้นใยนำแสง เป็นพวกที่มีดัชนีหักเหสูงส่วนมากทำจาก สารโพลีเมทิลเมทาไครเลต (polymethyl methacrylate) เรียกชื่อย่อว่า PMMA ส่วนใหญ่แล้วเส้นใยนำแสงแบบพลาสติกนิยมใช้กันมากเนื่องจากราคาถูก มีการยืดหยุ่นที่ดี และสะดวกต่อการเคลื่อนย้ายและไม่แตกหักง่าย ส่วนข้อเสียของมันคือเส้นใยนำแสงแบบพลาสติกมีการลดทอนของสัญญาณมาก ส่วนใหญ่เส้นใยนำแสงแบบพลาสติกจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 85-300 ไมครอน

### 3.4 ความสูญเสียของสัญญาณในระบบการสื่อสารด้วยแสง

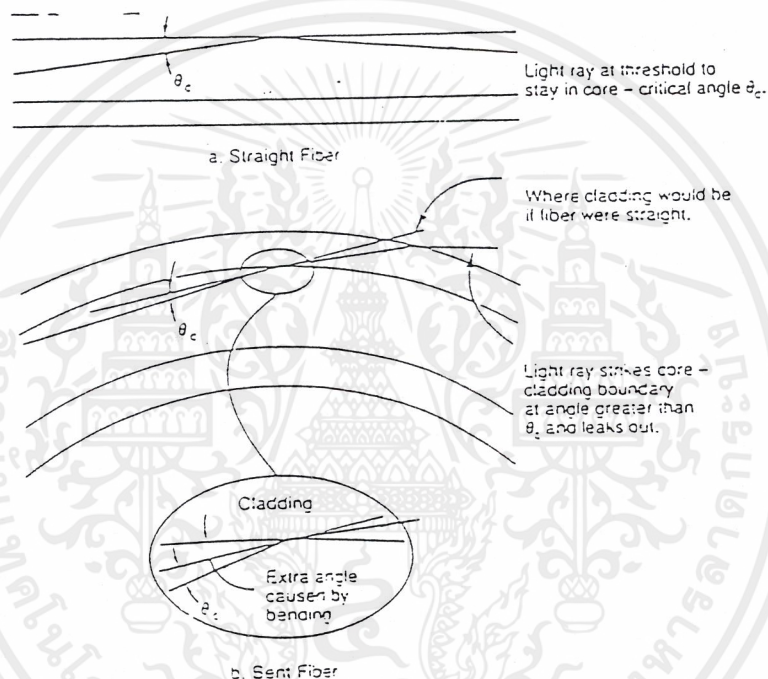
สาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณในระบบการสื่อสารด้วยแสงที่ผ่านเส้นใยนำแสงนั้นเกิดจากการสูญเสียโดยสาเหตุ 4 ประการ

1. ความสูญเสียอันเนื่องมาจากการแผ่รังสีหรือการกระจัดกระจายของคลื่น (scattering loss) ซึ่งเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของเนื้อสารเพราะมีสิ่งเจือปนอื่นๆ เช่น อนุภาคของน้ำแฝงปนอยู่ในสารซึ่งเป็นแกนของเส้นใยนำแสงนั้นเป็นเหตุให้แสงที่เคลื่อนที่ผ่านไปนั้นเกิดการกระจัดกระจาย ทำให้สูญเสียพลังงานไป

2. ความสูญเสียเพราะถูกดูดซับพลังงาน (absorption loss) เกิดขึ้นเนื่องจากเนื้อสารนั้นได้ซึมซับเอาพลังงานของแสงไว้ โดยแปรรูปของพลังงานแสงไปเป็นพลังงานรูปอื่น เช่นพลังงานความร้อน เป็นต้น

3. ความสูญเสียที่จุดต่ออุปกรณ์ (connection loss) เกิดขึ้นเพราะการที่เราไม่สามารถติดตั้งเครื่องมืออย่างมีประสิทธิภาพเหมือนดังอุดมคติได้

4. ความสูญเสียจากการโค้งงอของเส้นใยนำแสง (bending loss) เมื่อเกิดการโค้งงอของสายเส้นใยนำแสงจะทำให้ค่ามุมตกกระทบที่ผนังของเส้นใยนำแสงเปลี่ยนแปลงไปและถ้าความโค้งนั้นมีค่ามากพอสมควรแล้วก็จะทำให้แสงบางส่วนเกิดการหักเหออกจากเส้นใยนำแสงได้ จึงทำให้เกิดมีการสูญเสียเกิดขึ้น ดังรูปที่ 3-11



รูปที่ 3-10 แสดงการสูญเสียจากการโค้งงอเส้นใยนำแสง

### 3.5 แบนการส่งสัญญาณของเส้นใยนำแสง

องค์ประกอบสำคัญที่กำหนดระยะห่างของตัวทวนสัญญาณ (repeater) ในการสื่อสารเส้นใยนำแสงได้แก่การสูญเสียแสง (loss) และ Transmission bandwidth ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า เส้นใยนำแสงมีหลายชนิดคือเส้นใยนำแสง multimode แบบ step-index เส้นใยนำแสง multimode แบบ graded index และเส้นใยนำแสง single mode สำหรับเส้นใยนำแสง multimode ทั้ง 2 แบบนั้นความเร็วในการเดินทางของแสงจะแตกต่างกันตาม mode ทำให้ระหว่างที่แสงเดินทาง ความกว้างของรูปคลื่นขยายกว้างออกตามระยะทาง นอกจากนั้น ทั้งเส้นใย

นำแสง multimode และ single mode ค่า Propagation constant ของสารที่ใช้ทำเส้นใยนำแสง จะมีค่าแตกต่างกันตามความยาวคลื่นของแสง ดังนั้นแสง incoherent light ในขณะที่เดินทาง ความกว้างของรูปคลื่นจะขยายกว้างออกตามระยะทางนั่นคือรูปคลื่นของสัญญาณแสงจะมีรูปร่างผิดไปจากเดิมในการสื่อสารเส้นใยนำแสง ความเร็วในการส่งและระยะห่างของตัวต้านทาน สัญญาณ ( repeater ) จะขึ้นอยู่กับ Transmission bandwidth นี้

องค์ประกอบที่กำหนด Transmission bandwidth สำหรับเส้นใยนำแสง single mode

ซึ่งมี Propagation mode เพียงอันเดียวจึงไม่มีปัญหาจากผลของ dispersion ดังนั้น bandwidth ของการส่งสัญญาณจึงไม่ขึ้นกับความไม่สมบูรณ์ของความเป็น coherent light ของต้นกำเนิดแสง ส่วนเส้นใยนำแสง multimode แบบ graded-index ให้ผลต่างของความเร็วในการเดินทาง ระหว่าง mode น้อยมาก จึงมี bandwidth กว้างต่างกับ multimode แบบ step-index ที่ให้ dispersion เกิดขึ้น ดังนั้นเส้นใยนำแสงแบบ multimode แบบ graded-index จึงมีสมบัติรองลงมาจากเส้นใยนำแสงแบบ single mode ซึ่งเหมาะแก่การใช้งานในระยะทางไกลและการส่งช่วง สัญญาณจำนวนมากได้

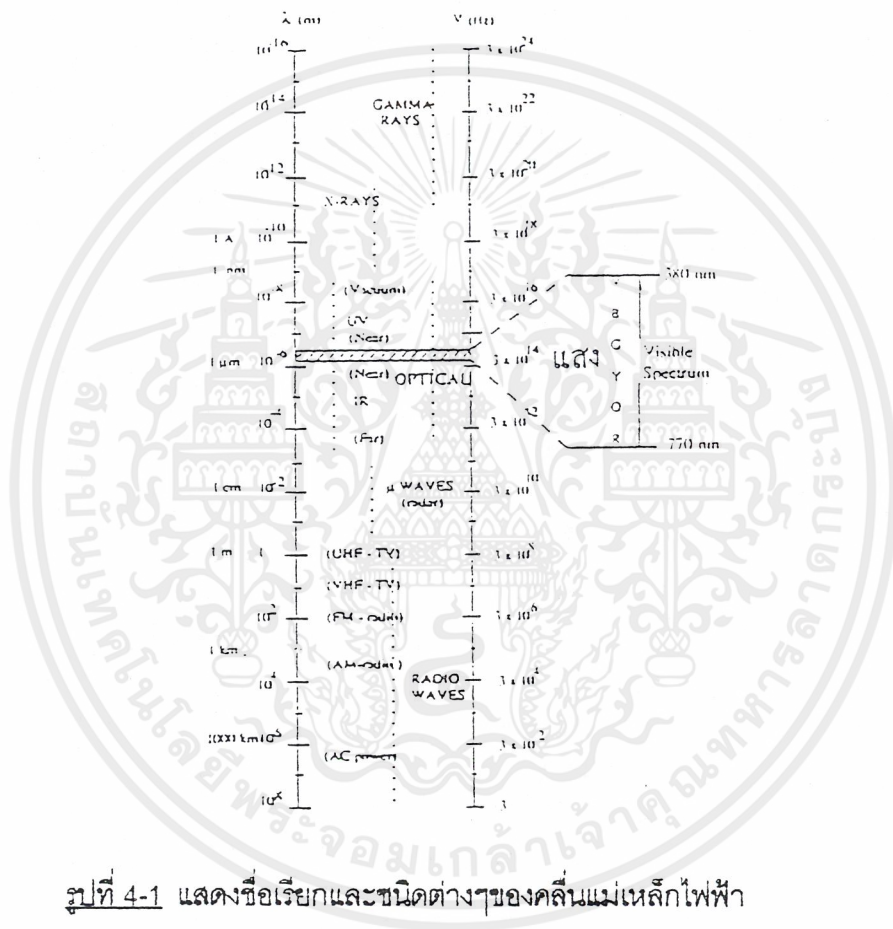
#### **ข้อดีของการสื่อสารเส้นใยแก้วนำแสง**

- มีแบนด์วิดท์การใช้งานที่กว้างมาก
- มีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบา
- ไม่มีการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าเกิดขึ้น
- ไม่มีปัญหาการแทรก ( interference ) และ Cross talk ของสัญญาณ
- ความปลอดภัยในระบบสัญญาณที่ส่งมีสูง
- มีการสูญเสียการส่งสัญญาณน้อยมาก

**บทที่ 4**  
**ระบบออปโตอิเล็กทรอนิกส์**

**4.1 แหล่งกำเนิดแสง**

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ที่ตามนุษย์มองเห็นได้ (visible light) จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 0.4  $\mu\text{m}$  - 0.7  $\mu\text{m}$  คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไปตามช่วงความยาวคลื่นและช่วงความถี่ ดังแสดงในรูป 4-1



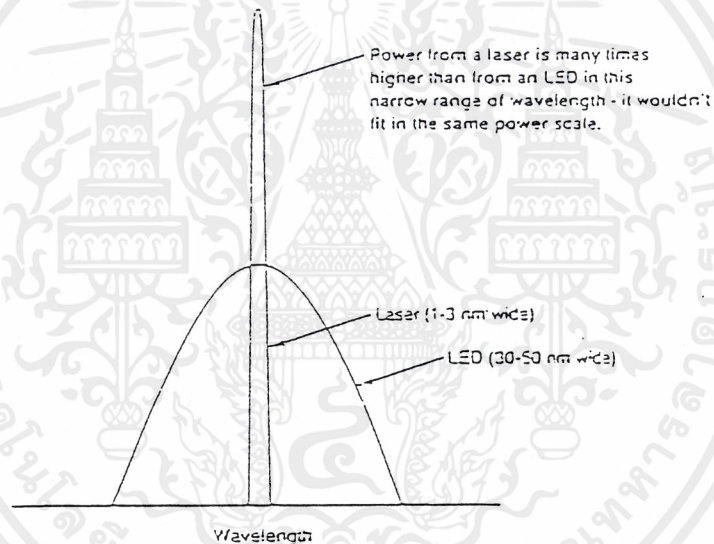
รูปที่ 4-1 แสดงชื่อเรียกและชนิดต่างๆของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การเลือกช่วงของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงสำหรับเส้นใยนำแสงนั้นแสงจะต้องมีความยาวคลื่นที่ทำให้ประสิทธิภาพในการส่งเส้นใยนำแสงมากที่สุด ตามปกติจะใช้กันในช่วง 850 , 1300 หรือ 1550 นาโนเมตร สำหรับเส้นใยนำแสงแบบแก้ว ช่วงของความยาวคลื่นนี้สำคัญมากเนื่องจากช่วงความกว้างของมันมากก็จะเกิดปัญหาการเพี้ยนและการกระจายของสัญญาณ แหล่งกำเนิดแสงจะต้องสามารถให้พลังงานที่เพียงพอที่จะสามารถส่งสัญญาณผ่านเข้าไปในเส้นใยนำแสงได้ และไม่มีผลต่อการเพี้ยนของสัญญาณที่เครื่องรับด้วย แหล่งกำเนิด

แสงส่วนมากที่ใช้ในระบบการสื่อสารทางแสงนี้จะเป็นอุปกรณ์ประเภทสารกึ่งตัวนำ คือ light emitter diode หรือ LED และ เซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ (semiconductor laser) และบ่อยครั้งที่จะได้ยินว่า เลเซอร์ไดโอด (laser diode หรือ LD) อุปกรณ์พวกนี้ส่วนมากจะเป็นมาตรฐานที่ใช้ควบคู่กับวงจรที่ใช้ในการสื่อสารระบบนี้ด้วย

#### 4.11 ช่วงทำงานของความยาวคลื่น (operating wavelength)

แหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่นมีผลทั้งต่อการลดทอนของสัญญาณและการกระจายของสัญญาณในการส่งผ่านเส้นใยนำแสง ปกติจะให้ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 750 - 850 , 1300 และ 1500 นาโนเมตร ในเส้นใยนำแสงชนิดซิลิคอน และประมาณ 660 ในเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกความกว้างของช่วงสเปกตรัมหรือช่วงความยาวที่ส่งนี้ สำหรับแหล่งกำเนิดที่เป็น LED และแหล่งกำเนิดเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์จะมีความแตกต่างกันตามรูปที่ 4 -2

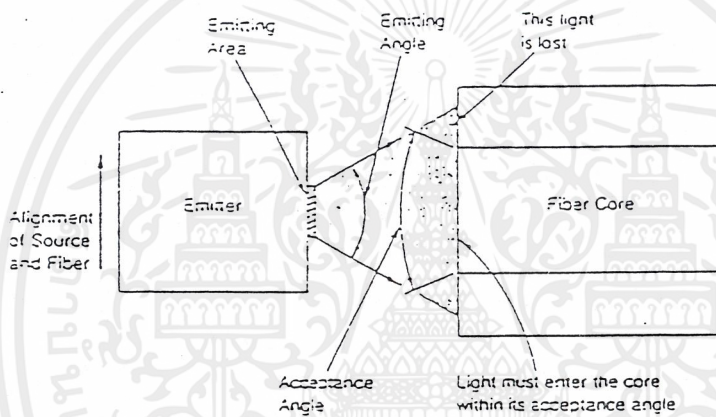


รูปที่4-2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างความกว้างของสเปกตรัมของ LED และเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์

ความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยออกมาและช่วงความกว้างของสเปกตรัมขึ้นอยู่กับความแตกต่างของส่วนประกอบความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมาขึ้นอยู่กับสารกึ่งตัวนำที่นำมาทำแหล่งกำเนิดแสงส่วนช่วงสเปกตรัมขึ้นอยู่กับโครงสร้างของอุปกรณ์ ทั้งแหล่งกำเนิดที่เป็นเลเซอร์และ LED นั้นทำมาจากสารกึ่งตัวนำเหมือนกัน แต่ LED จะมีความกว้างของช่วงสเปกตรัมมากกว่า ซึ่งถ้าเป็นเลเซอร์ 2 อันที่มีโครงสร้างเหมือนกันแต่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกันช่วงสเปกตรัมแคบคล้ายกันแต่ความยาวคลื่นต่างกัน

#### 4.1.2 พลังงานและการเชื่อมต่อของแสง ( Output Power and Light Coupling )

พลังงานที่ใช้ในการสื่อสารทางแสงนี้แหล่งกำเนิดแสงต้องมีพลังงานที่สอดคล้องกับเส้นใยนำแสงที่ใช้ซึ่งโดยปกติจะใช้พลังงานอยู่ในช่วงที่มากกว่า 100 มิลลิวัตต์ สำหรับแหล่งกำเนิดที่เป็นเลเซอร์และ 100 ไมโครวัตต์สำหรับแหล่งกำเนิดที่เป็น LED พลังงานเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับมุมของแสงที่ปล่อยออกจากแหล่งกำเนิด ขนาดของพื้นที่หน้าตัดของช่องปล่อยแสง การจัดเรียงของแหล่งกำเนิดกับเส้นใยนำแสง และลักษณะการรับแสงของเส้นใยนำแสง ดังรูปที่ 4 - 3 ความเข้มของแสงที่ปล่อยออกมาจะไม่สม่ำเสมอโดยมุมที่แสงถูกปล่อยออกมาแต่ละแสงจะมีความเข้มมากตรงตำแหน่งศูนย์กลางการปล่อยปกติ เซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์จะไม่มีกการกระจายของแสงที่มุมประมาณ  $10 - 20^\circ$  และแสงจาก LED จะกระจายแสงด้วยมุมที่ใหญ่กว่ามุมของเลเซอร์

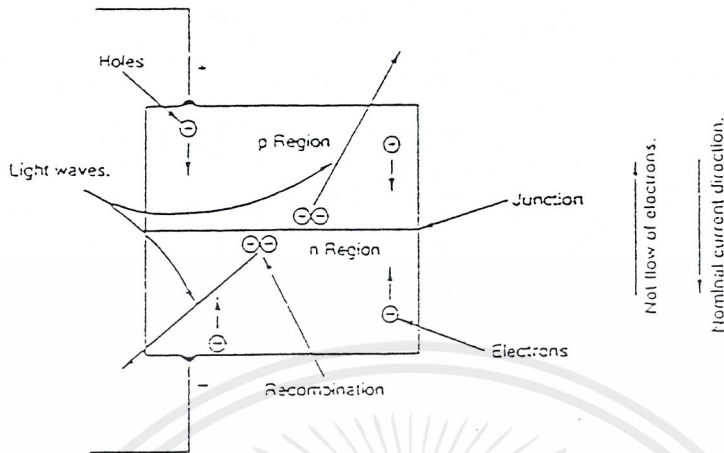


รูปที่ 4 - 3 แสดงการส่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงสู่เส้นใยนำแสง

#### 4.1.3 แหล่งกำเนิดแสงของ LED ( light - emission diode source )

LED เป็นแหล่งกำเนิดแสงในช่วงที่ตามองไม่สามารถมองเห็นได้อยู่ในช่วงของแสงอินฟราเรด ( infrared light ) โดยปกติแหล่งกำเนิดนี้จะใช้ในการสื่อสารระยะสั้นๆ แนวคิดพื้นฐานของการปล่อยแสงของ LED นี้แสดงดังรูปที่ 4- 4 ถ้ามีแรงดันไฟอย่างอ่อนตกรวมเซมิคอนดักเตอร์ไดโอด ( semiconductor diode ) จะมีผลทำให้มีการไหลของกระแสตกรวมในรอยต่อ เนื่องจากไดโอดทำขึ้นจากพื้นที่ 2 บริเวณ แต่ละบริเวณมีการเจือสารไม่บริสุทธิ์ ( impurities ) ทำให้มีลักษณะความต้องการทางไฟฟ้าต่างกัน บริเวณด้าน P จะถูกเจือด้วยสารเจือไม่บริสุทธิ์ที่น้อยกว่าอะตอมของสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดโฮล ( hole ) บริเวณด้านเอ็นจะถูกเจือด้วยสารเจือไม่บริสุทธิ์ ซึ่งจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้น ( free electron ) ดังนั้นจึงมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่มากมายในโครงสร้างผลึก ถ้าใส่แรงดันไฟบวกให้กับด้านพีและใส่แรงดันไฟ

ลบที่ด้านอื่นมีผลทำให้อิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่มารวมตัวกันตรงรอยต่อของทั้ง 2 บริเวณ ถ้าให้แรงดันไฟอย่างต่อเนื่องอิเล็กตรอนก็จะเคลื่อนที่ผ่านไปเป็นไดโอดและเกิดการรวมตัวกันอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 4-4 แสดงลักษณะการทำงานของ LED

สารกึ่งตัวนำหลายชนิดไม่จำเป็นต้องเป็นซิลิคอนและเจอร์มาเนียมเพราะการปล่อยพลังงานความร้อนซึ่งเกิดจากการสั่นในโครงผลึก ซึ่งในสารที่นำมาทำเป็น LED นี้การรวมตัวกันของพาหะจะทำให้เกิดโฟตอนของแสงขึ้นซึ่งเกิดจากการปล่อยมาจากสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญที่สุดคือ แกลเลียมอะเซไนด์ ( Gallium arsenide ) และอื่นๆ ธาตุในหมู่ที่ 3a และ 5a ในตารางธาตุดังแสดงในตาราง

3a	5a
อะลูมิเนียม ( Al )	ไนโตรเจน ( N )
แกลเลียม ( Ga )	อะเซนิค ( As )
อินเดียม ( In )	ฟอสฟอรัส ( P )
	แอสโตโนมี ( Sb )

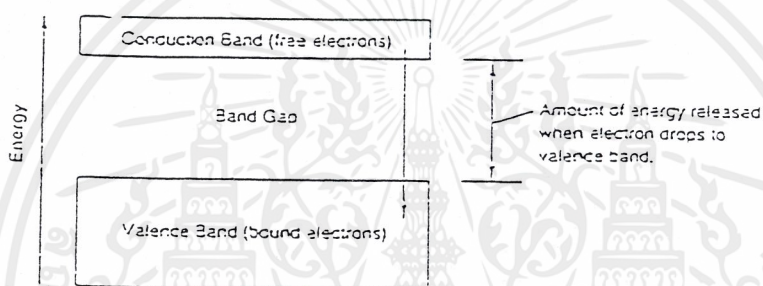
ตาราง 4 - 1 แสดงธาตุหมู่ที่ 3a และ 5a ที่มีความสำคัญ

ช่วงความยาวคลื่นที่ถูกปล่อยออกมานั้นขึ้นอยู่กับระดับพลังงานภายในของสารกึ่งตัวนำ ถ้าเป็นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิต่ำ อิเล็กตรอนทั้งหมดจะมีพันธะอยู่ในโครงสร้างผลึก ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นอิเล็กตรอนบางตัวจะแตกจากพันธะแล้วกระโดดสู่ระดับพลังงานที่สูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกว่า ระดับคอนดักชัน ( conduction level ) ทำให้พวกมันสามารถที่จะเคลื่อนที่อย่างอิสระในโครงสร้างผลึกนั้น แถบพลังงานชั้นวาเลนซ์ ( valence band ) และแถบพลังงานคอนดักชัน ( conduction band ) จะแยกกันอยู่โดยมีระดับพลังงานที่แบ่งกันเอาไว้เรียกว่า แถบพลังงานหวงห้าม ( band gap ) ซึ่งจะเป็นตัวบอกคุณลักษณะหลายอย่างของสารกึ่งตัวนำ

แถบพลังงานคอนดักชันจะมีอิเล็กตรอนอิสระหลังจากเกิดโฮลที่แถบพลังงานวาเลนซ์ซึ่งมันจะถูกพิจารณาว่าเป็นประจุบวก โฮลนี้สามารถเคลื่อนที่ได้โดยอิเล็กตรอนจากตำแหน่งอื่นๆในโครงสร้างผลึกจะเคลื่อนที่มารวมตัวกับโฮลและแตกออกเป็นโฮลตามเดิมอีกครั้ง สารเจือที่ไม่บริสุทธิ์ของสารกึ่งตัวนำจะเป็นตัวกำเนิดอิเล็กตรอนและโฮล เมื่ออิเล็กตรอนตกจากแถบพลังงานคอนดักชันลงสู่แถบพลังงานวาเลนซ์จะเกิดการปล่อยพลังงานที่มีค่าเท่ากับความแตกต่างของพลังงานของทั้งสองระดับ ดังรูป 4.5



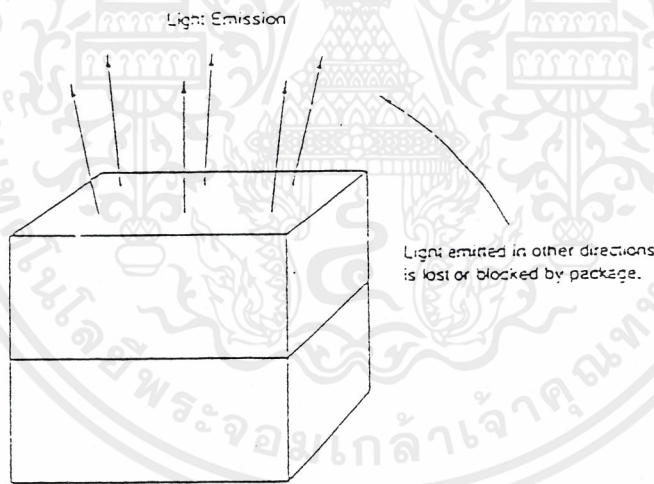
รูปที่ 4-5 แสดงระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

ความแตกต่างของระดับพลังงานทั้งสองหรือแถบพลังงานหวงห้ามซึ่งทำให้เกิดจำนวนพลังงานที่คายออกมาและความยาวคลื่นที่ถูกปล่อยซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารกึ่งตัวนำนั้น ตามปกติแล้วจะใช้ LED ในเส้นใยนำแสงแบบพลาสติกซึ่งทำจากแกเลียมอลูมิเนียมอะเซไนด์ ( Gallium aluminum arsenide ) หรือแกเลียมอะเซไนด์ ( Gallium arsenide ) LED แบบแกเลียมอะเซไนด์จะให้แสงอยู่ในช่วง 930 นาโนเมตร ถ้าเพิ่มอลูมิเนียมเข้าไปจะเกิดการลดลงของค่าขีดเริ่ม ( threstold current ) ซึ่งทำให้มีช่วงชีวิตดีขึ้นและสามารถเพิ่มพลังงานในแถบพลังงานหวงห้ามทำให้แสงที่ปล่อยออกมาอยู่ในช่วง 750 - 900 นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่ใช้งานอยู่ที่ 820 - 850 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิห้อง

สารประกอบสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆก็สามารถนำมาใช้ทำ LED ได้ซึ่งจะมีช่วงความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมาแตกต่างกันออกไป เช่น แกเลียมอะเซไนด์ฟอสไฟด์ ( Gallium arsenide phophide ) ให้แสงในช่วง 665 นาโนเมตร เป็นแสงสีแดง แต่จะไม่ดีเท่าแกเลียม

อะลูมิเนียมอะเซไนด์ ( GaAlAs ) และ GaAsP มีราคาถูกกว่า GaAlAs แต่มีคุณภาพในการทำงานต่ำกว่าสารประกอบสารกึ่งตัวนำที่สำคัญมีคุณภาพสูงคือ อินเดียมแกลเลียมอะเซไนด์ฟอสไฟด์ ( InGaAsP ) ทำจากอินเดียมแกลเลียมอะเซไนด์และฟอสฟอรัสรวมกันด้วยจำนวนของอินเดียม ( Indium ) อย่างเท่าๆกัน และเติมอะเซไนด์กับฟอสฟอรัสลงไปด้วย ผลของสารประกอบนี้คือเขียนได้เป็น  $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$  เมื่อ x เป็นสัดส่วนของอินเดียม และ y เป็นสัดส่วนของอาร์เซนิค ซึ่งพวกนี้จะถูกเรียกว่า ควอเตอ์นารี ( quaternary ) เป็นพวกที่มี 4 สารประกอบพวกนี้ทำยากกว่าเตอ์นารี ( ternary ) พวก 3 สารประกอบคือ GaAlAs ซึ่งให้ความยาวคลื่น 1300 และ 1550 nm LED บ่อยครั้งใช้ในระยะสั้นๆโดยใช้ความยาวคลื่น 1300 nm เพื่อความสะดวกและการแตกกระจายของสีน้อย แต่ 1550 nm นั้นความแตกกระจายมีมากกว่า

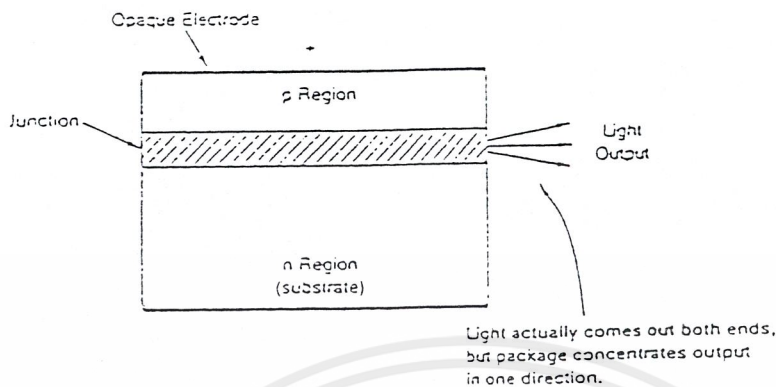
คุณลักษณะอื่นๆของ LED ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์และโครงสร้างภายใน ซึ่งไม่สามารถอธิบายทิศทางของการเกิดแสงได้ ในความจริงแล้วตัวอย่างการเกิดแสงในทุกทิศทางแสดงดังรูปที่ 4-6 และรูปแบบส่วนใหญ่จะเกิดการปล่อยแสงจากผิวหน้าของมัน แสงที่ถูกปล่อยออกมาจะเป็นรูปทรงกรวยแบบกว้างๆ ซึ่งความเข้มของแสงจะตกมากและจะเป็นไปตามมุมของรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า เป็นการกระจายแบบแลมเบิร์ตเทียน ( Lambertian distribution )



รูปที่ 4-6 แสดงลักษณะการส่งแสงของ LED

โครงสร้างพื้นฐานที่แตกต่างกันคือไดโอดที่เปล่งแสงทางขอบ ( edge emitter diode ) ดังแสดงในรูป 4-7 บริเวณที่สัมผัสกับคุณสมบัติของไฟฟ้าจะครอบคลุมทั้งด้านบนสุดและล่างสุดของขอบอิมิตเตอร์ ดังนั้นแสงจึงไม่สามารถออกมาได้ LED จะจำกัดแสงให้อยู่ในแนวแคบในระนาบของรอยต่อ p/n ซึ่ง LED ที่สร้างขึ้นนี้จะถูกล้อมรอบด้วยบริเวณที่มีดัชนีหักเหต่ำกว่า โดยการสร้างท่อนำคลื่น ( waveguide ) ซึ่งมีหน้าที่เหมือนกันกับเส้นใยแสงและทำการปล่อยแสงออก

จากปลายทั้งสองซึ่งสามารถที่จะต่อเชื่อมเข้าไปในเส้นใยแสง ข้อเสียคือเมื่อปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้ LED เสียหาย



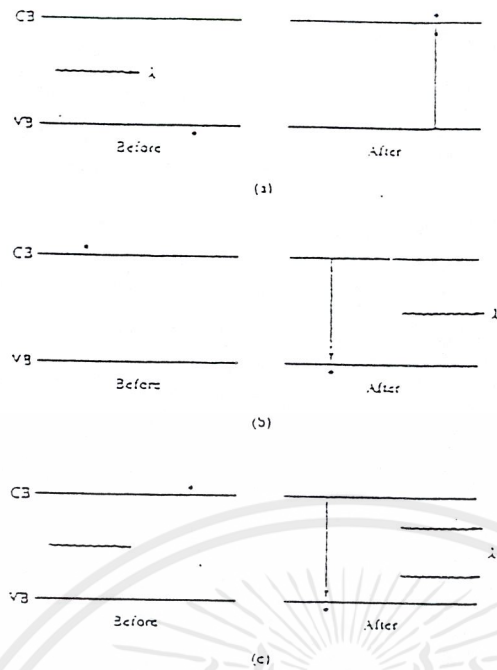
รูปที่ 4-7 แสดงการปล่อยแสงของ LED แบบ edge-emitter diode

#### 4.1.4 แหล่งกำเนิดเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ ( Semiconductor Laser Sources )

ถึงแม้ว่าเซมิคอนดักเตอร์จะมีพื้นที่ในการปล่อยแสงเหมือน LED แต่จะให้แสงในช่วงที่ต่างกัน ซึ่งมีผลต่อพลังงานที่ตึกกว่าและทิศทางที่แน่นอนกว่า

##### 4.1.4.1 การปล่อยแสงด้วยการกระตุ้น ( Stimulated Emission )

แสงจะถูกปล่อยออกมาเมื่อมีอิเล็กตรอนอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าตกลงสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่าซึ่งจะให้พลังงานออกมา โดยจะปลดปล่อยแสงที่มีอิทธิพลจากภายนอกซึ่งเรียกว่า การปล่อยแสงตามธรรมชาติ ( spontaneous emission ) แต่ก็จะเป็นเพียงชั่วขณะเท่านั้น ถ้าเราใช้เวลารอบๆการเกิดแสงอย่างการปล่อยแสงตามธรรมชาตินี้โดยสมมติว่ามีอิเล็กตรอนอยู่ที่ระดับพลังงานบนซึ่งพร้อมที่จะปลดปล่อยพลังงานอยู่แล้วและใส่พลังงานโฟตอนเข้าไป ซึ่งจะเป็นจำนวนของพลังงานที่อิเล็กตรอนต้องการที่จะปลดปล่อย โฟตอนภายนอกนี้สามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานชั้นบนสู่ระดับพลังงานชั้นล่างและคายพลังงานออกมาเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นเดิมได้ กระบวนการนี้เรียกว่า การขยายแสงด้วยการกระตุ้น ( Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation ) หรือเรียกย่อว่า LASER ซึ่งแสดงได้ตามไดอะแกรมของการปล่อยแสงแบบต่างๆ ในรูปที่ 4-8



รูป 4-8 a) การดูดกลืนพลังงาน b) การปล่อยตามธรรมชาติ c) การปล่อยโดยการกระตุ้น

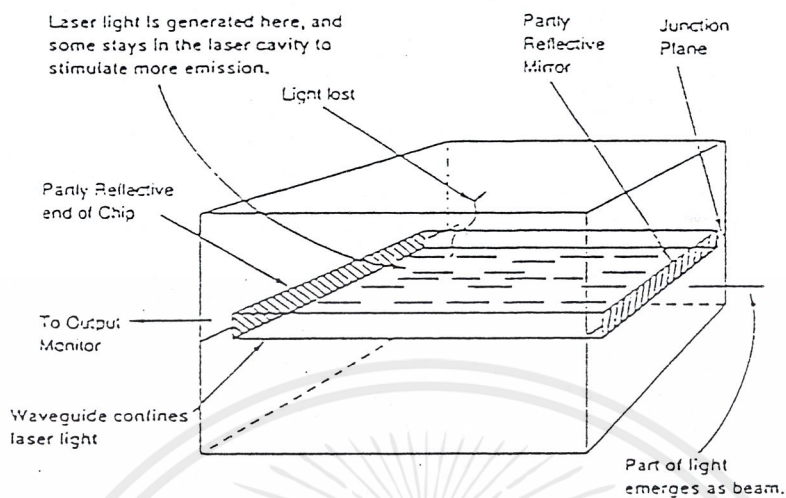
#### 4.1.4.2 Population Inversion

เงื่อนไขพิเศษที่ต้องสนใจของการเกิดเลเซอร์ คือ มีจำนวนอิเล็กตรอนหรืออะตอมหรือโมเลกุลอยู่มากในชั้นระดับพลังงานด้านบนมากกว่าชั้นระดับพลังงานด้านล่าง เงื่อนไขนี้เรียกว่า population inversion เนื่องจากตามปกติอิเล็กตรอนมากมายอยู่ในชั้นล่างอยู่แล้ว สิ่งนี้เป็นสิ่งจำเป็นเนื่องจากอะไรก็ตามที่อยู่ในระดับพลังงานชั้นล่างนั้นสามารถดูดกลืนแสงที่ถูกปล่อยออกมาได้ โดยจะมีการดูดกลืนแสงมากกว่าการปล่อยแสง ถ้ามีเงื่อนไขเกิดขึ้น การกระตุ้นให้เกิดการปล่อยแสงก็จะหยุดลงในทุกทิศทาง

#### 4.1.4.3 การจัดรูปของลำเลเซอร์ ( Laser Beam Formation )

ลำแสงเลเซอร์ถูกจัดรูปแบบโดยอุปกรณ์สำหรับเพิ่มค่าเรโซแนนซ์ ( resonator ) ซึ่งเป็นตัวจำกัดขอบเขตของแสงและทำให้ผ่านมาอีกครั้งในตัวกลางที่ถูกกระตุ้น ดังรูปที่ 4-9 สำหรับเขมิกอนดักเตอร์เลเซอร์ เรโซเนเตอร์นี้สามารถทำได้จากส่วนของกระจกที่ขอบแต่ละด้านของบริเวณที่อะตอมถูกกระตุ้นนั้นอยู่ แสงที่ถูกปล่อยออกมาจะเคลื่อนไปข้างหน้าตรงไปกระจกด้านหนึ่งแล้วจะสะท้อนกลับและเป็นอย่างนี้ต่อไปแสงที่ถูกกระตุ้นให้ปล่อยอิเล็กตรอนจะรวมกันเข้ากับแสงที่ผ่านระนาบของรอยต่อ แสงที่ถูกปล่อยในทิศทางอื่นๆจะรั่วไหลออกไป ดังนั้นแสงที่

มีการเดินทางกลับมาตลอดทางแคบๆ ของบริเวณที่ถูกกระตุ้นจะถูกขยายและสร้างขึ้นเป็นลำแสงเลเซอร์

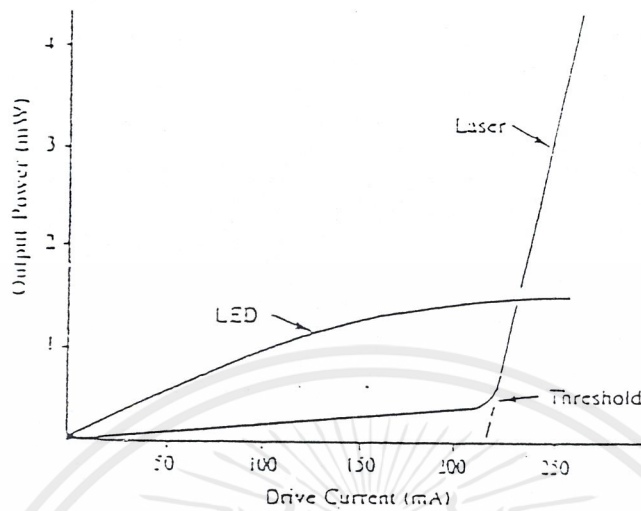


รูปที่ 4-9 แสดงพื้นฐานการเกิดเคมีคอนดักเตอร์เลเซอร์

ส่วนปิดกันที่เห็นแสดงอยู่นั้นเป็นกระบวนการที่ยุงยากเล็กน้อยจะอยู่ส่วนขอบล่างของโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำที่เรียกว่าแฟคเค็ต ( facets ) ซึ่งแฟคเค็ตตอนท้ายจะทำให้แสงทะลุออกมาแต่จะควบคุมการสะท้อนของแสงส่วนใหญ่ ในทางปฏิบัติแฟคเค็ตที่อยู่ด้านหน้าจะไม่ทำให้แสงออกมาแต่จะทำให้แสงสะท้อนไปมาในสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำเป็นสารที่ถูกกระตุ้นให้ปล่อยแสงมาก ดังนั้นที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นจึงจำเป็นต้องการสร้างลำแสงเลเซอร์

#### 4.1.5 ความแตกต่างของแหล่งกำเนิด ( Functional Differences )

สิ่งที่แตกต่างกันระหว่าง LED กับเลเซอร์ไดโอดนั้นมียุสองประการคือ ถ้าเป็น LED นั้นจะไม่มีตัวเรโซเนเตอร์ แต่ก็สามารถสร้างให้มีขนาดเล็กได้และเลเซอร์นั้นต้องทำเป็นแรงขับกระแสสูงเพื่อที่จะได้ความหนาแน่นของเลเซอร์มาก เอกลักษณ์ของเคมีคอนดักเตอร์เลเซอร์ขึ้นอยู่กับแรงขับกระแสที่ผ่านทะลุตัวมันโดยต้องมีแรงดันไบอัสที่มีค่าแรงขับกระแสอย่างน้อยตามต้องการและยาวนาน ที่ค่ากระแสต่ำเลเซอร์ที่ถูกปล่อยออกมาจะอ่อนเหมือนการปล่อยแสงตามธรรมชาติ ( spontaneous emission ) ซึ่งมีประสิทธิภาพเหมือนกับ LED ถ้ากระแสที่ให้ผ่านค่าขีดเริ่มไปแล้วนั้นก็จะเกิดเป็นลำแสงเลเซอร์ และเพิ่มความเข้มข้นเรื่อยๆ ดังรูป 4 -10



รูป 4 -10 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสกับกำลังของแสงที่ปล่อย

$$P = N \cdot hc / \lambda = (\eta \cdot E_g \cdot I) / e \dots\dots\dots(1)$$

- เมื่อ
- N คือ จำนวนของการประจุต่อวินาที
  - $\eta$  คือ อัตราส่วนการแพร่กระจายประจุที่ถูกรวมตัว
  - $E_g$  คือ พลังงานแถบหวงห้ามของสารในหน่วยของจูล

ความแตกต่างในโครงสร้างนี้เป็นส่วนสำคัญ เลเซอร์นั้นสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า LED ธรรมดาและให้กระแสที่สูงด้วยดังนั้นเลเซอร์จึงมีกำลังงานมากกว่า LED ความเข้มของแสงที่ปล่อยออกมานั้นจะเป็นลำแคบกว่าแสงจาก LED ซึ่งสามารถดูได้จากรูป 4 -1 ที่กล่าวมาแล้ว

#### 4.1.6 ความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอด

แสงเลเซอร์ของเลเซอร์ไดโอดนั้นขึ้นอยู่กับสิ่งที่ประกอบขึ้นของชั้นรอยต่อของสารกึ่งตัวนำเหมือนกับ LED สารประกอบของสารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่ที่นำมาทำเป็นแหล่งกำเนิดแสงสำหรับเส้นใยแก้วนำแสงจะใช้สารประกอบสารกึ่งตัวนำ

หมู่ที่ 3 รวมกับหมู่ที่ 5 เช่น แกลเลียมอะเซไนด์ ( Gallium arsenide ) หรืออินเดียมฟอสไฟด์ ( Indium phosphide ) โดย

- 1.  $Ga_{(1-x)}Al_xAs$  บน GaAs ความยาวคลื่น 780 nm ถึง 850 nm
- 2.  $In_{0.73}Ga_{0.27}As_{0.53}P_{0.42}$  บน InP ความยาวคลื่น 1310 nm
- 3.  $In_{0.53}Ga_{0.42}As_{0.9}P_{0.1}$  บน InP ความยาวคลื่น 1550 nm

โดยที่ InGaASP ยังให้ความยาวคลื่นอยู่ในช่วงระหว่าง 1100 nm ถึง 1600 nm และ InGaAs ให้ความยาวคลื่น 980 nm

#### 4.1.7 สเปกตรัมของเลเซอร์ ( Laser output spectrum )

เป็นที่รู้กันอยู่แล้วว่าเลเซอร์ไดโอดจะให้แถบสเปกตรัมที่แคบกว่า LED มากจึงทำให้เลเซอร์ไดโอดมีความสามารถในการส่งสัญญาณด้วยความเร็วสูงผ่านเส้นใยนำแสงโดยทำให้มีการแตกกระจายของสัญญาณน้อย ถึงอย่างไรก็ตามขนาดของแถบสเปกตรัมที่มีขนาด 1-3 nm ก็ใหญ่เพียงพอที่จะทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการแตกกระจายของสัญญาณสเปกตรัมของเลเซอร์ไดโอด ถึงแม้ว่าจะมีความเข้มของกำลังงานมากที่สุดที่ความยาวคลื่นหนึ่งก็ตาม แต่ในเลเซอร์ไดโอดการเกิดเลเซอร์ออสซิลเลชัน ( Laser Oscillation ) ที่ต่อเนื่องกันทำให้อัตราการขยายซึ่งมีผลต่อการเกิดความยาวคลื่นอื่นๆ ด้วย แต่ความยาวคลื่นเดียวเท่านั้นที่มีอัตราขยายสูงสุดระหว่างระยะทางของตัวเรโซเนเตอร์ที่กำเนิดเลเซอร์โดยความยาวคลื่นหาได้จาก

$$2D = N\lambda \dots\dots\dots(2)$$

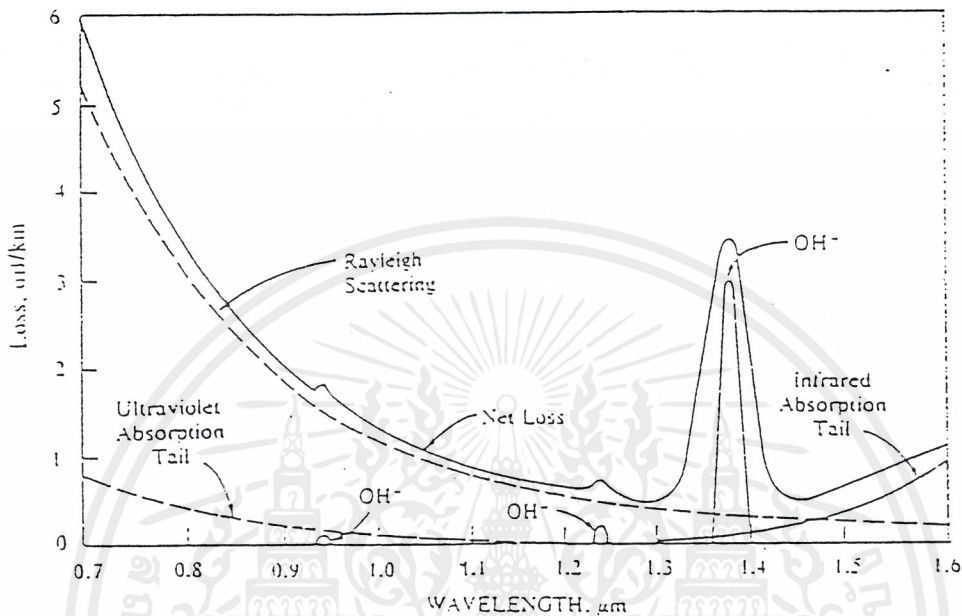
เมื่อ 2D คือ ระยะไปกลับระหว่างเรโซเนเตอร์ในหนึ่งรอบ  
 N คือ จำนวนเต็ม

โดยความยาวคลื่นนั้นต้องอยู่ในขอบเขตของความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่เกิดจากการปล่อยโดยการกระตุ้น

#### 4.1.8 Fiber Transmission Windows

ทั้งแหล่งกำเนิดที่เป็น LED และเลเซอร์ไดโอดจะมีลักษณะการส่งผ่านเหมือนกันถึงแม้ว่าจำนวนค่านิวเมอริคัล ( numerical value ) จะต่างกัน คุณลักษณะเด่นของการปล่อยแสงนั้นจะต้องเข้ากันได้กับช่องการปล่อยให้ผ่านของเส้นใยนำแสง ( Fiber Transmission Windows ) ซึ่งตามปกติจะมีค่าอยู่ที่ 0.85 , 1.3 และ 1.5 ไมโครเมตร โดยแสดงไว้ดังรูปที่ 4-11 ซึ่งจะทำให้

เกิดการสูญเสียในเส้นใยนำแสงน้อย วัสดุที่ใช้ทำแหล่งกำเนิดนั้นสามารถทำให้มีพฤติกรรมตามช่องทางนี้ได้



รูปที่ 4-11 Fiber Transmission Windows

อัตราส่วนของการได้ปในสารที่เป็นวัสดุที่ใช้ทำเลเซอร์ไดโอด จะสามารถหาช่องว่างแถบพลังงาน (band gap) ของสารผสมนั้นได้ ซึ่งจะทำให้ได้ความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมาด้วยสมการด้านล่างนี้ใช้ในการหาความคลื่นที่ปล่อยออกมาเมื่อทราบค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารผสมนั้น

$$\lambda (\mu\text{m}) = 1.24 / E_g (\text{eV}) \quad \dots\dots\dots(3)$$

- เมื่อ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นที่ต้องการหา
- $E_g$  คือ ช่องว่างแถบพลังงานในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์

## 4.2 วงจรขับ

เป็นส่วนที่ในการมอดดูเลทสัญญาณข้อมูลที่ต้องการส่งเข้าไปในเส้นใยนำแสงเข้ากับแสงโดยใช้ความเข้มของกระแสเป็นตัวกำหนดความเข้มของแสงที่จะปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดที่ใช้แล้วส่งเข้าไปในเส้นใยนำแสงเรียกว่าอินเทินซิตีมอดดูเลชัน ( Intensity Modulation ) โดยความยาวคลื่นของสัญญาณแสงจะมีค่าสั้นกว่า ( ความถี่มากกว่า ) ความยาวคลื่นของสัญญาณไฟฟ้ามากดังนั้นความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า จึงเป็นตัวที่ทำหน้าที่เป็นเอ็นเวลลอปของสัญญาณแสงที่ออกมา

### 4.2.1 การออกแบบตัวส่งแสง ( Transmitter design )

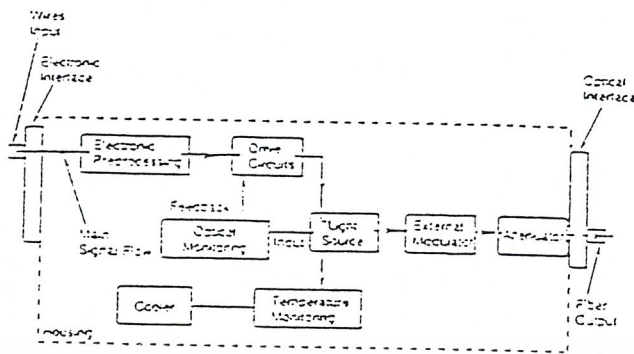
แหล่งกำเนิดแสงเป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบโดยตัวส่งแสงจะต้องสอดคล้องกับประเภทของแหล่งกำเนิดแสงด้วย และสอดคล้องกับประเภทของสัญญาณที่ส่งด้วยว่าเป็นอนาลอกหรือดิจิทัล โดยการออกแบบจะต้องมีตัวเรือน ซึ่งถือว่าเป็นส่วนที่ต้องการเพื่อช่วยป้องกันแหล่งกำเนิดไม่ให้เกิดความเสียหายและช่วยในการสร้างสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์และช่วยในการส่งแสงผ่านเส้นใยนำแสง โดยส่วนประกอบภายในจะต้องเป็นส่วนช่วยในการต่อแสงเชื่อมกับเส้นใยนำแสง และยังต้องการวงจรขับเพื่อขับกระแสและการควบคุมอุณหภูมิ

### 4.2.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของตัวส่งแสง

ในตัวเรือนของตัวส่งแสงจะต้องประกอบไปด้วยอุปกรณ์พื้นฐานที่จะกล่าวถึงซึ่งส่วนประกอบเหล่านี้สามารถแสดงให้เห็นได้ในรูปที่ 4 -12

1. ตัวเรือน ( housing )
2. ส่วนเชื่อมต่อทางอิเล็กทรอนิกส์ ( Electronic interfaces )
3. ส่วนเชื่อมต่อทางแสง ( Optical interfaces )
4. วงจรขับ ( Drive circuitry )
5. ส่วนควบคุมอุณหภูมิและส่วนหล่อเย็น (Tempertur sensing and cooling )
6. กระบวนการทางอิเล็กทรอนิกส์ ( Electronic processing )
7. ส่วนของมอนิเตอร์ทางแสง ( Optical monitoring )
8. ตัวลดทอนสัญญาณ ( Attenuator )

โดยบางครั้งอาจจะมีอุปกรณ์ส่วนอื่นๆเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเช่น External modulator ในกรณีที่แหล่งกำเนิดไม่สามารถมอดดูเลทแสงได้เอง หรือส่วนของการลดทอนสัญญาณในกรณีที่มีการติดต่อสื่อสารในระบบสั้นๆ

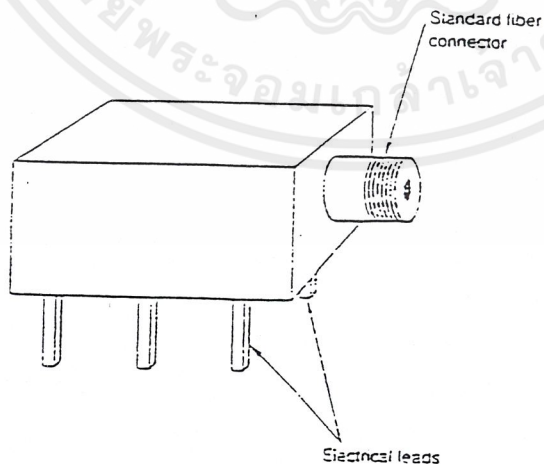


รูปที่ 4-12 แสดงส่วนประกอบในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสง

1. ตัวเรือน ( housing ) ตัวเรือนนี้จะมีรูปแบบอย่างต่างๆ โดยจะออกแบบเป็นกล่องสี่เหลี่ยมเพื่อความสะดวกซึ่งจะมีหัวต่อสองส่วนคือ ส่วนเชื่อมต่อทางแสงและส่วนเชื่อมต่อทางอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งส่วนใหญ่จะออกแบบเป็นมาตรฐาน

2. ส่วนเชื่อมต่อทางอิเล็กทรอนิกส์ ( Electronic interfaces) ส่วนนี้อาจจะเป็นสายไฟ ( wire ) ธรรมดา หรือเป็นขั้วยื่นออกมาจากรูปทรงของหีบห่อ ( packages ) ตัวส่งแสงอย่างง่ายสามารถที่จะขับกระแสด้วยสัญญาณไฟฟ้าที่เข้าไปได้โดยตรง

3. ส่วนเชื่อมต่อทางแสง ( Optical interfaces) เป็นการเชื่อมต่อแหล่งกำเนิดและเส้นใยนำแสง ดังแสดงในรูปซึ่งเป็นหัวต่ออยู่ในตัวเรือน แสงจะถูกส่งไปยังเส้นใยนำแสงโดยเลนส์ข้างในที่ประกอบด้วย collimating lens และส่วนเส้นใยนำแสง ส่วน Fiber Pigtail จะทำการรวมแสง จากบริเวณที่มีแสงเปล่งออกมาและส่งไปข้างนอกซึ่งสามารถต่อเข้ากับเส้นใยนำแสงภายนอกได้



รูปที่ 4-13 แสดงส่วนเชื่อมต่อทางแสงของตัวส่ง

4. วงจรขับ ( Driver circuitry ) ขึ้นอยู่กับชนิดของการใช้งาน ขนาดข้อมูล และแหล่งกำเนิดแสง LED สามารถถูกขับได้โดยตรง โดยอาศัยแหล่งกำเนิดกระแส ( current source ) ที่เหมาะสม ( ถึงแม้ว่าสัญญาณส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแรงดันและจะต้องถูกแปลงให้เป็นกระแส ) อย่างไรก็ตาม เซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์จะต้องถูกไบอัสจนถึงระดับกระแสที่ใกล้เคียงกับค่า laser threshold

5. ส่วนควบคุมอุณหภูมิและส่วนหล่อเย็น ( Temperature sensing and cooling ) คุณลักษณะการทำงานของเซมิคอนดักเตอร์ อันได้แก่ threshold current กำลังเอาต์พุตและความยาวคลื่นจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ค่า threshold current จะเพิ่มขึ้นแบบเอกซโปเนนเชียลตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป  $\Delta T = (T_1 - T_2) / T_1$  ซึ่ง  $T_1$  คืออุณหภูมิตอนเริ่มต้น  $T_2$  คืออุณหภูมิสุดท้าย เนื่องจากสัญญาณเอาต์พุตเป็นส่วนหนึ่งของกระแสขับที่มีค่ามากกว่า threshold current กำลังเอาต์พุตลดลงขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น กำลังเอาต์พุตจะถูกทำให้หมดไปภายในเลเซอร์ ดังนั้นช่วงชีวิต ( life time ) ของเลเซอร์จะลดลงตามอุณหภูมิทำงาน การเปลี่ยนแปลงในเรื่องความยาวคลื่นมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในดัชนีหักเหของสารกึ่งตัวนำและในช่องว่างเลเซอร์ ( laser cavity )

Thermoelectric cooler ในตัวส่งแสงสามารถทำให้การทำงานมีความแน่นอนที่อุณหภูมิคงที่ การควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์สามารถลดความไม่เที่ยงของกำลังเอาต์พุตอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ จะทำให้กำลังเอาต์พุตที่คงที่เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการทำงานของอุปกรณ์รับแสง ขณะที่กำลังเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้ลดลงอัตราผิดพลาดเคลื่อน ( bit - error rate ) เพิ่มขึ้นในระบบดิจิทัล และ s/n ratio ลดลงในระบบอนาล็อก จะทำให้ระบบการทำงานของอุปกรณ์กำเนิดแสงลดลงและขั้นตอนนี้จะทำให้ความยาวคลื่นของแสงคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง กระแสขีดเริ่มมีค่าคงที่ ( threshold current )

6. กระบวนการทางอิเล็กทรอนิกส์ ( Electronic processing ) เป็นกระบวนการขั้นต้นที่วงจรขับของตัวส่งแสงจะทำการใส่สัญญาณไฟฟ้าทางอินพุตให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมสำหรับการขับแหล่งกำเนิดแสง ตัวอย่างเช่นการแปลงสัญญาณจากแรงดันซึ่งจะขับวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ไปเป็นกระแสซึ่งจะมอดดูเลท Laser และ LED

7. ส่วนของมอนิเตอร์ทางแสง ( Optical monitoring ) ตัวส่งแสงชนิดเลเซอร์ประกอบด้วยวงจรถอดเอาต์พุตที่มีเสถียรภาพ ไฟไดโอดเทคเตอร์จะตรวจจับแสงที่แผ่ออกจากส่วนหน้าของเลเซอร์และขับวงจรการป้อนกลับ ( Feedback circuit ) ซึ่งจะปรับกระแสขับจนกำลังเอาต์พุตทั้งหมดคงที่ นอกจากนี้วงจรถอดทอนสัญญาณ ( Attenuator ) ตัวส่งแสงจะสร้างระดับกำลังที่เป็นมาตรฐาน แต่ในบางกรณีระดับกำลังเหล่านี้อาจจะสูงกว่าที่ต้องการเนื่องจากตัวรับแสง

สามารถรับกำลังเอาต์พุตได้จำกัด ในบางครั้งจะใช้ตัวลดทอนสัญญาณเพื่อที่จะลดกำลังเอาต์พุตของตัวส่งแสงให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยสำหรับตัวรับแสง

#### 4.2.3 การออกแบบตัวส่งโดยใช้ LED อย่างง่าย

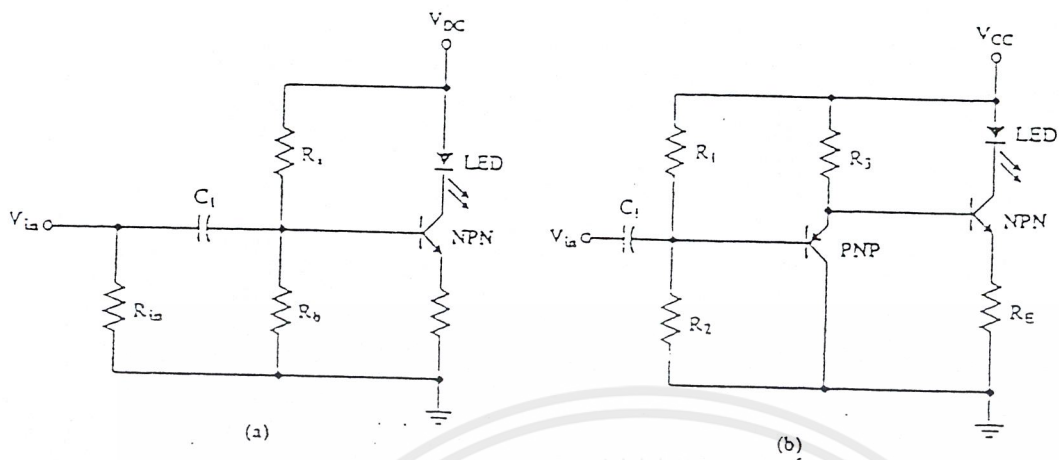
LED เป็นแหล่งกำเนิดที่จะเปล่งแสงเมื่อทำการไบแอสแรงดันซึ่งมีค่าอย่างน้อยสูงกว่าแรงดันในช่องว่างหรือดีฟิสิกชัน โดยมีค่าประมาณ 1.5 โวลต์สำหรับ LED ที่ทำจาก GaAlAs ความยาวคลื่น 800 - 900 nm และประมาณ 1 โวลต์สำหรับ GaAsP ที่มี ความยาวคลื่น 1300 nm วงจรขับสำหรับแหล่งกำเนิด LED แสดงดังรูปที่ 4-14



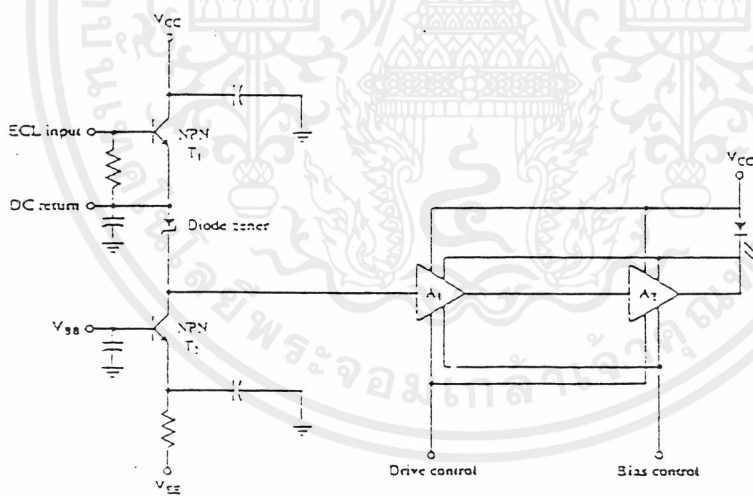
รูปที่ 4-14 แสดงวงจรขับอย่างง่ายสำหรับ LED source

#### 4.2.4 ออกแบบตัวส่งแสงโดยใช้เลเซอร์ไดโอดอย่าง

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์จะเหมือนกับ LED เนื่องจากทั้งคู่เป็นแหล่งกำเนิดแบบใช้สารกึ่งตัวนำทั้งคู่ แต่เลเซอร์จะให้แสงออกมาก็ต่อเมื่อแรงขับกระแสสูงกว่าค่าแรงขับกระแสขีดเริ่ม (threshold current) เนื่องจากต้องการกระแสขับที่มากกว่านั้นตัวต้านทานที่ใช้จำกัดกระแสจึงต้องมีค่าน้อย โดยค่าแรงขับกระแสอยู่ในช่วง 100 - 200 mA และแรงเคลื่อนไฟฟ้า 1.6 - 1.8 V วงจรขับของเลเซอร์ไดโอดในรูปที่ 4-15 และรูปที่ 4-16 ใช้ในทางดิจิทัล ซึ่งในวงจรที่ 4.16 a ใช้วงจรขับแบบแบ่งกระแส (shut driver) และทรานซิสเตอร์แบบฟิลด์เอฟเฟ็คท์ (field effect transistor) โดยค่า  $R_2$  และ C ใช้ในการไบแอสกับทรานซิสเตอร์ โครงสร้างของวงจรมีสามารถที่จะมอดดูเลทแสงได้มากถึงจีกะ ( $10^9$ )



รูปที่ 4.15 แสดงวงจรรับของเลเซอร์ไดโอดแบบอนาล็อก



รูปที่ 4.16 แสดงวงจรรับของเลเซอร์ไดโอดแบบดิจิทัล

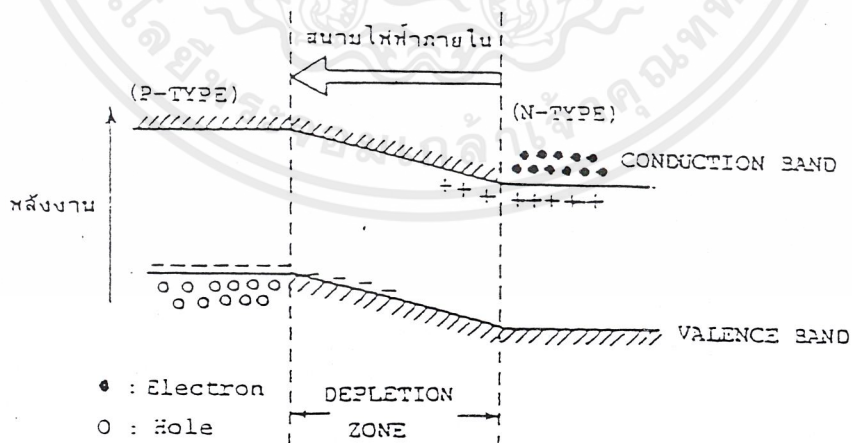
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 อุปกรณ์รับแสง

การรับแสงคือการเปลี่ยนแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ในการทำงานนี้สามารถแบ่งได้ 2 วิธี วิธีที่หนึ่งคือการเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งเรียกวินี้ว่า Photo electric effect โดยใช้กระบวนการดูดพลังงานนั้นคือ เมื่อมีแสงมาตกกระทบบสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์แบนด์จะเลื่อนขึ้นไปอยู่ที่แถบคอนดักชันแบนด์แต่การเลื่อนขึ้นไปนี้เป็นแต่เพียงอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เท่านั้นและในที่สุดจะกลับมารวมกับโฮลอีกครั้งในแถบวาเลนซ์แบนด์ทำให้ไม่ได้รับ photo electric effect ด้วยเหตุนี้เพื่อที่จะเปลี่ยนแสงให้เป็นกระแสไฟฟ้าจะต้องใช้สภาพการแยกกันของอิเล็กตรอนกับโฮลก่อนที่จะมารวมตัวกัน

วิธีที่สองทำได้โดยการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานความร้อนแล้วจึงเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า Sensitive Heat effect โดยทั่วไปจะมีการตอบสนองช้ามากและความไวไม่คืนักจึงใช้ เทอร์มิคัปเปิล ( Thermocouple ) และไบโรมิเตอร์และอื่นๆแต่นำมาใช้ในการสื่อสารด้วยแสง

สำหรับอุปกรณ์รับแสงสารกึ่งตัวนำก็เช่นเดียวกันกับแหล่งกำเนิดแสง นั่นคือเพื่อที่จะแยกอิเล็กตรอนกับโฮลนั้นโดยทั่วไปใช้ PN-junction ซึ่งที่รอยต่อของ P-N นั้นจะเกิดสนามไฟฟ้าในที่ว่างขึ้นโดยมันจะถูกดึงด้วยอิเล็กตรอนของ N-type ของ โฮลของ P-type ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบและบวกตามลำดับ เป็นผลให้ไม่มีอิเล็กตรอนและโฮลขึ้นตรงบริเวณรอยต่อนี้ เรียกว่า Depletion zone ดังในรูปที่ 4-17



รูป 4-17 แสดงลักษณะของ Depletion zone

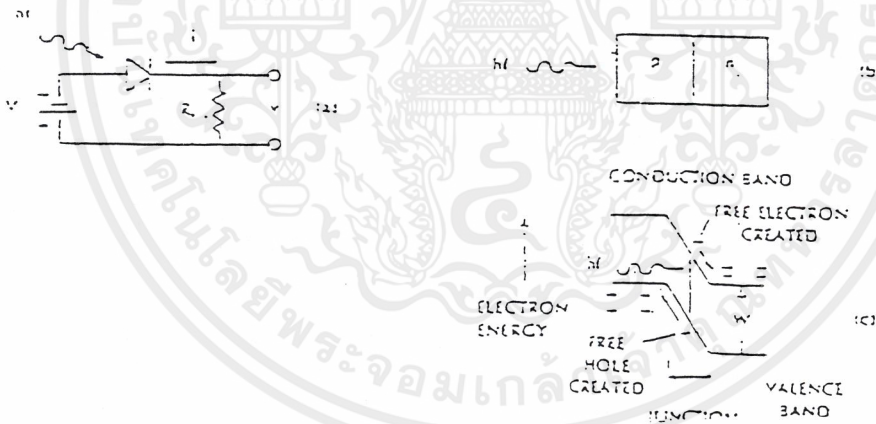
อุปกรณ์รับแสงที่ใช้ในการสื่อสารทางแสงส่วนใหญ่จะเป็นพวกโฟโตดีเทคเตอร์ ( photodetector ) โดยทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานทางแสงเป็นพลังงานทางไฟฟ้า โฟโตดีเทคเตอร์ ในอุดมคติจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

1. จะต้องมีความสามารถรับแสงที่เบาบางที่ตกกระทบอุปกรณ์
2. จะต้องสามารถทำงานในช่วงใกล้อินฟราเรด( 850 , 1300 , 1500 nm )
3. จะต้องมีความเร็วเพียงพอต่อการเปลี่ยนแสงเป็นอิเล็กทรอนิกส์
4. จะต้องมีย่านเล็กเข้ากับเส้นใยนำแสงได้ดี
5. จะต้องมีย่านที่ต่ำ
6. จะต้องไม่ไวต่อสิ่งแวดล้อม

โดยปกติทั่วไปจะใช้ตัวรับแสงชนิดที่เรียกว่า PN Photodiode , PIN photodiode , AVD( avalanche diode)

#### 4.3.1 พีเอ็นโฟโตไดโอด ( PN Photodiode )

เป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่าโฟโตไดโอดจะทำงานเมื่อมีแรงดันไบอัสให้กับตัวโฟโตไดโอดแบบไบอัสกลับ ( reverse bias ) ตามรูปที่ 4-18 แสดงลักษณะของ PN photodiode



รูปที่ 4-18 a) เมื่อป้อนแรงดัน reverse bias , b) ลักษณะของ PN junction , c) แสดงระดับพลังงาน

เมื่อให้แรงดันไฟไบอัสกลับจะกลับทำให้ค่าพลังงานก้ำกั๊งค์ย(energy barrier) ระหว่างรอยต่อพีและเอ็นเพิ่มขึ้นทำให้อิเล็กตรอนอิสระทางด้านเอ็นและโฮลอิสระ

ทางด้านพีไม่สามารถข้ามบริเวณที่เกิดกำแพงศักย์ได้จึงไม่มีกระแสไหล บริเวณรอยต่อที่ไม่มีประจุใดๆเลยนี้เรียกว่า Depletion zone ตามที่กล่าวมาแล้ว บริเวณความต้านทานสูงเป็นผลให้โวลเตจทั้งหมดที่ตกคร่อมไดโอดจะตกคร่อมบริเวณนี้เกือบทั้งหมด

พิจารณารูปที่ 4-18 (c) เมื่อกลุ่มก้อนโฟตอนถูกดูดกลืนในรอยต่อที่ผ่านด้านพีมา แล้ว การดูดกลืนพลังงานทำให้อิเล็กตรอนข้ามแถบช่องว่างพลังงาน ( band gap ) จากวาเลนซ์แบนด์ไปยังคอนดักชันแบนด์ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระและทำให้โฮลออกจากวาเลนซ์แบนด์ ดังนั้นจะมีประจุอิสระที่ถูกสร้างขึ้นจากการดูดกลืนโฟตอนซึ่งอิเล็กตรอนจะเคลื่อนตัวลงไปยังกำแพงศักย์และโฮลจะเคลื่อนที่ไปยังกำแพงศักย์ซึ่งเป็นสาเหตุให้กระแสไหลผ่าน วงจรภายนอกเหมือนกับการปลดปล่อยแสงของอิเล็กตรอน ซึ่งในกรณีนี้จะเกิดกระแสไหลในหลอดโฟโตไดโอดเมื่อโฮลและอิเล็กตรอนรวมตัวกันใหม่ที่บริเวณนั้นจะเกิดกระแสไฟฟ้าอ่อนๆซึ่งจะทำให้ประจุต่างๆหยุดเคลื่อนที่ทำให้กระแสหยุดไหล นอกจากนี้ประจุพาหะจะถูกสร้างขึ้นใกล้ Depletion zone และมันสามารถที่จะแพร่ผ่านบริเวณนี้ไปได้ ดังนั้นจะเกิดสนามไฟฟ้าจำนวนมากที่บริเวณรอยต่อทำให้มีกระแสภายนอกเกิดขึ้น

#### 4.3.2 พีไอเอ็นโฟโตไดโอด ( PIN photodiode )

พีไอเอ็นโฟโตไดโอดเป็นอีกชนิดหนึ่งที่ใช้ชั้นของ depletion-layer เข้ามาใช้ในการทำงานเรียกเต็มๆว่า positive-intrinsic-negative เป็นที่นิยมใช้มากในระบบสื่อสารในการเป็นดีเทคเตอร์รับแสง พีไอเอ็นจะมีชั้นอินทรินสิค ( intrinsic ) อยู่ระหว่างกลางของชั้นที่มีการโด๊ปเป็นพาหะบวก หรือด้านพีและชั้นที่มีการโด๊ปเป็นพาหะลบหรือด้านเอ็นมีโครงสร้างดังรูป 4-19 แสงจะตกกระทบบนด้านพีของโฟโตไดโอด และมีการดูดกลืนแสงโดยอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เข้าไปข้างหน้าเข้าไปยังชั้นอินทรินสิคเลเยอร์ที่ไม่มีประจุอยู่เลยดังนั้นจึงมีความต้านทานสูงจึงทำให้โวลเตจตกคร่อมไดโอดจะตกคร่อมที่ชั้นนี้เกือบทั้งหมดและมีแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้ามาก โดยระหว่างนั้นต้องมีการไบอัสแรงดันแบบกลับให้กับโฟโตไดโอดด้วย โดยในการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลนั้นจะต้องมีพลังงานอย่างเพียงพอ พลังงานโฟตอนที่ใช้ทำให้เราทราบค่าความยาวคลื่นคัทออฟ ( Cutoff wavelength ) ไม่อย่างนั้นโฟโตไดโอดจะไม่เปลี่ยนแสงเป็นกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งความยาวคลื่นคัทออฟสามารถหาได้จากแถบพลังงานช่องว่างของสารที่นำมาทำโฟโตไดโอดได้ดังสมการ

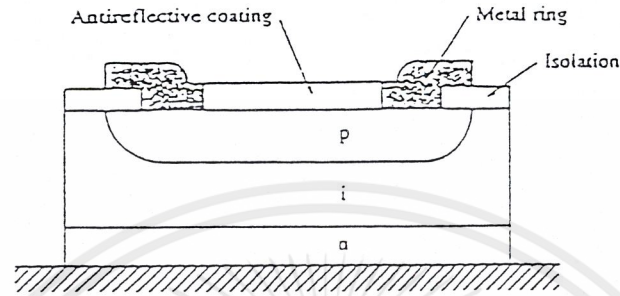
$$\lambda_c = (h*c)/E_g = 1.24/E_g \dots\dots\dots(4)$$

เมื่อ  $\lambda_c$  คือ ความยาวคลื่นที่ทำงาน ในหน่วย ไมโครเมตร

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์

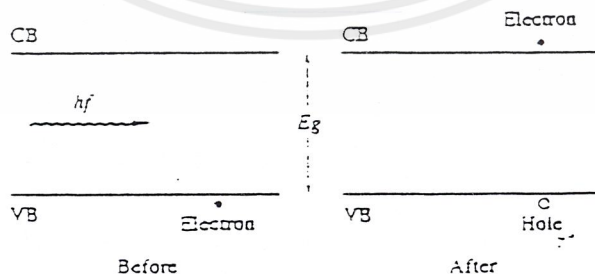
c คือ ความเร็วแสง

$E_g$  คือ แถบพลังงานช่องว่างของสารที่นำมาทำโฟโตไดโอด (eV)



รูปที่ 4-19 แสดงโครงสร้างของ PIN photodiode

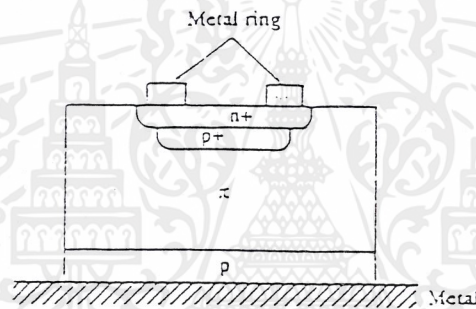
อิเล็กตรอนจะต้องอยู่ในชั้นของคอนดักชันแบนด์ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าหรือกระแสโฟตอน คู่อิเล็กตรอน-โฮลจะถูกแยกโดยค่าสนามไฟฟ้าในชั้นอินทรินสิคเลเยอร์ ความหนาของชั้นอินทรินสิคเลเยอร์ควรจะบางแต่กว้างสำหรับการดูดกลืน (บริเวณที่ทำให้เกิดประจุลบ) ตามรูปที่ 4-20 ความบางเป็นส่วนสำคัญเนื่องจากมันจะอำนวยความสะดวกในการตกกระทบของโฟตอนและสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นมา บริเวณด้านเอ็นควรจะมีแคบมากๆ อิเล็กตรอนจะไม่เคลื่อนที่ออกจากอุปกรณ์ PIN photodiode จะใช้ในการสื่อสารระยะสั้นๆ และมีการมอดูเลตด้วยความถี่ต่ำ เหมาะสำหรับการเป็นตัวรับของ LED ซึ่งปกติจะใช้แรงดันไบอัสกลับ 7-10 โวลต์



รูปที่ 4-20 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสง

### 4.3.3 ภาวะลานซีโฟโตรีโอดีโอด (avalanch photodiode)

อุปกรณ์รับแสงจะทำงานเมื่อมีแรงดันไบอัสที่สูงมากตามปกติแล้วจะมากกว่า 300 โวลท์โดยมีภาคขยายหรือการเพิ่มขึ้นอย่างทวีคูณของกระแสไฟโอดีที่เพิ่มขึ้น AVD หรือ ภาวะลานซีโฟโตรีโอดีโอดเหมาะสำหรับการสื่อสารที่ใช้ในระยะทางไกลๆและความถี่ที่มอดูเลตสูง ( ประมาณ 100 Mhz ) ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้กับแหล่งกำเนิดที่เป็นเลเซอร์ไดโอด ซึ่งโดยปกติจะใช้โครงสร้างที่เรียกว่า reach-through construction APD ( RAPD ) โดยที่ reach-through avalanche photodiode จะเรียงจากด้านพี ( P-type ) ซึ่งมี  $p^+$  วางอยู่ และมี  $n^+$  วางอยู่ตามรูปที่ 4-21 โครงสร้างนี้เป็นโครงสร้างแบบ  $p^+ \pi p n^+$  ชั้นของ  $\pi$  เลเยอร์นี้เป็นชั้นของอินทรินสิคเลเยอร์ซึ่งมีการโด๊ปเป็นชนิดพีด้วยโบรอนหรือฟอสฟอรัส ลักษณะของ APD เหมือนกับ PN-junction สนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากชั้น depletion region



รูปที่ 4-21 แสดงโครงสร้างของภาวะลานซีโฟโตรีโอดีโอด

แสงที่เข้ามาจะต้องผ่านชั้น  $p^+$  และจะถูกดูดกลืนโดยชั้น  $\pi$  เลเยอร์ โฟตอนจะสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น อิเล็กตรอนจะเคลื่อนลอยมาที่รอยต่อพีเอ็นซึ่งมีสนามไฟฟ้าสูง ซึ่งสนามนี้จะไปเร่งให้อิเล็กตรอน-โฮลเร็วขึ้นเป็นผลให้เกิดการชนกับคู่อิเล็กตรอนคู่อื่นๆ ซึ่งการชนนี้จะเกิดขบวนการเพิ่มขึ้นอย่างทวีคูณของพาหะโดยนิยามไว้ว่า

$$M = 1/(1 - V/V_B)^n \dots\dots\dots(5)$$

- เมื่อ  $V$  คือ แรงดันไบอัสกลับที่ใส่เข้าไป
- $V_B$  คือ แรงดันพลังทำลาย ( breakdown voltage )
- $n$  คือ ค่าคงที่ระหว่าง 3 กับ 6 ซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของสารที่ทำอุปกรณ์รับแสง

จำนวนเฉลี่ยของการเกิดอิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดจากการสร้างโฟตอนต่อหนึ่งหน่วยความยาวเรียกว่า ไอออไนเซชันเรต ( ionization rate ) บอกถึงความแตกต่างสำหรับอิเล็กตรอนกับโฮล

#### 4.4 คุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง

ประสิทธิภาพของอุปกรณ์รับแสงประเมินได้จากคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ประสิทธิภาพทางควอนตัม ( Quantum efficiency ) ซึ่งแสดงว่าแสงที่รับมาได้นั้นเปลี่ยนเป็นไฟฟ้าได้มากเท่าใด ความไวการรับแสง ( ระดับรับแสงต่ำสุดที่ต้องการสำหรับการส่งที่มีคุณภาพ ) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการออกแบบระยะเวลาการถ่ายเทของระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง สัญญาณรบกวน ( noise ) ที่เกิดขึ้นและความเร็วที่ตอบสนองการทำงาน สำหรับประสิทธิภาพทางควอนตัมกำหนดจากสารและโครงสร้างของอุปกรณ์รับแสง แต่สำหรับความไวการรับแสงนั้นจะเกี่ยวข้องกับขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้

เนื่องจาก APD ใช้ปรากฏการณ์การขยายแบบอวาลานซ์ตามที่กล่าวมาแล้วนั้น ดังนั้นจึงมีความไวสูงประมาณ 10 -20 dB ( 10 - 100 เท่า ) เมื่อเทียบกับโฟโตไดโอดธรรมดา สัญญาณรบกวนที่เกิดในอุปกรณ์รับแสงมีสิ่งๆที่เรียกว่า Shot noise ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสโฟโต้ ( photo current ) ที่เกิดจากการกระตุ้นอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นระเบียบทางเวลา โดย Shot noise เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Shot noise current} = I_0 M^2{}^F \dots\dots\dots (6)$$

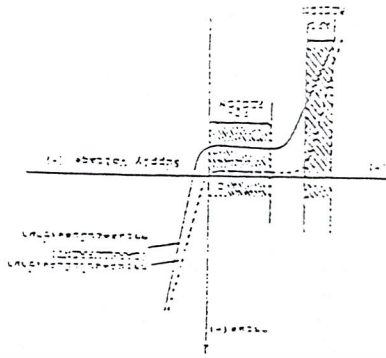
เมื่อ M คือ อัตราการขยายกระแสของอุปกรณ์รับแสง

$I_0$  คือ กระแสโฟโต้ในกรณีที่  $M = 1$

F คือ Excess noise figure มีค่ามากเมื่อเทียบกับ M

นั่นคือจากสมการจะเห็นว่าที่ระดับการรับแสงที่เท่ากันถ้าหากว่าทำให้แรงดันไบแอสแบบย้อนกลับที่ป้อนให้มีค่าสูงและทำให้อัตราการขยายกระแสเพิ่มขึ้นนั้นสัญญาณออก ( Output signal  $I_0 M^2{}^F$  ) จะเพิ่มขึ้นมากด้วย แต่ shot noise ก็เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

คุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสงโดยทั่วไปแสดงดังรูป 4 -22 จากรูปจะช่วยให้เข้าใจความแตกต่างของบริเวณการทำงานของ APD และ photodiode ได้ดี และในรูปนี้ได้แสดงถึงการไหลของกระแสที่เรียกว่า dark current ที่เกิดในสภาพที่มีแรงดันไบแอสกลับแต่ไม่มีแสงเข้า



รูป 4-22 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้และกระแสไฟได้

กระแส dark current นี้มีลักษณะพิเศษคือ มันจะเพิ่มขึ้นเร็วกว่าการเพิ่มขึ้นของสัญญาณออก ( output signal ) shot noise เป็นสิ่งที่เกิดจาก dark current และอื่นๆ ที่เป็นแหล่งต้นกำเนิดในการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงนอกจากจะต้องคำนึงถึง shot noise นี้แล้วยังมี thermal noise ที่เกิดจากในวงจรไฟฟ้าไม่เกี่ยวกับสัญญาณแสงที่เข้ามา ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องเลือกค่า M ที่เหมาะสมทำให้ผลรวมของ shot noise และ thermal noise มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับค่าระดับของสัญญาณ

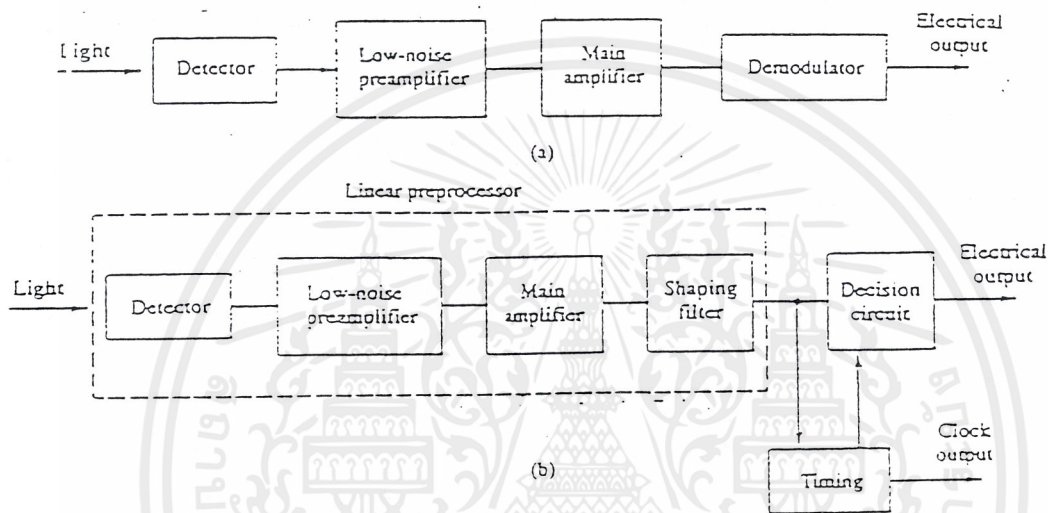
ความเร็วในการตอบสนองต่อความถี่เป็นสิ่งที่กำหนดจากเวลาที่สัญญาณเข้ามาจนกระทั่งเกิดปรากฏการณ์ดูดแสง แต่ปัจจุบันเนื่องจากทั้ง APD และ photodiode สามารถตอบสนองความเร็วได้ถึงหลาย GHz จึงไม่มีปัญหาการใช้งาน โดยการเปรียบเทียบคุณสมบัติของ APD และ photodiode แสดงดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง

	อุปกรณ์รับแสง	
หัวข้อ	PD	APD
ประสิทธิภาพทางควอนตัม	80%	80%
ความไวการรับแสง	-15 ถึง -20 dBm <sub>0</sub>	-30 ถึง -40 dBm <sub>0</sub>
ความเร็วการตอบสนองความถี่	หลาย GHz	หลาย GHz
อัตราขยาย	1	500
ค่าแรงดันไฟฟ้าไบอัสที่ต้องการ	0-20 V	V

#### 4.5 วงจรอุปกรณ์รับแสง

ตามรูปที่ 4-23 แสดงลักษณะของบล็อกไดอะแกรมของวงจรรับแสงทั้งสัญญาณที่เป็นดิจิทัลและอนาล็อกจะคล้ายกันมาก เอาร์ทพุทที่ออกมาจากดีเทคเตอร์จะมาเข้าในวงจรรขยายเพื่อทำให้กระแสมากขึ้น



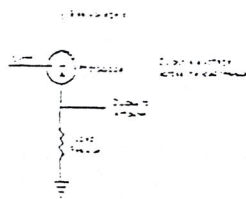
รูปที่ 4-23 บล็อกไดอะแกรมของวงจรรับแสง

a) analog

b) digital

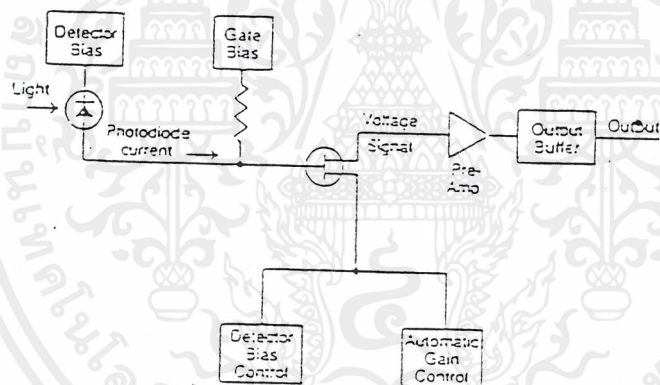
##### 4.5.1 วงจรรับแสงแบบโฟโตไดโอด

ตามปกติ และ PN PIN photodiode ที่ใช้ในการสื่อสารทางแสงมีวงจรรการใช้ตามรูปแบบที่กำหนดซึ่งจะต้องมีการไบแอสกลับให้โฟโตไดโอดและความต้านทานที่ต่ออนุกรมเข้ากับโฟโตไดโอดซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4-24 ซึ่งวิธีนี้โฟโตไดโอดจะเป็นตัวนำทางแสง (photoconductive) เนื่องจากกระแสโฟโตที่ไหลเป็นสัดส่วนกับความต้านทานของแสงสว่างของโฟโตไดโอด



รูปที่ 4-24 แสดงวงจรรับแสงของ PN และ PIN photodiode

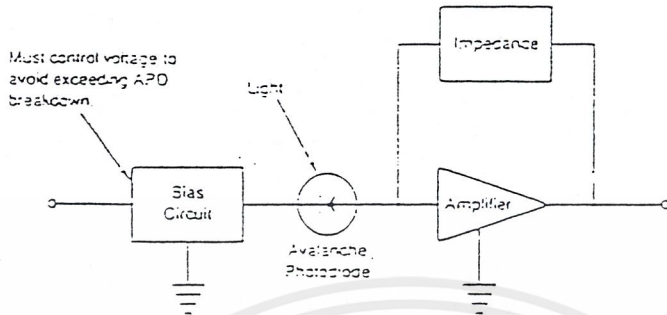
การแบ่งแรงดัน ระหว่างโฟโตไดโอดกับตัวต้านทานขึ้นอยู่กับความสว่างถ้าสว่างมาก โฟโตไดโอดกระแสก็มากในวงจรที่แสดงนี้สัญญาณข้อมูลจะตกคร่อมที่ตัวความต้านทานนอกจากนี้ยังมีวงจรที่ยุ่งยากกว่าโดยมีวงจรมายาวด้วยนอกจกตัวต้านทาน คือ PIN-FET and detector preamplifier ในรูปที่ 4-25



รูปที่ 4-25 แสดงบล็อกไดอะแกรม PIN-FET receiver circuit

#### 4.5.2 วงจรรับแบบอะวาลานซ์โฟโตไดโอด

รูปแบบของวงจรก็คล้ายกับวิธีแรกเนื่องจากต้องการแรงดันไบอัสเหมือนกันแต่ต้องการมากกว่าซึ่งแต่ละขั้นตอนต้องใช้ความแน่นอนในการทำซึ่งรูปแบบแสดงในรูป 4-26



รูปที่ 4-26 แสดงวงจรรับแบบอะวอลานซ์โฟโตไดโอดอย่างง่าย

ในทางปฏิบัติมีค่าหนึ่งที่มีความสำคัญกับโฟโตดีเทคเตอร์ คือค่า Responsivity ( R ) บางครั้งอาจเรียกว่า radiant sensitivity ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของกระแสโฟโต ( กระแสที่เกิดจากการดูดกลืนโฟตอน ) กับพลังงานที่ตกกระทบ

$$R = I_p/P_i \dots\dots\dots(7)$$

โดย R มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อวัตต์ ( Ampere/ watt )

และ 
$$I_p = (N_p \cdot e)/s \dots\dots\dots(8)$$

โดย e คือ ประจุของอิเล็กตรอน

$N_p$  คือ จำนวนของอิเล็กตรอนที่ถูกสร้างขึ้น

และ 
$$P_i = (N_p E_p)/s \dots\dots\dots(9)$$

โดย  $E_p$  คือ พลังงานของโฟตอน

$N_p$  คือ จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ

ดังนั้นจะได้ว่า

$$R = (N_p \cdot e) / (N_p E_p) = (n_q e) / E_p \dots\dots\dots(10)$$

$$R = (n_q e) / hf = [n_q (e\lambda)] / (hc) \dots\dots\dots(11)$$

- เมื่อ  $\lambda$  มีหน่วยเป็นเมตร  
 $c$  มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที  
 $R$  มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อวัตต์  
 $e$  มีหน่วยเป็นคูลอมป์

ดังนั้นจะได้

$$R = (n_q \lambda) / 1.24 \dots\dots\dots(12)$$

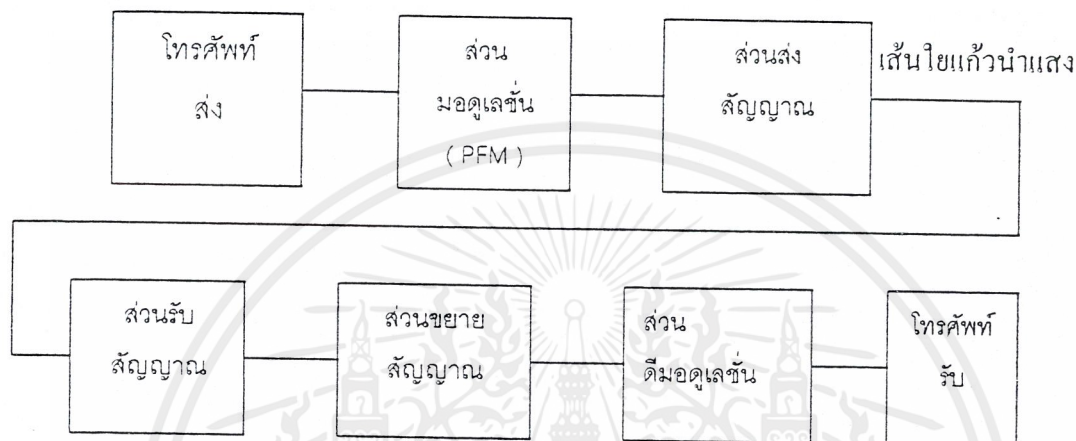
จากสมการข้างต้นและ responsivity จะเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มความยาวคลื่น เมื่อแสงพุ่งเข้าโฟโตรีโอดที่บรรจุภายในแก้วหรือพลาสติก โดยแสงต้องทะลุผ่านชั้นเอ็นหรือชั้นพีเข้าสู่ดีพลีชันหรืออินทรินสิค โดยหากผ่านเข้าได้ก็ขึ้นอยู่กับกำลังส่งของแสงด้วย ตาราง 4-3 ตารางเปรียบเทียบตัวรับแสงชนิดต่างๆ

Photo detector	Wavelength (nm)	Responsivity (AW)	dark current (nA)	rise time (nS)	operating voltage (V)
Si P-N	550-850	0.4-0.7	1-5	5-10	20-40
Si PIN	850-950	0.6-0.8	3-300	1-5	5-40
InGaAs PIN	300-1500	0.8	10-30	1-3	5-40
Si APD	650-900	7.4-100	1	0.5-2	60-120
photo TR	800-900	70	25-100	5-15µs	10

## บทที่ 5

### หลักการและแนวคิดในโครงการ

หลักการและแนวคิดของการเชื่อมต่อสัญญาณโทรศัพท์ผ่านทางเส้นใยนำแสง (Fiber Optic) ซึ่งในโครงการนี้เราทำการเชื่อมต่อแบบ Simplex คือติดต่อได้ทางเดียวโดยหลักการและแนวคิดโครงการนี้ สามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



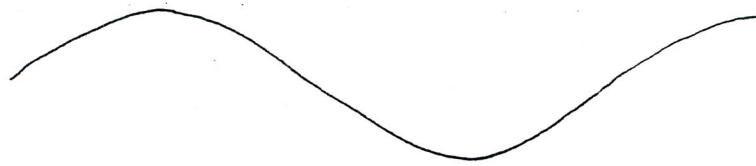
รูปที่ 5-1 บล็อกไดอะแกรม

#### 5.1 โทรศัพท์ส่ง

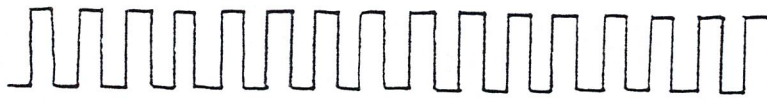
ส่วนนี้เป็นส่วนที่แปลงสัญญาณเสียงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าโดยสัญญาณทางไฟฟ้าที่กำเนิดจากโทรศัพท์จะมีความถี่ของสัญญาณอยู่ในช่วง 600 Hz - 3,400 Hz ซึ่งเป็นช่วงที่เราได้ยิน

#### 5.2 ส่วนมอดูเลชัน (PMF)

ส่วนนี้จะนำสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโทรศัพท์มาทำการมอดูเลชันสัญญาณ โดยเราจะมอดูเลชันแบบ PMF ( Plus Frequency Modulation ) ลักษณะของ PMF จะแสดงได้ดังรูปที่ 5-2



สัญญาณอนาล็อก



สัญญาณพาหะที่มีลักษณะเป็นพัลส์



สัญญาณ PFM

**รูปที่ 5-2 แสดงการมอดูเลชันสัญญาณแบบ PFM**

ลักษณะของสัญญาณ PFM นั้นความถี่ของพัลส์จะเปลี่ยนแปลงตามแอมพลิจูด หรือโวลต์ ของสัญญาณอะนาล็อกซึ่งเราเรียกว่า VCO (Voltage Controlled Oscillator) ซึ่งที่ค่าโวลต์มาก ๆ ความถี่ของสัญญาณของพัลส์จะมากตามไปด้วย

### 5.3 ส่วนส่งสัญญาณ

ส่วนส่งสัญญาณจะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณทางไฟฟ้าให้ เป็นสัญญาณทางแสง เพื่อส่งไปตาม เส้นใยนำแสง

### 5.4 ส่วนรับสัญญาณ

ส่วนนี้จะรับสัญญาณทางแสงที่ผ่านมาทางเส้นใยนำแสงแล้วเปลี่ยนมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า

### 5.5 ส่วนขยายสัญญาณ

ส่วนนี้จะนำสัญญาณที่ได้จากภาครับมาขยายให้สัญญาณมีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อให้ทำให้ส่วนของคีมอดูเลชันทำงานได้

## 5.6 ส่วนคีมอคูเลชั่น

สัญญาณผ่านมาถึงส่วนนี้จะเป็ยสัญญาณ PFM ( Puls Frequency Modulation ) โดยส่วนของคีมอคูเลชั่นนี้จะเป็ยเฟสล็อกกูบโดยสัญญาณที่ได้ออกมาจะเป็ยสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งมีลักษณะเหมือนตอนก่อนมอคูเลชั่น

## 5.7 ไทรศัพท์รับ

สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากส่วนคีมอคูเลตจะเข้าไปในไทรศัพท์รับ แล้วเปลี่ยนไปเป็ยสัญญาณเสียงต่อไป





### 6.1.2 วงจรพัลส์ที่รีเฟรความถี่มอดูเลชั่น (PULSE FREQUENCY MODULATION )

ในส่วนของวงจรมีจะทำหน้าที่สร้างสัญญาณ PFM ออกมาโดยจะใช้แอมพลิฟายเออร์หรือค่าศักย์ของสัญญาณออดิโอที่เข้ามาทางอินพุทไปควบคุมความถี่พาหะให้เกิดการสั่น(Oscillation) ไปมารอบๆความถี่ของพาหะในที่นี้เราใช้LM566ซึ่งเป็น IC Voltage Controlled Oscil lator (VCO) ลักษณะของวงจรแสดงดังรูปที่ 6-2 ที่ขา5ของ LM 566 จะต้องไปแอสไว้ให้มีค่า  $V_c$  เพื่อให้จะให้ไอซีสามารถทำงานได้โดย  $V_c$  มีค่าเท่ากับ  $3/4 V_{cc} < V_c < V_{cc}$  จากวงจรจะได้ว่า  $R_4 \times 2 \times (R_4 + R_5) \times V_{cc} > 3.24 \times V_{cc}$  เลือกค่า  $R_4 = 6.8 k$ ,  $R_5 = 47k$

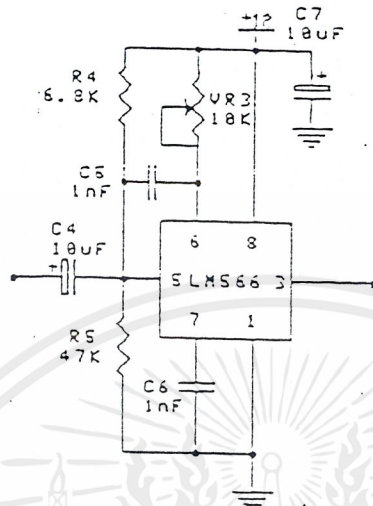
ดังนั้นขา 5 จะถูกไบแอส  $V_c = 10.48 V$

ค่าความถี่กลาง  $f_0$  (Frequency Center) จะถูกกำหนดโดยสมการที่ 6.1

$$f_0 = 2 \times (V_{cc} - V_c) / (R_1 \times C_1 \times V_{cc}) \dots\dots\dots (6.1)$$

เมื่อ  $V_c$  คือค่าศักย์ที่เกิดขึ้นที่ขา 5  
 $C_1$  คือ ตัวเก็บประจุที่ต่อระหว่างขา 7 กับกราวด์  
 $R_1$  คือ ตัวต้านทานที่ต่อระหว่างขา 6 กับไฟเลี้ยง เลือกค่าความถี่กลาง  $f_0 = 300 KHz$  และเลือก  $C_1 = 1 nF$  จะได้  $R_1 = 2 \times (12 - 10.48) / (300 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-9} \times 12) = 844 Ohm$

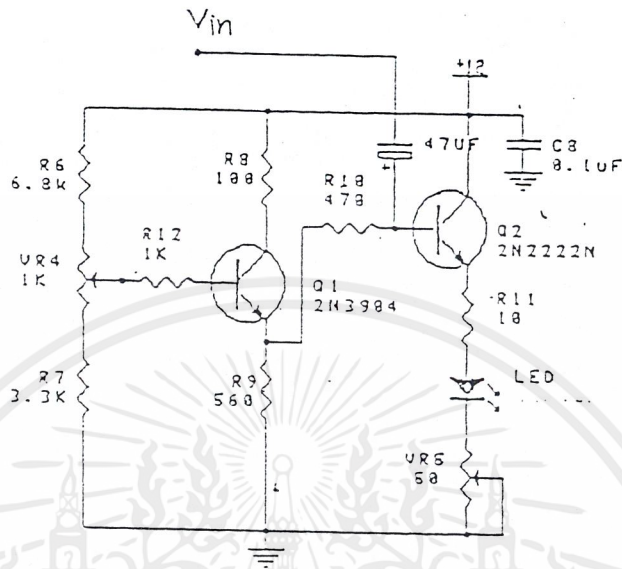
แต่เราจะเลือกใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ตามต้องการ แต่จะไม่เกิน 1 MHz ตามที่ระบุไว้ใน Data Sheet  $C_1$  1 nF ที่ต่อระหว่างขา 5 และ 6 ของ LM 566 จะต่อไว้เพื่อป้องกันการออสซิลเลตที่อาจเกิดขึ้นได้ในช่วงระหว่างที่ VCO สวิตซ์สัญญาณเอาท์พุท ที่ถูกมอดูเลตแล้วจะเป็นลักษณะพัลส์ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความถี่กลางตามระดับสัญญาณออดิโอจากนั้นจะถูกส่งไปยังวงจรขับ (Driver) เพื่อนำไปขับ LED ต่อไป วงจร Pulse Frequency Modulationจะแสดงในรูปที่ 6-2



รูปที่ 6-2 แสดงวงจร Pulse Frequency Modulation

### 6.1.3 วงจรขับ

วงจรขับในส่วนนี้จะทำหน้าที่รับสัญญาณที่ทำการมอดูเลตแบบ PFM มาแล้วมาทำการมอดูเลตแบบอินเทนซิตีดี ( Intensity Modulate ) คือเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสงที่มีขนาดความเข้มของแสงเปลี่ยนไปตามแอมพลิจูดและความถี่สัญญาณไฟฟ้าในวงจรนี้ใช้ Infrared LED ที่ใช้คือเบอร์ IF - E 91B เป็นตัวส่งให้ความยาวคลื่นพีค (Peak Wavelength) อยู่ในช่วง 880 นาโนเมตรและสามารถให้กำลังทางแสงได้ถึง 100  $\mu$ W ความต่างศักย์ใช้ใน Forward ให้ LED ทำงานประมาณ 1.7 V รายละเอียดอื่น ๆ ดูได้จาก Data Sheet พิจารณาวงจรขับสัญญาณอนาล็อกเราจะประมาณกระแสในวงจรที่จะต้องให้ขับตัว LED ให้อยู่ในช่วง 30-50 mA เพราะในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขับ LED กับกำลังแสงที่ออกจาก LED จะเป็นเชิงเส้น (Linear) และให้กำลังทางแสงออกมาได้มาลักษณะวงจรขับที่ใช้แสดงดังรูปที่ 6-3



รูปที่ 6-3 แสดงวงจรขับ LED ที่ใช้ในโครงการ

วงจรภาคสุดท้ายเราเลือกใช้วงจรขับกระแสแบบ Common Collector เนื่องจากไม่คำนึงถึงอัตราขยายแรงดันทางเอาต์พุตเพียงต้องการอัตราขยายกระแสที่ขับ LED เลือกใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N2222A เพราะสามารถตอบสนองความถี่ได้ถึง 400 MHz ให้กระแส  $I_c$  ได้สูงถึง 400 mA ส่วนวงจรภาคแรกคือวงจรขยายซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนกระแสไบแอสเบสได้จากตัวต้านทานปรับค่าได้  $V_{R4}$  ทำให้กระแสอิมิตเตอร์  $I_{E1}$  ที่ควบคุมกระแสเบส  $I_{B2}$  เปลี่ยน ซึ่งจะมีผลทำให้ระดับกระแสดีซี  $I_{DC}$  ให้มีค่าประมาณ 40 mA โวลเตจที่ตกคร่อม LED ไม่ให้มีค่ามากเกินไปซึ่งอาจทำ LED เกิดความเสียหายได้ส่วนตัวเก็บประจุ  $47 \mu F$  จะทำหน้าที่คัปปลิงสัญญาณ PFM ที่ถูกส่งมาจากวงจรมอดูเลตจากวงจรสามารถคำนวณหากระแสที่ผ่าน LED ได้ดังนี้

ให้  $V_{R4} = 1K$  หา  $V_{TH}$

$$V_{TH} = \frac{3.3+1}{3.3+1+5.6} \times 12$$

$$= 4.65 \text{ V}$$

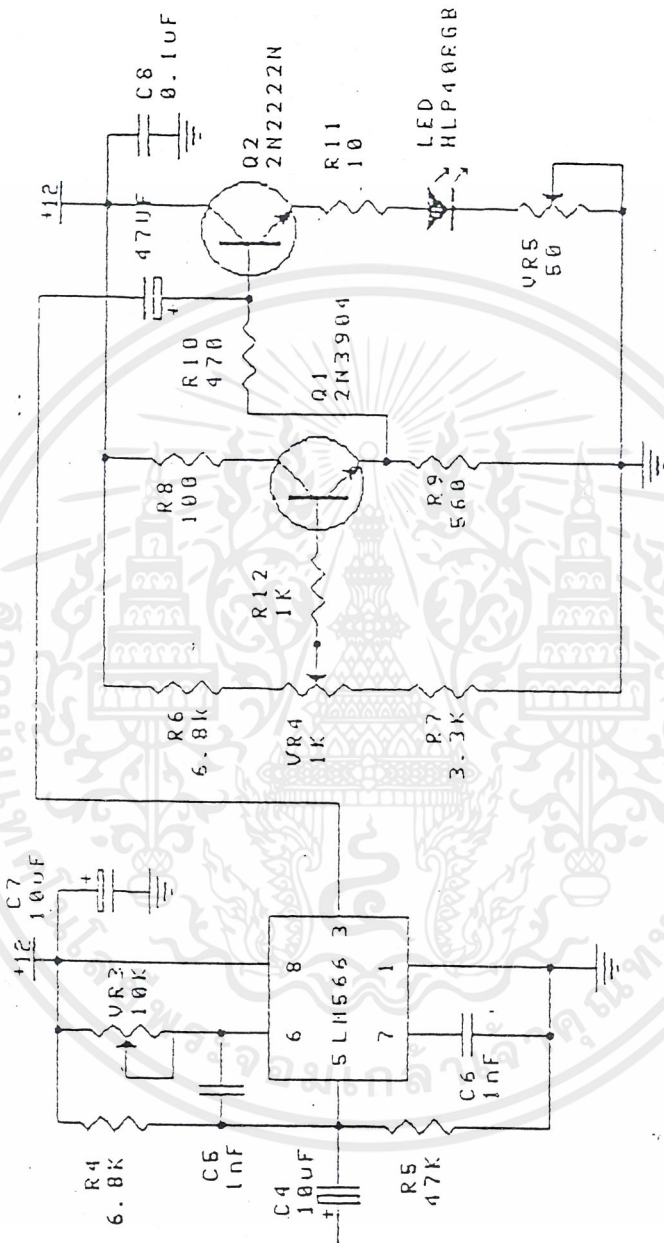
หา  $V_{E1}$  โดยสมมติให้  $I_{B1}$  มีค่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้

$$\begin{aligned} V_{E1} &= V_{TH} - V_{BE1} \\ &= 4.65 - 0.7 \\ &= 3.95 \text{ V} \end{aligned}$$

หา  $I_{OC}$  ที่ไบแอสตัว LED และให้  $I_{BE}$  มีค่าน้อยมาก,  $V_R = 30 \text{ Ohm}$

$$\begin{aligned} I_{DE} &= \frac{V_{E1} - V_{BE1} - V_{LED}}{10 + 30} \\ &= \frac{4.95 - 0.7 - 1.5}{10 + 30} \\ &= 43.75 \text{ mA} \end{aligned}$$

วงจรที่สมมุติทางภาคส่งจะแสดงดังในรูปที่ 6-4



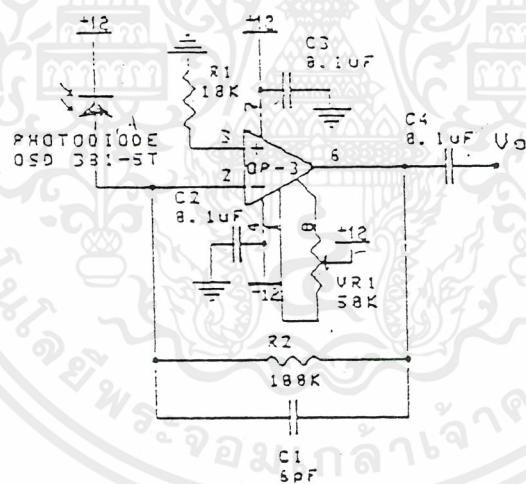
รูปที่6-4 วงจรสมมูลภาคส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 60 องศา ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 วงจรทางภาครับ

### 6.2.1 ภาคก่อนขยายแบบทรานส์อิมพีแดนซ์ (TRANSIMPEDANCE)

พิจารณาการออกแบบทางภาครับสิ่งแรกที่จะต้องคำนึงถึงคือระดับพลังงานต่ำสุดที่ภาครับสามารถรับได้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น คุณสมบัติของโฟโตไดโอดแบบดิวิทซ์ของระบบระดับ Signal-to-Noise Ratio ของระบบในการออกแบบวงจรที่ใช้ในโครงการนี้จะใช้โฟโตนิกโฟโตไดโอดทำงานอยู่ในโหมดโฟโตคอนดักทีฟ (Photoconductive) คือให้รีเวิร์สไบแอส (Reverse Bias) โวลเตจแก่ไดโอด และทำการต่อวงจรแบบทรานส์อิมพีแดนซ์ หรือวงจรแปลงกระแสเป็นศักย์ (Current-to-Voltage) ข้อดีของวงจรแบบนี้คือมีคุณสมบัติของสัญญาณรบกวนต่ำ เนื่องจากการป้อนกลับโดยใช้ความต้านทาน  $R_f$  มีการใช้งานได้ในย่านความถี่ที่สูงกว่าแบบอื่นมีความต้านทานเอาต์พุตน้อยทำให้ภาคขยายต่อมาไม่ต้องดึงกระแสจากภาคก่อนขยายมากซึ่งจะลดสัญญาณรบกวนไปได้มากและไม่จำเป็นต้องมีวงจรอีควอไลเซอร์ (Equalizer) เพื่อปรับแต่งสัญญาณ ลักษณะของวงจรที่ใช้ในโครงการแสดงดังรูปที่ 6-5



รูปที่ 6-5 แสดงวงจรภาคก่อนขยาย

โฟโตไดโอดที่ใช้เบอร์ IF-D91 โดยโฟโตไดโอดจะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณความเข้มของแสงที่รับได้ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งอยู่ในรูปกระแสมีค่าไม่กี่ไมโครแอมป์ขาเอาต์พุตของโฟโตไดโอดจะต่อเข้ากับ IC เบอร์ OP-37 ซึ่งเป็นออปแอมป์ Low Noise Precision High-Speed มี

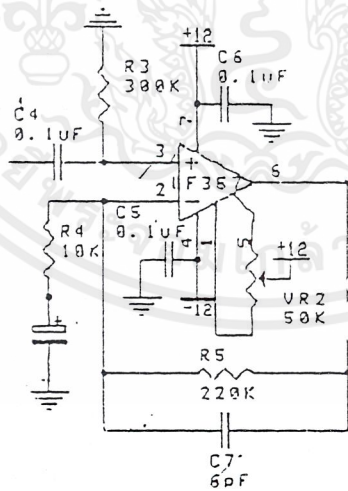
แกนแบนด์พาสไอพรีดิคท์ 63 MHz มีค่า CMRR 114 dB เราสามารถคำนวณหาโวลเตจเอาต์พุตของภาคก่อนขยายได้ดังสมการที่ 6.2

$$V_o = I_p \times R_f \quad \dots\dots\dots (6.2)$$

ตัวต้านทาน 10 K ที่ต่อเข้ากับขานอนอินเวิร์ทติง ต่อไว้เพื่อช่วยให้กระแสอินพุตไบแอสของวงจรมีความสมดุลย์ ตัวเก็บประจุ 6 pF ที่ต่อขนานกับ  $R_f$  เพื่อให้วงจรมีเสถียรภาพจากการเกิดออสซิลเลชัน ส่วนตัวเก็บประจุ 0.1  $\mu$ F ที่ทำการดีคัปปลิงระหว่างไฟเลี้ยงของวงจรจะช่วยบายพาสสัญญาณรบกวน ที่มาจากไฟเลี้ยงให้ลงกราวนด์

### 6.2.2 วงจรขยายสัญญาณ

ในวงจรภาคก่อนขยายนั้นเราไม่สามารถทำให้เกนของวงสูงมากเนื่องจากวงจรมีส่วนแรกต้องคำนึงถึงสัญญาณรบกวน เพราะกระแสที่รับจากไฟไดโอดธรรมดาแล้วมีค่าต่ำจึงต้องออกแบบวงจรมีเกนหลังให้มีเกนการขยายสูงอยู่ในระดับที่ต้องการเพื่อที่จะให้วงจรมีเกนที่พอเหมาะคือภาคดีมอดูเลตสามารถที่จะทำการลือกความถี่หรือโวลเตจที่เข้ามาทางขาอินพุตได้ ในการออกแบบและสร้างวงจรมีส่วนหลัง ดังแสดงในรูปที่ 6-6

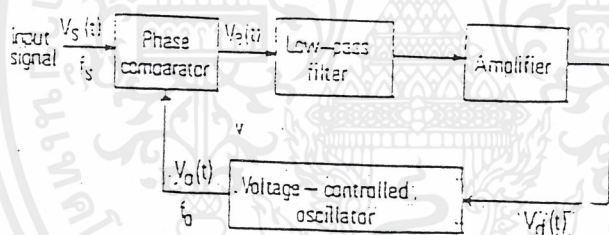


รูปที่ 6-6 แสดงวงจรมีส่วนหลัง

ภาคขยายใช้ออปแอมป์เบอร์ LF 357 ซึ่งทำงานได้ในย่านความถี่สูงใช้ขยายได้ใน ช่วงกว้าง ๆ ลักษณะของวงจรจะเป็นแบบนอนอินเวิร์ทติ้งมีอัตราขยายประมาณ 23 เท่า มี Cut-Off Low Frequency ที่ความถี่ 16 Hz

### 6.2.3 วงจรดีมอดูเลต

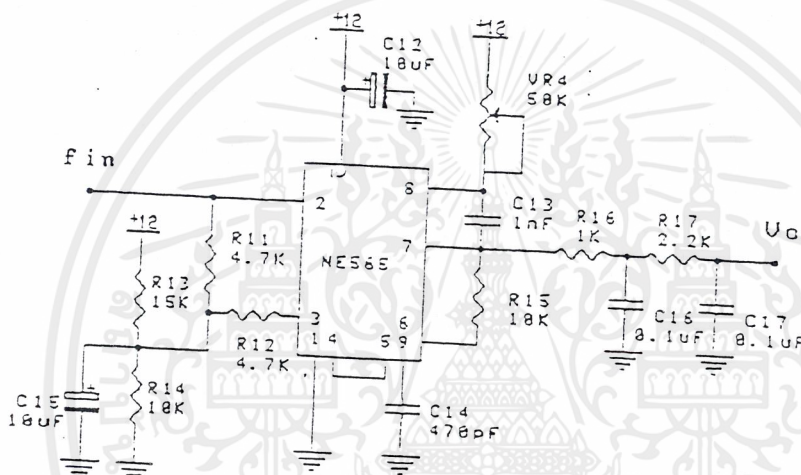
ในภาคนี้จะทำหน้าที่ดีมอดูเลตสัญญาณ Pulse Frequency Modulation ที่ถูกขยาย มาแล้วจากภาคขยายสัญญาณที่ผ่านการดีมอดูเลตแล้วจะได้สัญญาณออกมาในรูปสัญญาณอะ นาล็อกที่มีความถี่รูปร่างเหมือนสัญญาณอะนาล็อกในภาควงจรส่งในวงจรนี้ใช้ไอซีเฟสล็อก NE565เป็นตัวดีมอดูเลตซึ่งจะอธิบายหลักการทำงานเบื้องต้นของมันดังนี้เฟสล็อกคูล ( phaseLock Loop : PLL ) คือระบบที่มีการปรับความถี่กับประกอบด้วย Phase Detector , Low Pass Filter, Error Amplifier และ Voltage Controlled Oscillator แผนภาพของระบบเฟส ล็อกดูอย่างง่าย แสดงดังในรูปที่6-7 การวิเคราะห์ระบบโดยทางคณิตศาสตร์จะไม่กล่าวในที่นี้ อย่างไรก็ตามหลักการทำงานเบื้องต้นสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 6-7 แสดงบล็อกไดอะแกรมของเฟสล็อกคูล

ขณะที่ยังไม่มีสัญญาณเข้าไปในระบบแรงดันควบคุม  $V_e(t)$  จะเท่ากับศูนย์ VCO จะทำงานโดย การตั้งความถี่ไว้ที่  $f_o$  ซึ่งเรียกว่า Free-Running Frequency ถ้าสัญญาณเข้าไปในระบบ Phase Comparator จะทำการเปรียบเทียบเฟสและความถี่ของสัญญาณอินพุตกับ VCO และผลิต แรงดันคลาดเคลื่อน  $V_e(t)$  ซึ่งสัมพันธ์กับความแตกต่างของเฟสและความถี่ของสัญญาณทั้ง 2 แรงดันคลาดเคลื่อนนี้จะถูกกรองและขยายส่งไปควบคุม VCO ในกรณีนี้แรงดันควบคุม  $V_e(t)$  จะ ไปบังคับความถี่  $V_e$  ให้เปลี่ยนไปในทิศทางที่จะลดความถี่ที่แตกต่างกันระหว่าง  $f_o$  และสัญญาณที่ เข้ามาถ้าความถี่สัญญาณที่เข้ามาใกล้เคียงกับ  $f_o$  จากการปรับกลับของ PLL ทำให้ PLL ซิงโครไนซ์ หรือล็อกสัญญาณที่เข้ามาขณะที่ทำการล็อกนั้นความถี่ VCO จะเท่ากับสัญญาณอินพุตแต่เฟส

ยังต่างกันอยู่ความแตกต่างของเฟสมีความจำเป็นต่อการผลิตแรงดันคลาดเคลื่อนที่จะคอยไปปรับความถี่ VCO จากค่า Free-Running ให้เท่ากับความถี่ที่เข้ามา ดังนั้น PLL จะยังคงรักษาสภาพการลอคการที่ระบบสามารถที่จะปรับตัวได้เองทำให้ PLL สามารถติดตามความถี่ที่เปลี่ยนไปของสัญญาณที่เข้าไป ให้อยู่ในสภาพลอคเช่นเดิม ช่วงความถี่ซึ่ง PLL สามารถติดตามการลอคกับสัญญาณที่เข้ามาเรียกว่า Lock Range ค่าของมินจะขึ้นอยู่กับแรงดันคลาดเคลื่อน โดยจะไม่ขึ้นอยู่กับ Band Edge ของฟิลเตอร์และ Closed Loop Gain ( $K_v$ ) ของระบบทั้งหมด โดยมีผลเกี่ยวข้องกับ Selectivity ของวงจร PLL และยังช่วยเพิ่มความปลอดภัยเกี่ยวกับสัญญาณทางด้าน Outband Signal ที่จะมารบกวนได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 6-8 แสดงวงจรดีมอดูเลตสัญญาณ PFM

รูปที่ 6-8 เป็นวงจรดีมอดูเลตที่ใช้ในโครงงานนี้ สัญญาณที่ดีมอดูเลตแล้วจะออกมาทางขา 7 ผ่านวงจร Low Pass Filter 2 ขุดที่มีความถี่คัตออฟ  $W_c$  เท่ากับ 10 KHZ และ 4.5 KHZ สัญญาณที่ได้มาจะเป็นสัญญาณฮอไดโอด และจะนำไปขยายอีกครั้งในภาคถัดไป

วงจรเฟสลอคคูลูปที่ใช้นี้เราสามารถกำหนดความถี่กลาง (Center Frequency) ที่ใช้ในวงจร ซึ่งได้จากสมการที่กำกับมาให้ในแผ่นรายละเอียดข้อมูล

$$f_o = \frac{1}{(3.7 \times R_o \times C_o)} \dots\dots\dots (6.3)$$

เมื่อ  $f_o$  คือ ความถี่ของ VCO โดยไม่มีสัญญาณเข้ามา

$R_o$  คือ ตัวเก็บประจุที่ต่อกับขา 9 และกราวด์

$C_o$  คือ ตัวต้านทานที่ต่อระหว่างขา 8 กับไฟเลี้ยง

เลือกใช้  $C_o = 470 \mu F$  และ  $R_o$  เป็นตัวต้านทานปรับค่าได้  $50 K\Omega$  ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยน

เลือกความถี่กลางที่สอดคล้องกับความถี่ของสัญญาณที่เข้ามาได้

ค่าล็อกเร้นจ์ (Lock Range) หรือค่าช่วงที่จะล็อกความถี่อยู่จะคำนวณได้จาก

$$f_L = \pm \frac{8f_o}{V_{cc}} \dots\dots\dots (6.4)$$

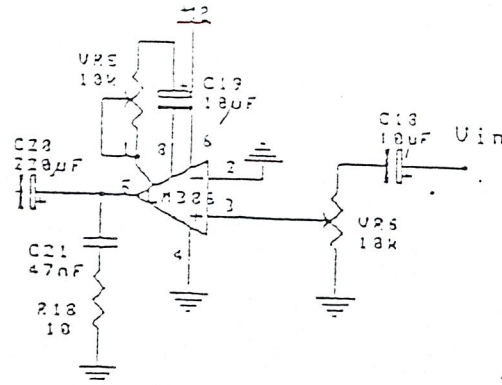
และช่วงความถี่ที่เริ่มจะเข้าล็อกหรือแคปเจอร์เรนจ์ (Capture Range) โดยก่อนหน้านั้นยังไม่เกิดการล็อกจะคำนวณโดย

$$f_c = (\pm 1/2\pi) \times \sqrt{(2\pi f_L) / T} \dots\dots\dots (6.5)$$

โดยที่ T คือค่าคงที่ทางเวลาที่ขา 7

#### 6.2.4 วงจรภาคยกระดับและขยายสัญญาณ

ในที่นี้ใช้ไอซีเบอร์ LM 368 ลักษณะการต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 6-9 วงจรขยายเสียงนี้สามารถปรับอัตราขยายได้ตั้งแต่ 20-200 เท่า วงจรภาคนี้มีไว้เพื่อยกระดับและขยายสัญญาณจากการติ่มอดูเลชันให้สูงขึ้นเพื่อนำไปต่อกับโทรศัพท์ภาครับ วงจรภาคขยายและยกระดับสัญญาณจะแสดงในรูปที่ 6-9

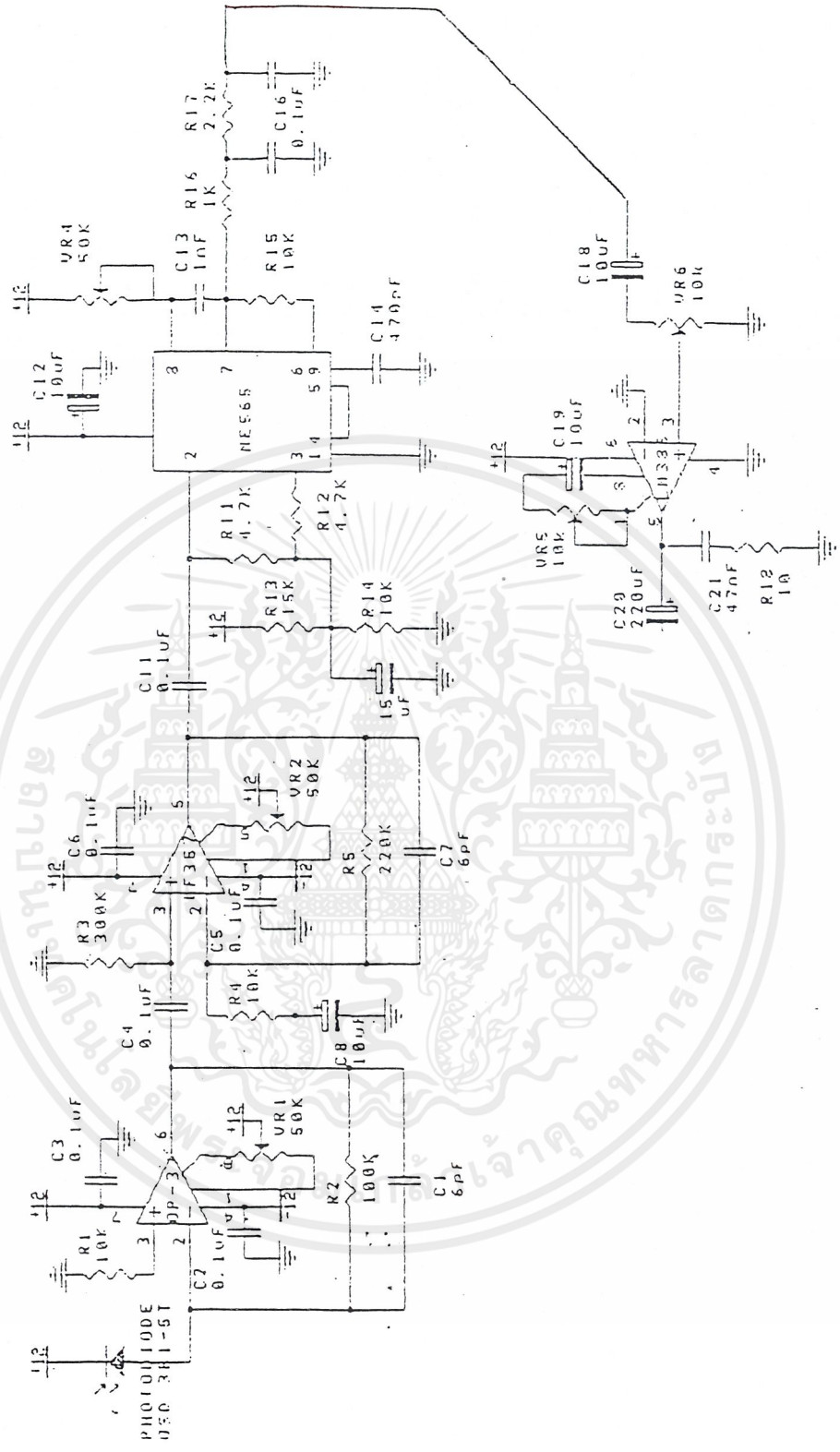


รูปที่ 6-9 แสดงวงจรภาคขยายและยกระดับสัญญาณ

### 6.2.5 วงจรโทรศัพท์รับ

วงจรโทรศัพท์รับนี้จะเหมือนกับวงจรโทรศัพท์ส่งโดยให้ไฟเลี้ยงในการแปลงสัญญาณไฟฟ้าในสัญญาณเสียงโดยใช้ไฟเลี้ยง 10 V

วงจรสมบูรณ์ทางภาครับแสดงดังรูปที่ 6-10



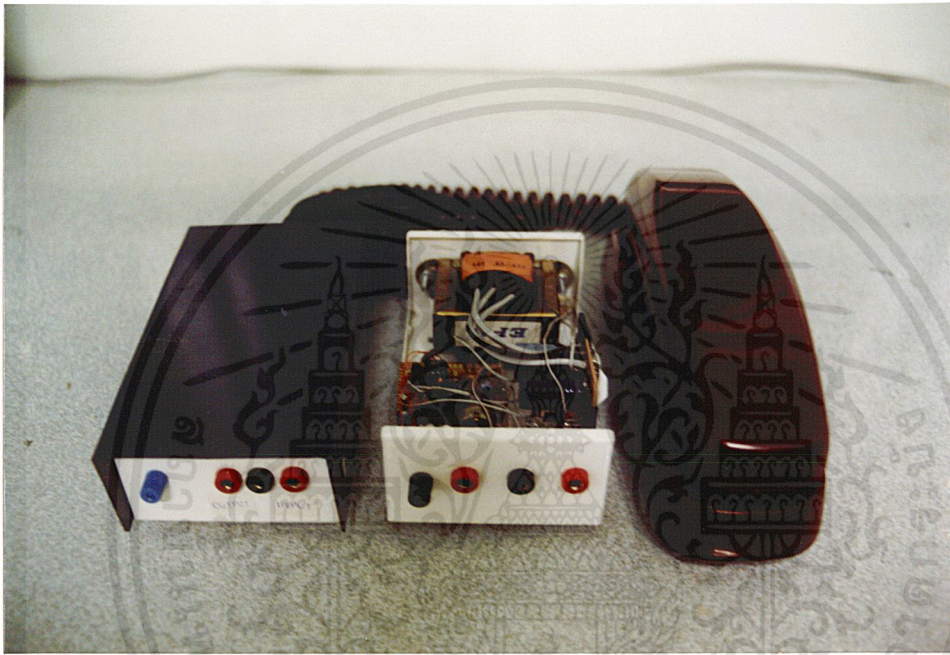
รูปที่ 6-10 แสดงวงจรสมบูรณาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 67  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

### ผลการทดลองและสรุปผล

ในบทที่ 7 นี้จะกล่าวถึงการทดสอบการทำงานของวงจรทางภาคส่งและภาครับ ซึ่งประกอบด้วยวงจรหลายวงจรดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 6 โดยทำการต่ออุปกรณ์ทั้งภาคส่งและภาครับเข้ากับเส้นใยนำแสงซึ่งแสดงดังรูปที่ 7-1



รูปที่ 7-1 แสดงชุดอุปกรณ์รวมที่ใช้ในการทดลอง

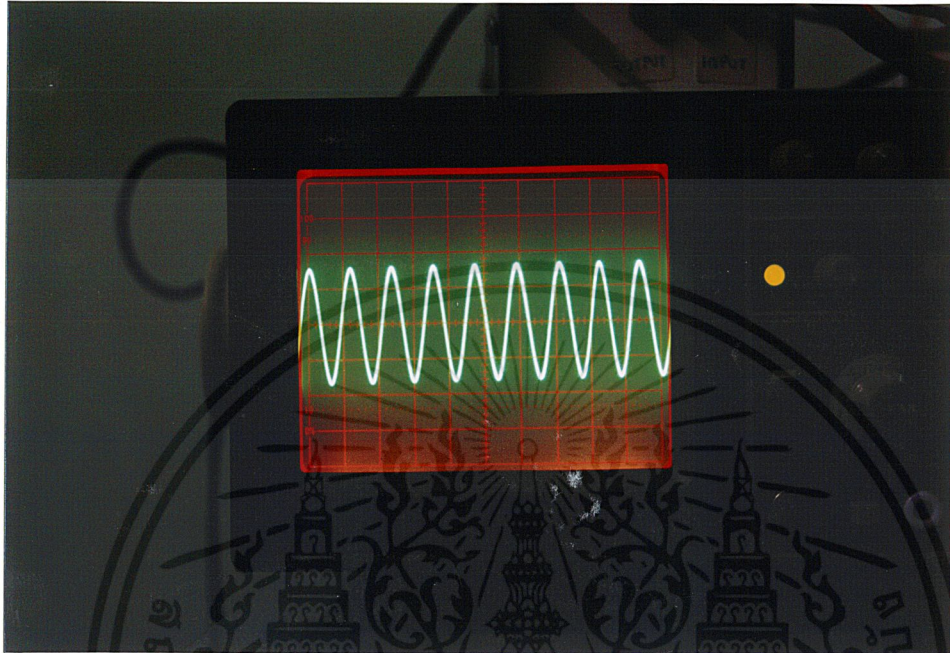
ผลการทดลองในโครงการนี้จะแสดงเป็นลำดับภาพของการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงโดยแบ่งเป็น 2 ตอน

#### 7.1 ผลการทดลอง

**ตอนที่ 1** ใช้สัญญาณจากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์เป็นตัวส่งสัญญาณ

##### 7.1.1 สัญญาณอินพุทจากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์

สัญญาณอินพุทจากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 7-2



รูปที่ 7-2 แสดงสัญญาณอินพุตจากฟังก์ชันเนอร์

จากรูปที่ 7-2 แสดงสัญญาณรูปไซน์ที่ใช้เป็นสัญญาณอินพุตโดยใช้ความถี่ที่ 4,500 Hz ซึ่งเป็นความถี่ที่ไม่เกินความถี่เสียงมนุษย์

#### 7.1.2 สัญญาณพาหะ

สัญญาณพาหะสามารถที่จะปรับความถี่ได้โดยการปรับความต้านทาน  $VR_3$  ซึ่งในการทดลองนี้จะปรับค่าความถี่ไว้ที่ 300 KHz ซึ่งแสดงดังรูปที่ 7-3

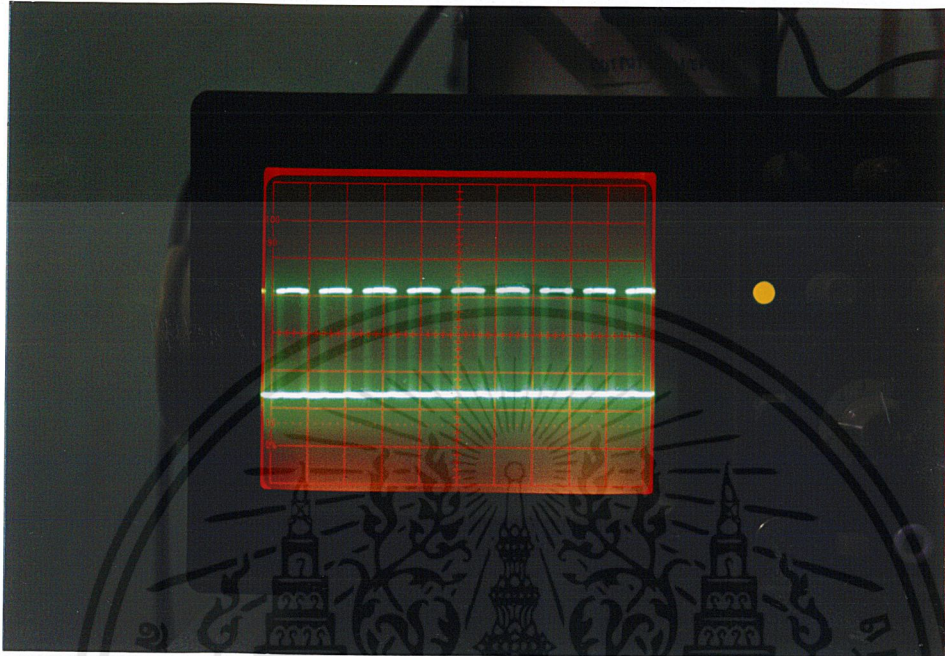


รูปที่ 7-3 แสดงสัญญาณพาหะ

จากรูปจะเห็นว่าสัญญาณพาหะมีลักษณะเป็นพัลส์ โดยมีความถี่กลาง ( $f_0$ ) เท่ากับ 300 KHz และ  $V_{p-p}$  มีค่าเท่ากับ 5 V

### 7.1.3 สัญญาณ PFM

เมื่อสัญญาณอินพุตเข้าในวงจรมอดูเลชันจะทำให้เกิดการมอดูเลตกับสัญญาณพาหะได้สัญญาณ PFM ออกมาซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 7-4

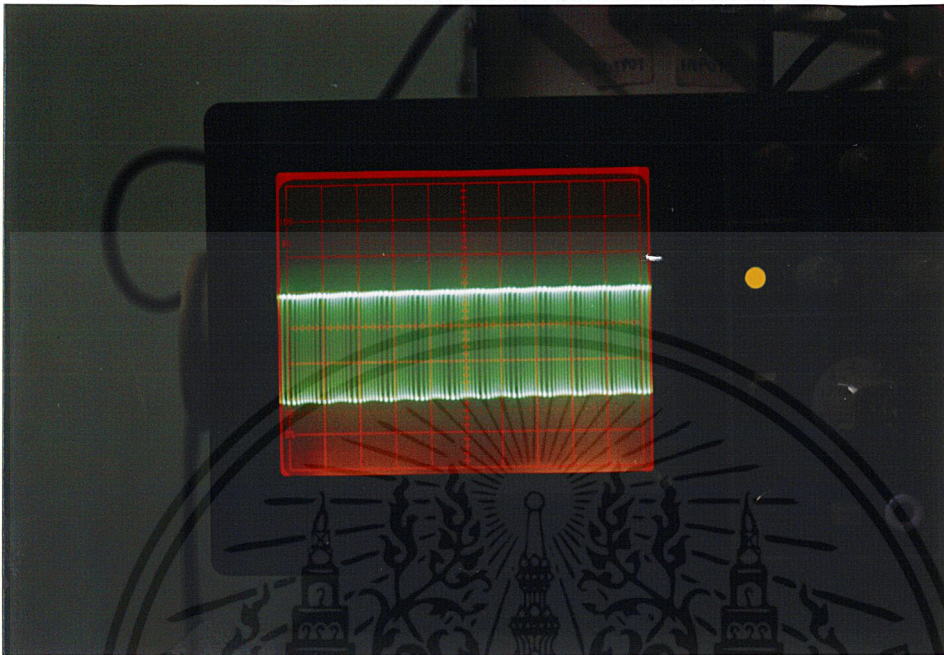


รูปที่ 7-4 แสดงสัญญาณ PFM

จากรูปลักษณะสัญญาณ PFM นั้นความถี่ของสัญญาณพัลส์ (สัญญาณพาหะ) จะเปลี่ยนแปลงตามแอมพลิจูด หรือ โวลต์ของสัญญาณอินพุต

#### 7.1.4 สัญญาณจากวงจรรับสัญญาณ

วงจรส่งสัญญาณจะแปลงสัญญาณ PFM ซึ่งเป็นสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสงแล้วส่งไปในเส้นใยนำแสงโดยวงจรรับสัญญาณจะแปลงสัญญาณทางแสงที่ผ่านในเส้นใยนำแสงให้เป็นทางไฟฟ้าซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 7-5

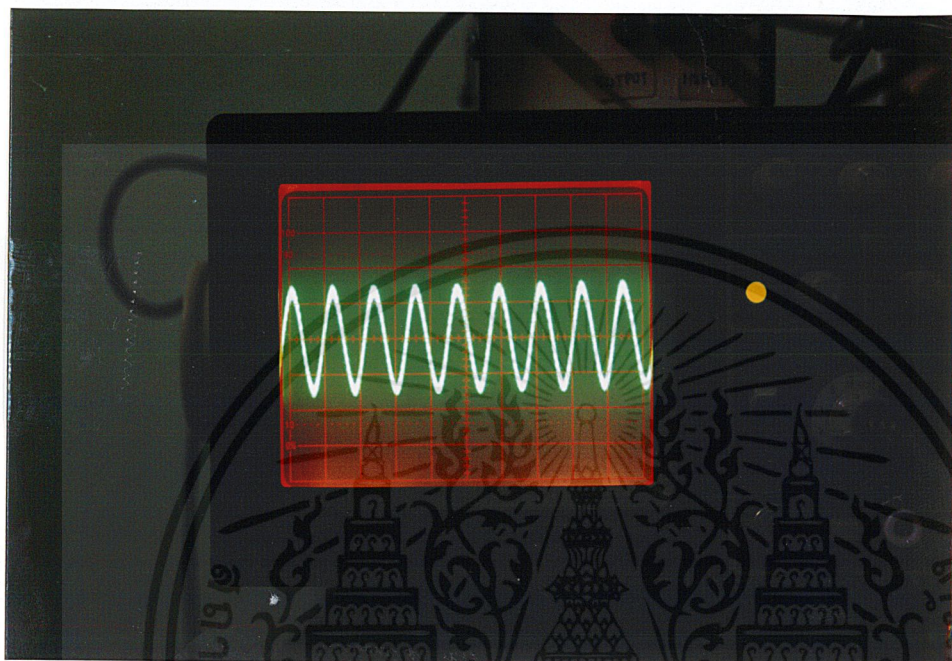


รูปที่ 7-5 แสดงสัญญาณจากวงจรรับสัญญาณ

จากรูปจะเห็นได้สัญญาณว่าที่ได้จากวงจรรับนั้นจะมีลักษณะเพี้ยนไปจากเดิมเล็กน้อยเนื่องจากมีสัญญาณรบกวนจากภายนอก

#### 7.1.5 สัญญาณเอาต์พุตจากการติมอดูเลต

เมื่อสัญญาณ PFM เข้าไปในวงจรติมอดูเลชันซึ่งทำหน้าที่ติมอดูเลตสัญญาณ โดยเราสามารถทำปรับช่วงความถี่ของเฟสล็อกคูลูป ให้ล็อกสัญญาณมอดูเลตทางความถี่ที่เข้ามาทางขาอินพุตได้ โดยใช้การปรับตัวต้านทาน VR<sub>1</sub> เมื่อเฟสล็อกคูลูปทำการล็อกได้สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจะมีลักษณะดังรูปที่ 7-6



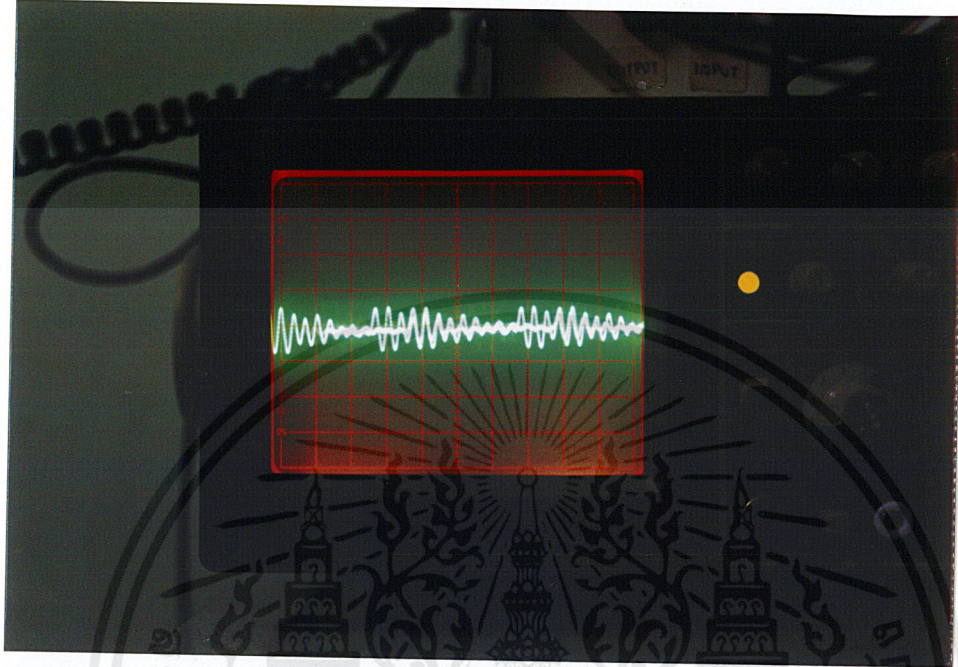
รูปที่ 7-6 แสดงสัญญาณเอาร์ทพุทจากการตีมอดุลเลต

จากรูปจะเห็นว่าสัญญาณเอาร์ทพุทที่ออกจากวงจรตีมอดุลเลชันในภาครับจะมีลักษณะเป็นไซน์ที่เหมือนกับสัญญาณอินพุท

**ตอนที่ 2** ใช้สัญญาณเสียงพูดจากโทรศัพท์ส่งสัญญาณ

### 7.1.6 สัญญาณอินพุทที่มาจากโทรศัพท์ส่ง

สัญญาณอินพุทที่ส่งมาจากโทรศัพท์ส่งแสดงดังรูปที่ 7-7

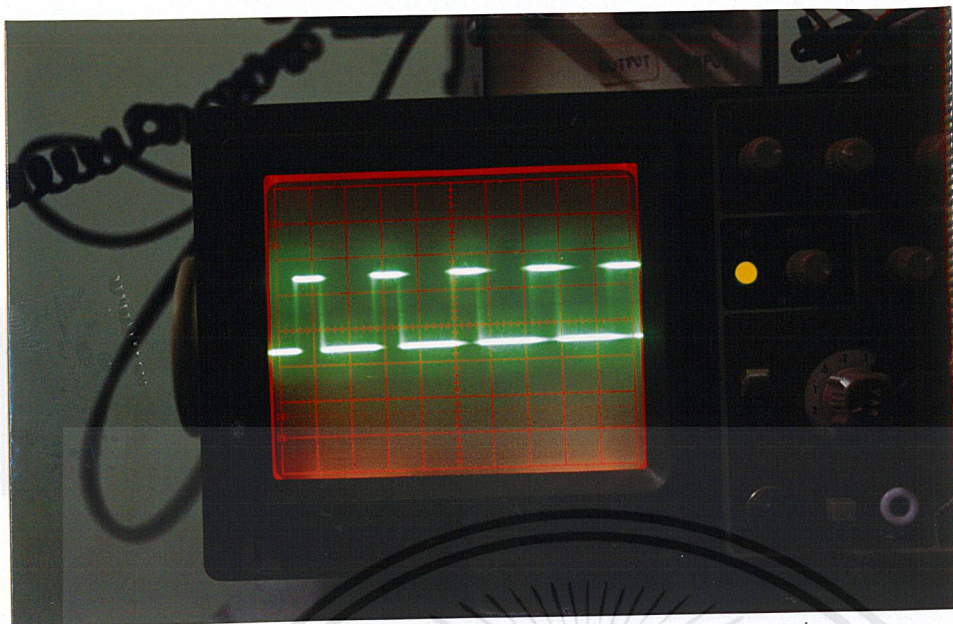


รูปที่ 7-7 แสดงสัญญาณอินพุตที่ส่งมาจากโทรศัพท์ส่ง

จากรูปสัญญาณอินพุตจากโทรศัพท์จะมีความถี่อยู่ในช่วง 300 Hz-6,400 Hz และมีแอมพลิจูดอยู่ในช่วง 0-2 V

#### 7.1.7 สัญญาณ PFM

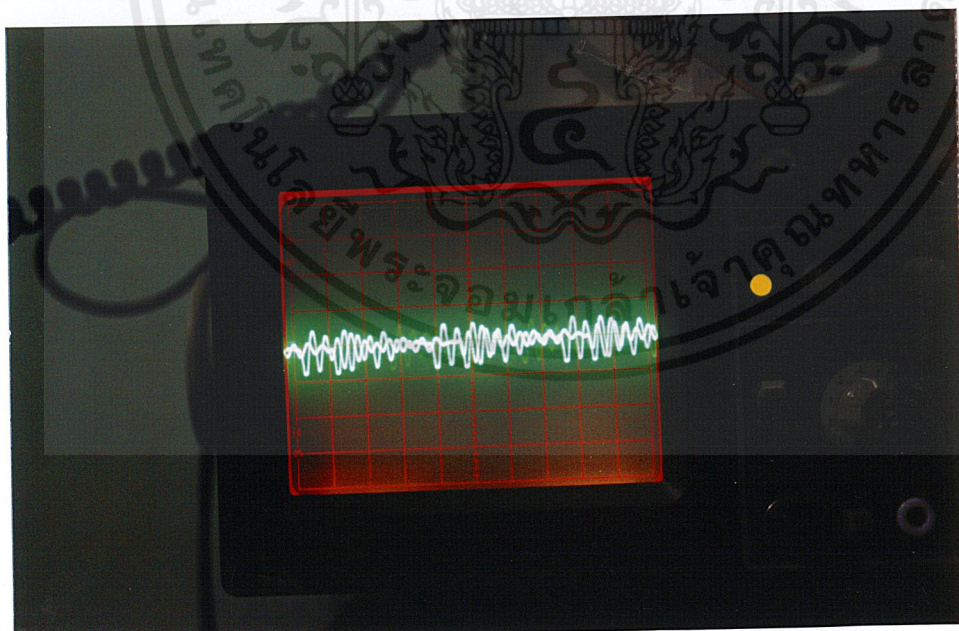
เมื่อสัญญาณโทรศัพท์ถูกมอดูเลตโดยวงจรมอดูเลชันจะมีลักษณะดังรูปที่ 7-8



รูปที่ 7-8 แสดงสัญญาณ PFM

7.1.8 สัญญาณเอาร์ทพุทที่เข้ามายังโทรศัพท์รับ

สัญญาณเอาร์ทพุทที่ออกจากวงจรดีมอดูเลชั่นแล้วเข้าไปในโทรศัพท์รับจะมีลักษณะเหมือนกับสัญญาณอินพุทจากโทรศัพท์ส่งซึ่งแสดงดังรูปที่ 7-9



รูปที่ 7-9 แสดงสัญญาณเอาร์ทพุทที่เข้ามายังโทรศัพท์รับ

## 7.2 สรุปผลการทดลอง

จากผลการที่ได้จากโครงการนี้จะพบว่าวงจรแต่ละส่วนทำงานได้ตรงตามจุดประสงค์ที่วางไว้ คือสามารถที่จะเชื่อมต่อสัญญาณโทรศัพท์ผ่านทางเส้นใยนำแสงได้ โดยสัญญาณที่ได้ นั้นอาจจะมีค่าผิดพลาดไปเล็กน้อย เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการเชื่อมต่อวงจร จึงทำให้ทราบว่าเมื่อนำไปใช้งานจริงนั้นอาจจะให้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีพอ ดังนั้นในโครงการนี้จึงเป็นแค่การศึกษาเท่านั้น



## บทที่ 8

### วิจารณ์ผลการทดลองและขอบเขตในการทำโครงการ

#### 8.1 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองผลที่ได้ยังไม่ดีนักแต่ก็เป็นที่น่าพอใจเนื่องจากการออกแบบวงจรและการเลือกใช้อุปกรณ์ยังไม่ดีพอ หรือการใช้ความถี่ที่เข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งเป็นคลื่นพาหะที่มีค่าประมาณ 300 KHz ซึ่งเป็นความถี่สูงพอสมควร ซึ่งทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่สูงทางด้านวงจรส่งและเข้าไปรบกวนวงจรในภาครับ และในการทำโครงการนี้ยังจะพบว่า มีตัวแปรที่ทำให้สัญญาณที่ได้ทางภาครับผิดเพี้ยนไปจากเดิมมีผลมาจากสาเหตุต่างๆอีกเช่นการใช้เส้นใยนำแสงที่ใช้เป็นชนิดพลาสติกแบบ Multimode ซึ่งเส้นใยนำแสงแบบนี้จะให้ค่า Loss สูงโดยเฉพาะเมื่อใช้กับสัญญาณอินฟราเรด การที่วงจรส่งสัญญาณที่ใช้ในนี้ ให้กระแสขั้วไม่เพียงพอกับ LED ทำให้ LED ส่งสัญญาณได้น้อยเกินไปจึงทำให้สัญญาณที่ส่งผ่านเส้นใยนำแสงได้ไม่ดีและการที่ใช้วงจรติมอดูเลชันที่เป็นแบบ Phase Lock Loop ทำให้มีข้อจำกัดของช่วงความถี่ที่มันสามารถล๊อคได้ สำหรับแนวทางแก้ไขการเกิดสัญญาณรบกวน นั้นเราอาจจะเพิ่มวงจร Band Pass Filter เข้าไปในส่วนของวงจรภาครับ เพื่อกรองเอาเฉพาะย่านความถี่ที่เราต้องการ และลดสัญญาณรบกวนหรือสัญญาณที่มีความถี่ที่ไม่ต้องการหรืออาจจะเปลี่ยนเป็นการส่งแบบดิจิตอลแบบ Pulse Code Modulation (PCM) ซึ่งการส่งแบบ PCM สามารถลดสัญญาณรบกวนของระบบลงไปได้มาก คุณภาพของสัญญาณกลับที่ได้กับคืนมาจะดีและมีอัตราการส่งข้อมูลที่ไม่สูงนัก (ประมาณ 64 Kbs )

ในการนำอุปกรณ์ในโครงการนี้ไปใช้ในการสื่อสารถ้าต้องการให้มีคุณสมบัติดีจริงๆ จะต้องพัฒนาอีกหลายด้าน ซึ่งควรจะเอาอุปกรณ์นี้ไปพัฒนาต่อไปเพื่อให้ได้คุณภาพที่หน้าพอใจมากยิ่งขึ้น เช่น สามารถส่งสัญญาณภาพ เสียง ข้อมูลไปมาได้พร้อมกัน ซึ่งในโครงการนี้อาจจะถือได้ว่าเป็นพื้นฐานของการสื่อสารในระบบเส้นใยนำแสงซึ่งในอนาคตการสื่อสารแบบนี้มีแนวโน้มที่จะเข้ามาแทนการสื่อสารแบบเก่า ซึ่งจะทำให้การสื่อสารในประเทศไทยก้าวหน้าทัดเทียมกับประเทศอื่นได้

## 8.2 ขอบเขตในการทำโครงการ

เนื่องจากหัวรับและหัวส่งที่ใช้ในโครงการนี้มีจำกัดจึงทำเชื่อมต่อสัญญาณได้ทางเดียว โดยถ้าต้องการจะทำการเชื่อมสัญญาณเป็นแบบสองทาง เราสามารถทำได้โดยใช้ชุดการทดลองรับส่งสัญญาณเพิ่มขึ้นไปอีกหนึ่งชุด





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## Eska<sup>®</sup> Optical Cables

ESKA Optical Cables are made of a single or plural number of ESKA fibers jacketed with polyethylene or polyvinylchloride to protect fibers from physical and chemical damages.

### Super Eska<sup>®</sup> Grade Cables (Product Code: SH)

Attenuation:  $\leq 400\text{dB/Km}$  at 660nm collimated light

Heat Resistance:  $75^{\circ}\text{C}$

Cable Type: simplex or duplex

Main Applications:   
 ◦ lamp monitors and instrument panel illumination.   
 ◦ data transmission   
 ◦ sensor heads for photoelectric switches

### Eska Extra<sup>®</sup> Grade Cables (Product Code: EH)

Attenuation:  $\leq 200\text{dB/Km}$  at 650nm collimated light

Heat Resistance:  $85^{\circ}\text{C}$

Cable Type: simplex or duplex

Main Application: ◦ data transmission

### Heat Resistant DH Type Eska<sup>®</sup> Cables (Product Code: DH)

Attenuation:  $\sim 300\text{dB/Km}$  at 650nm collimated light (1m/∅ fiber)

Heat Resistance:  $115^{\circ}\text{C}$  (dry)

Cable Type: simplex

Main Applications:   
 ◦ short-distance data transmission in automobiles   
 ◦ sensor heads for photoelectric switches in higher ambient temperature

### Heat Resistant FH Type Eska<sup>®</sup> Cables (Product Code: FH)

Attenuation:  $\sim 1,000\text{dB/Km}$  at 650nm and 770nm collimated light

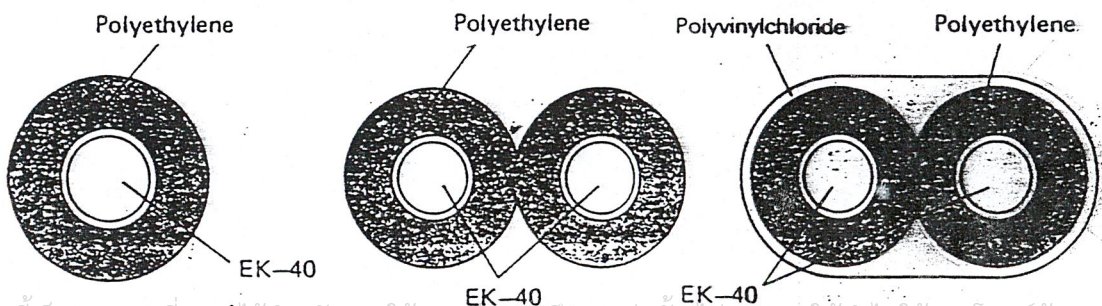
Heat Resistance:  $125^{\circ}\text{C}$  (dry)

Cable Type: simplex

Main Applications:   
 ◦ short-distance data transmission in automobiles   
 ◦ sensor heads for photoelectric switches in higher ambient temperature



Typical Structure of Optical Cable



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ESKA<sup>®</sup> High-performance Plastic Optical Fibers

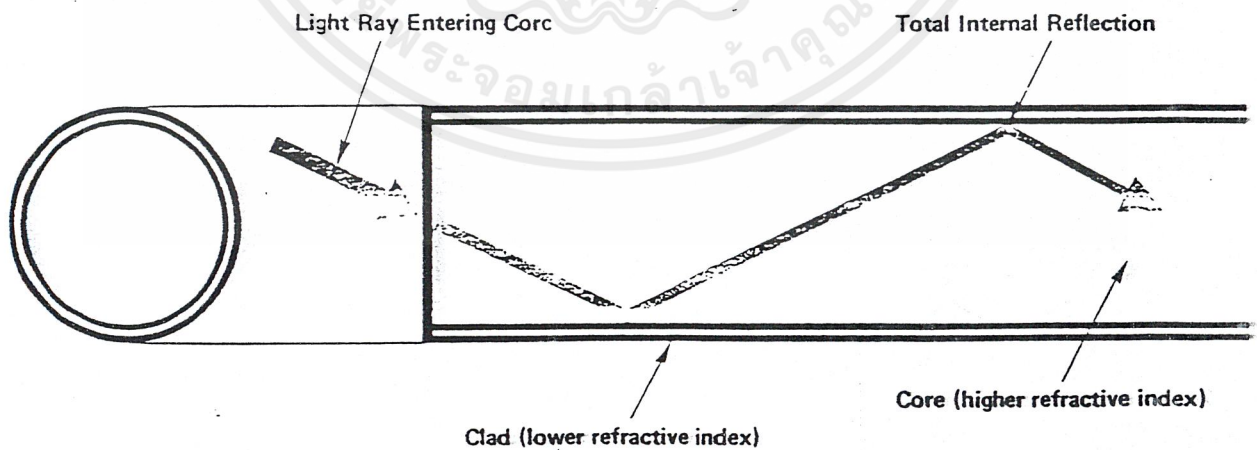
ESKA is the tradename for high-performance plastic optical fibers developed by Mitsubishi Rayon Co., Ltd., based on its integrated technologies and wide experience in the field of polymer and fiber production.

## Structure of ESKA<sup>®</sup>

ESKA fibers are plastic optical fibers (so called step Index type), having a concentric double-layer structure consisting of a core of highly transparent polymethyl methacrylate polymer and a thin layer of special fluorine polymer cladding.

As the clad has a lower refractive index than the core, the light ray entering at one end of a fiber progresses through the core, repeating the total internal reflection at the core/clad interface to be discharged from the other end.

Structure of Optical Fiber and Diagram of Light Transmission



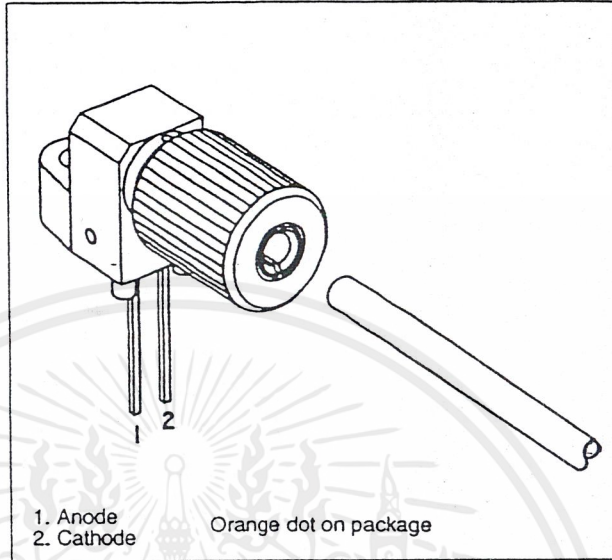
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Commodity	Item No.	Fiber Diameter × Number of Fibers	Cable Outer Diameter (m/m)	Cable Length on Spool (M)	Net Weight on Spool (kg)	Carton Size (m/m)	A Carton Gross Weight (kg)	Jacket		
									Standard Optical Cables	
Standard Optical Cables	SH-2001	0.5 mm × 1	1.0±0.05	1,000	0.85	360×360×165	2.2	PE		
	SH-2002	0.5 mm × 2	1.0×2.2±0.07	500	0.85		2.2			
	SH-3001	0.75mm × 1	2.2±0.07		1.9		3.3			
	SH-3002	0.75mm × 2	2.2×4.6±0.1		3.9		5.3			
	SH-4001	1.0 mm × 1	2.2±0.07		1.9		3.3			
	SH-4002	1.0 mm × 2	2.2×4.6±0.1		3.9		5.3			
	SH-1016	0.25mm × 16	2.2±0.1		1.9		3.3			
	SH-1016	0.25mm × 16	2.2±0.1		7,620		28.2		800×800×300	32.5
	SH-1032	0.25mm × 32	2.8±0.1		500	3	360×360×165		4.4	
	SH-1032	0.25mm × 32	2.8±0.1	3,810	22.5	800×800×300	27.0			
	SH-1048	0.25mm × 48	3.0±0.1	500	3.5	360×360×165	4.9			
	SH-1048	0.25mm × 48	3.0±0.1	3,658	25.3	800×800×300	29.8			
	SH-1064	0.25mm × 64	3.3±0.1	500	4.4	360×360×165	6.3			
	SH-1064	0.25mm × 64	3.3±0.1	3,500	29.6	800×800×300	34.5			
	Special Optical Cables	VSH4001	1.0 mm × 1	3.0±0.1	500	8.6	360×360×165		10.0	PVC ON PE
		VSH4002	1.0 mm × 2	4.0×5.5±0.1		11.5	460×460×160		13.5	PVC ON PE
SHV4001		1.0 mm × 1	2.2±0.07	1.9		360×360×165	3.3	PVC		
SHV4002		1.0 mm × 2	2.2×4.6±0.1	3.9		360×360×165	5.3	PVC		
VST4001		1.0 mm × 1	5.0±0.2	100 (for 500)		2.8(14.0)	360×360×165 (460×460×160)	4.2(16.5)	PVC ON PE REINFORCED WITH KEVLAR	
VST4002		1.0 mm × 2	6.0±0.2	100 (for 500)		4.0(19.5)	360×360×165 (460×460×160)	5.5(22.0)		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**FEATURES**

- Mates with Standard, 1000  $\mu\text{m}$  Core, Plastic Fiber Cable
- Internal Micro-lens for Efficient Coupling
- Inexpensive Plastic Connector Housing
- Connector-less Interface
- Interference-free Transmission from Light-tight Housing
- Simple Fiber Termination and Connection
- Excellent Linearity



1. Anode  
2. Cathode  
Orange dot on package

**APPLICATIONS**

- Household Appliances
- Power Electronics
- Optical Networks
- Medical Instruments
- Automotive Electronics
- Audio Systems
- Electronic Games

**DESCRIPTION**

The IF-D91 is the active photodiode device in Industrial Fiber Optics' family of low-cost, medium-frequency, short-distance fiber optic emitters and detectors. Each emitter and detector consists of a PVC housing, an internal active element such as an LED or photodetector, and a cinch nut to hold the fiber in place. The PVC housing retains the active element and the cinch nut while optimizing coupling between the active element and the jacketed 1000  $\mu\text{m}$  plastic fiber.

Working with this family of fiber optics is simple: No special tools or training required. Only a sharp knife or razor blade is needed to terminate the plastic fiber. When the fiber is inserted in the emitter or detector, tighten the cinch nut. Thereafter, the fiber can be removed simply by loosening the nut.

**Maximum Ratings ( $T_A=25^\circ\text{C}$ )**

Operating and Storage Temperature Range ( $T_{OP}, T_{STG}$ )	-40° to 85°C
Junction Temperature ( $T_J$ )	85°C
Soldering Temperature (2mm from case bottom) ( $T_S$ ) $t \leq 5s$	240°C
Power Dissipation ( $P_{TOT}$ ) $T_A=25^\circ\text{C}$	100 mW
De-rate Above 25°C	1.33 mW/°C

**Characteristics ( $T_A=25^\circ\text{C}$ )**

Parameter	Symbol	Value	Unit
Maximum Photosensitivity	$\lambda_{PEAK}$	850	nm
Spectral Bandwidth (S=10% of S <sub>MAX</sub> )	$\Delta\lambda$	400-1100	nm
Rise and Fall Times (10% to 90% and 90% to 10%) ( $R_L=50\Omega, V_R=20\text{ V}, \lambda=850\text{ nm}$ )	$t_r, t_f$	5	ns
Total Capacitance	$C_T$	4	pF
Responsivity @ 860 nm	R	0.4	$\mu\text{A}/\mu\text{W}$
@ 632 nm		0.2	$\mu\text{A}/\mu\text{W}$
Dark Current ( $V_R=30\text{ volts}, E_E=0$ )	$I_D$	<60	nA
Reverse Breakdown Voltage	$V_{(BR)R}$	60	V
Forward Voltage	$V_f$	1.2	V

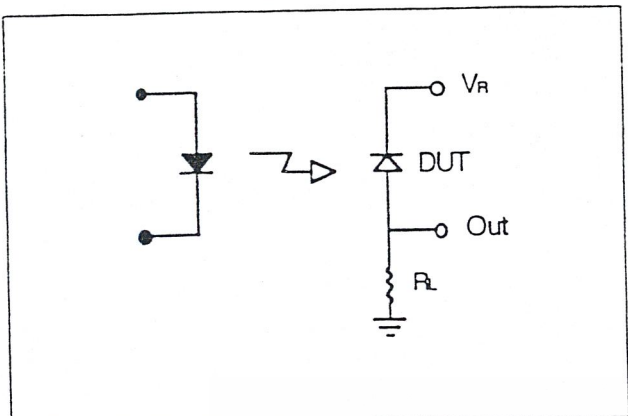
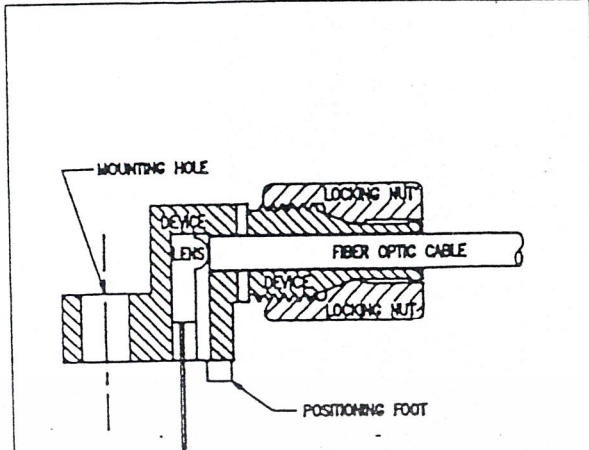


Figure 1. Circuit diagram for measuring rise and fall times.



**Fiber termination instructions:**

1. Cut off the ends of the cable with a single-edge razor blade or sharp knife. Try to obtain a precise 90-degree angle (square).
2. Insert the fiber through the locking nut and into the connector until the core tip seats against the internal micro-lens.
3. Screw the connector locking nut down to a snug fit, locking the fiber in place.

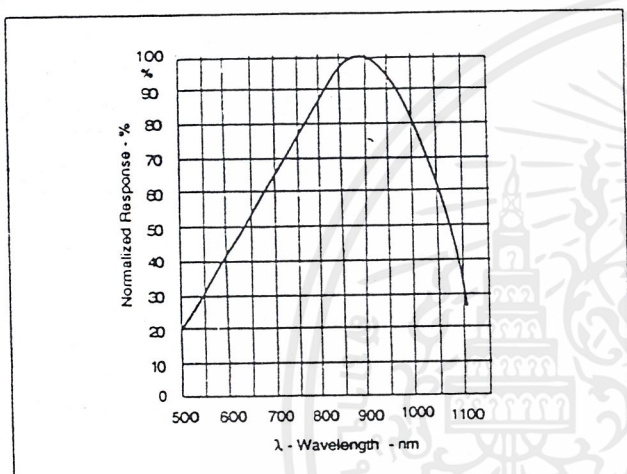


Figure 2. Typical detector response versus wavelength.

Figure 3. Cross-section of fiber optic device.

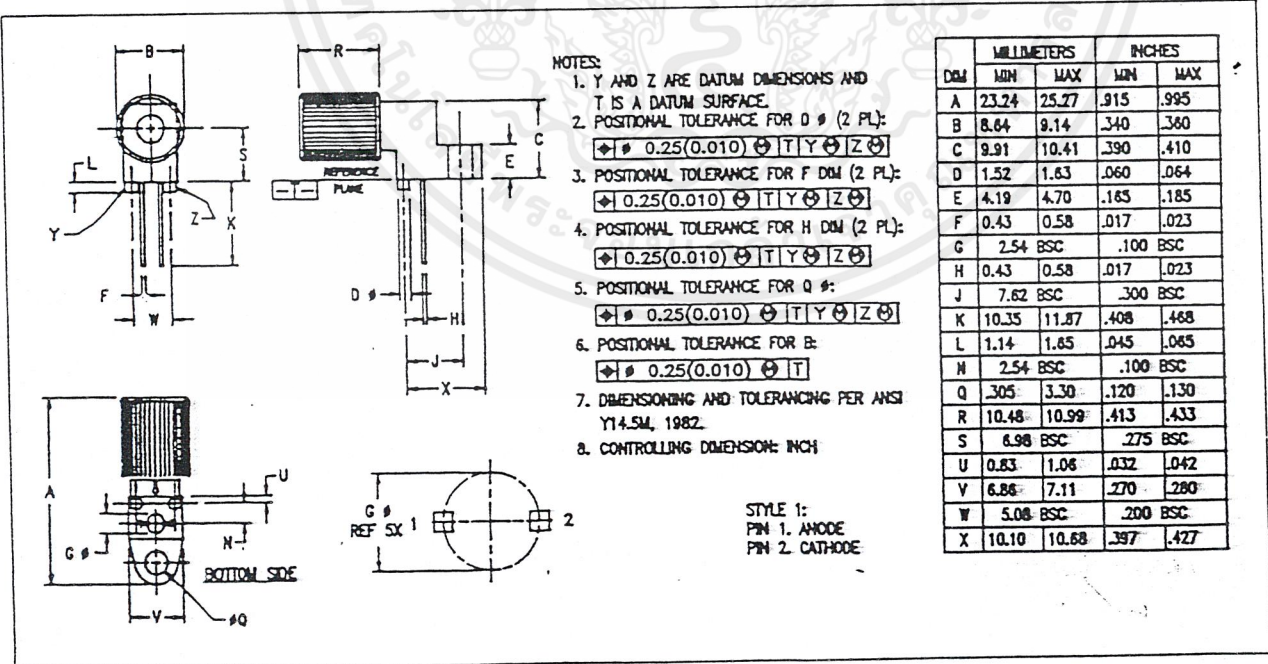


Figure 4. Case outline.

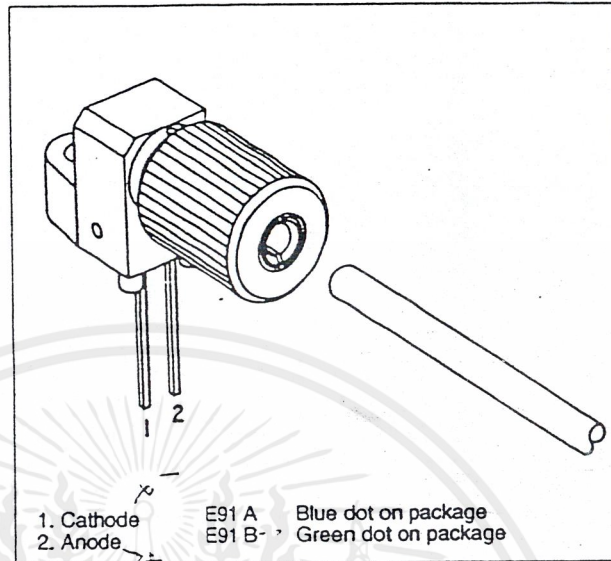
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**FEATURES**

- Mates with Standard, 1000  $\mu\text{m}$  Core, Plastic Fiber Cable
- Internal Micro-lens for Efficient Coupling
- Inexpensive Plastic Connector Housing
- Connector-less Interface
- Interference-free Transmission from Light-tight Housing
- Simple Fiber Termination and Connection
- Excellent Linearity

**APPLICATIONS**

- Household Appliances
- Power Electronics
- Optical Networks
- Medical Instruments
- Automotive Electronics
- Audio Systems
- Electronic Games



**DESCRIPTION**

The IF-E91A and IF-E91B are the infrared LEDs in Industrial Fiber Optics' family of low-cost, medium-frequency, short-distance fiber optic emitters and detectors. Each emitter and detector consists of a PVC housing, an internal active element such as an LED or photodetector and a cinch nut to hold the fiber in place. The PVC housing retains the active element and the cinch nut while optimizing coupling between the active element and the jacketed 1000  $\mu\text{m}$  plastic fiber.

Working with this family of fiber optics is simple: No special tools or training required. Only a sharp knife or razor blade is needed to terminate the plastic fiber. When the fiber is inserted in the emitter or detector, tighten the cinch nut. Thereafter, the fiber can be removed simply by loosening the nut.

**Maximum Ratings ( $T_A=25^\circ\text{C}$ )**

Operating and Storage Temperature Range ( $T_{OP}, T_{STG}$ )	-40° to 85° C
Junction Temperature ( $T_J$ )	85° C
Soldering Temperature (2mm from case bottom) ( $T_S$ ) $\leq 5s$	240° C
Reverse Voltage ( $V_R$ )	3 V
Power Dissipation ( $P_{TOT}$ ) $T_A=25^\circ\text{C}$	100 mW
De-rate Above 25° C	1.33 mW/°C

	IF-E91A	IF-E91B
Forward Current, DC ( $I_F$ )	50 mA	100 mA
Surge Current ( $I_{FSM}$ ) $\leq 10 \mu\text{sec}$	2 A	2 A

**Characteristics ( $T_A=25^\circ\text{C}$ )**

Parameter	Symbol	IF-E91A	IF-E91B	Unit
Peak Wavelength	$\lambda_{PEAK}$	950	880	nm
Spectral Bandwidth, 50% $I_{MAX}$	$\Delta\lambda$	40	80	nm
Output Power Coupled into Plastic Fiber (1 mm core diameter). Distance lens to fiber $\leq 0.1$ mm, 10 cm polished fiber, $I_F=100$ mA	$\Phi_{min}$	50	100	$\mu\text{W}$
Switching Times (10% to 90% and 90% to 10%) ( $R_L=47 \Omega$ , $I_F=10$ mA)	$t_r, t_f$	1.0	0.5	$\mu\text{s}$
Capacitance	$C_0$	25	25	pF
Forward Voltage ( $I_F=50$ mA)	$V_f$	1.5 max	1.7 max	V
Temperature Coefficient, $\lambda_{PEAK}$	$TC_\lambda$	0.3	0.3	nm/K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

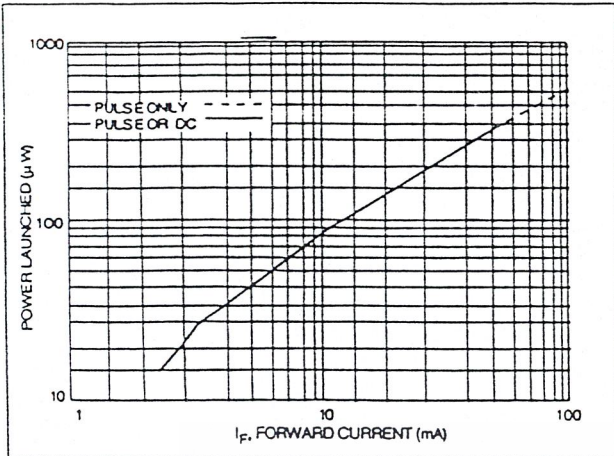


Figure 1. Normalized power launched versus forward current.

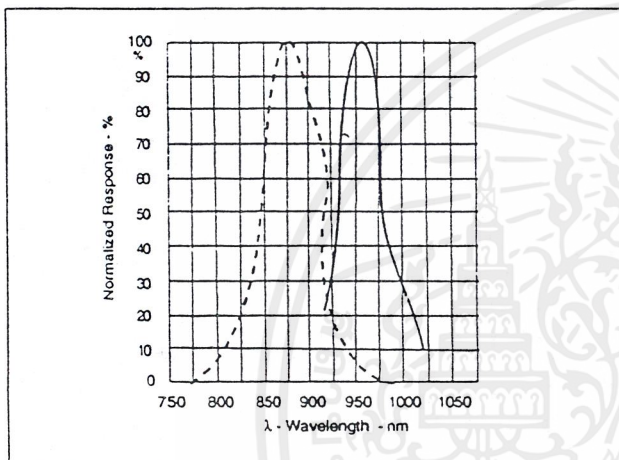
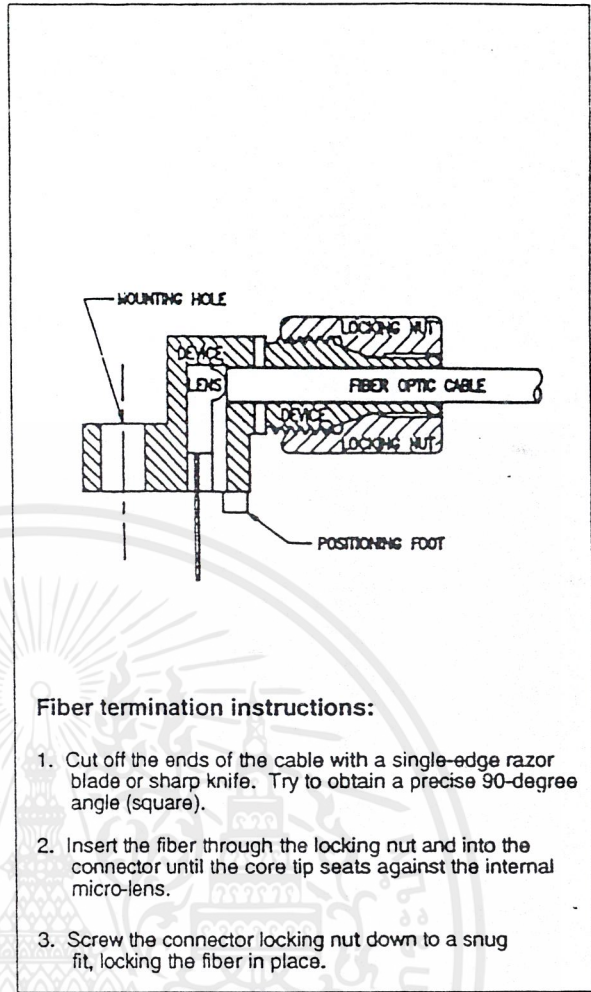


Figure 2. Typical spectral output versus wavelength.



Fiber termination instructions:

1. Cut off the ends of the cable with a single-edge razor blade or sharp knife. Try to obtain a precise 90-degree angle (square).
2. Insert the fiber through the locking nut and into the connector until the core tip seats against the internal micro-lens.
3. Screw the connector locking nut down to a snug fit, locking the fiber in place.

Figure 3. Cross-section of fiber optic device.

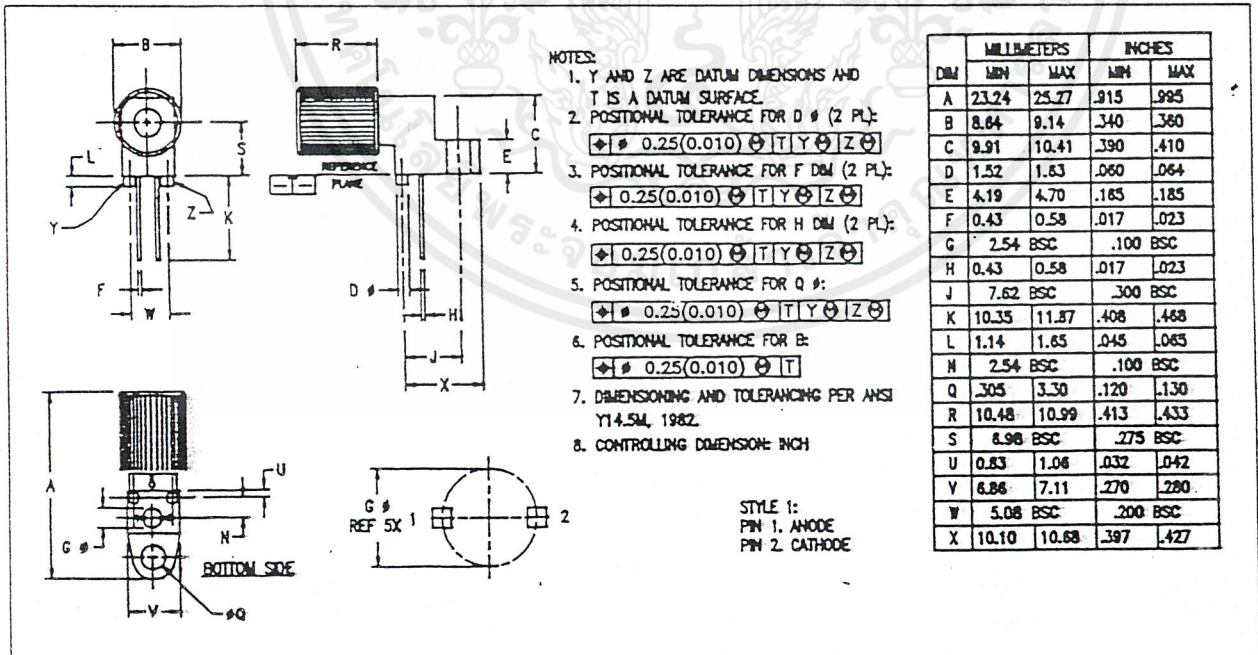


Figure 4. Case outline.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

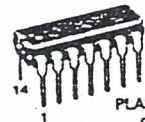


MOTOROLA

NE565A

PHASE-LOCKED LOOP

SILICON MONOLITHIC INTEGRATED CIRCUITS



P SUFFIX PLASTIC PACKAGE CASE 646-05

PHASE-LOCKED LOOP

The NE565A is designed for general-purpose phase-locked loop applications to 500 kHz.

- Stable Center Frequency - 200 ppm/°C (Typ)
- Flexible Power Supply Range -  $\pm 5$  to  $\pm 12$  Volts with Small Frequency Drift - 100 ppm/% (Typ)
- Low Total Harmonic Distortion of Demodulator Output - 1.5% (Max)
- Linear Triangle Wave Output - 0.5% (Typ)
- TTL, DTL Compatible Inputs and Outputs
- Adjustable Hold In Range -  $\pm 1\%$  to  $\geq 60\%$ .

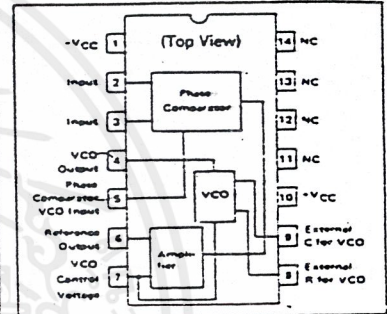
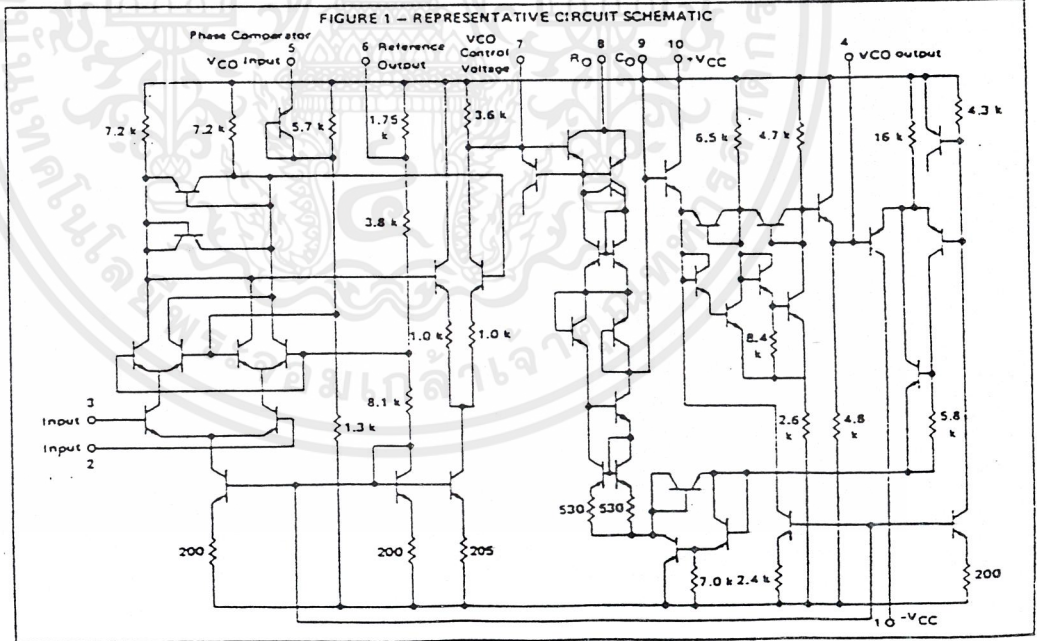


FIGURE 1 - REPRESENTATIVE CIRCUIT SCHEMATIC



MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FIGURE 3 - POWER SUPPLY CHARACTERISTICS

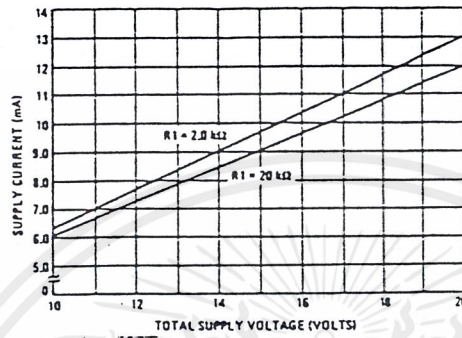


FIGURE 4 - VCO CONVERSION GAIN

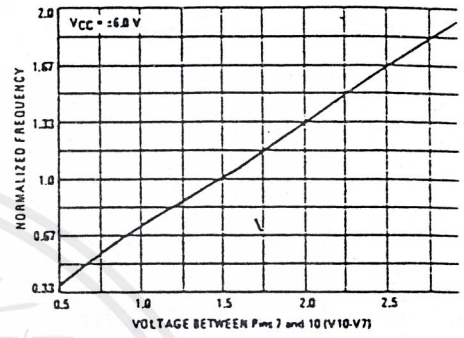


FIGURE 5 - LOCK RANGE versus INPUT VOLTAGE

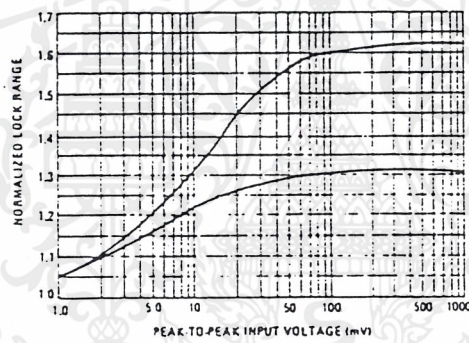


FIGURE 6 - OSCILLATOR OUTPUT WAVEFORMS

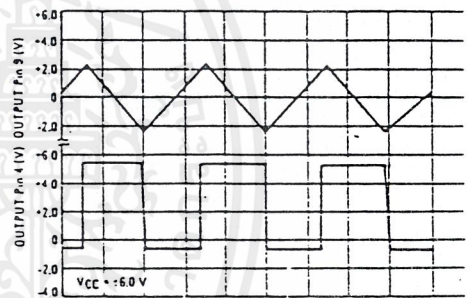


FIGURE 7 - LOCK RANGE  
(As a Function of Gain Setting Resistance)

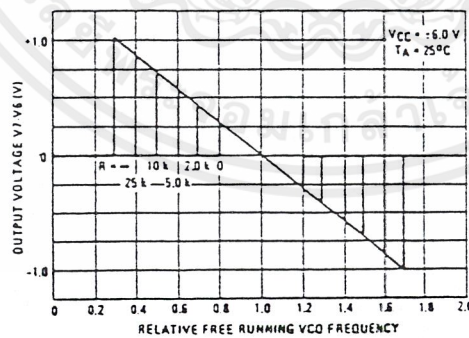
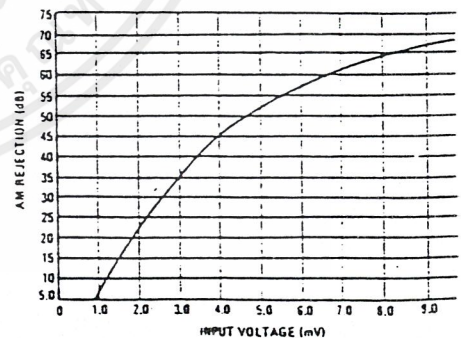


FIGURE 8 - AM REJECTION CHARACTERISTICS



6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NE565A

GENERAL APPLICATIONS INFORMATION

The following formulas are useful when designing with the NE565A:

1. Center Frequency -  $f_o \approx \frac{1}{3.7 R_O C_O}$

Where:  $f_o$  is the frequency of the VCO without input signal. For  $R_O$ ,  $C_O$  circuit location see Figure 2.

2. Loop Gain -  $K_O K_D A$

Definitions:

$K_O$  - VCO Conversion Gain - the conversion factor between VCO frequency and control voltage.

$K_O = 4.12 f_o$  (units are in radians/sec/volt)

Example: for VCO Sensitivity @ 10 kHz (in Hz/volt)

$K_O = \frac{4.12 \times 10^4}{2\pi \text{ radians}} = 6600 \text{ Hz/Volt}$

$K_D$  - Phase Detector Gain Factor - the conversion factor between the phase detector output voltage and the phase difference between input and VCO signals. Units are in volts/radian.

$K_D = \frac{8.1 \cdot A}{V_{CC}}$

Where:  $A = f(R6 \text{ to } R7)$

Hence:  $K_D = \frac{8.1}{V_{CC}} [f(R6-R7)]$

Where:  $V_{CC}$  is total system supply voltage,  $f(R6-R7)$  is internal amplifier gain (See Figure 9).  $V_{CC}$  - total supply voltage to the circuit.

3. Lock Range -  $f_L \approx \pm \frac{8f_o}{V_{CC}}$

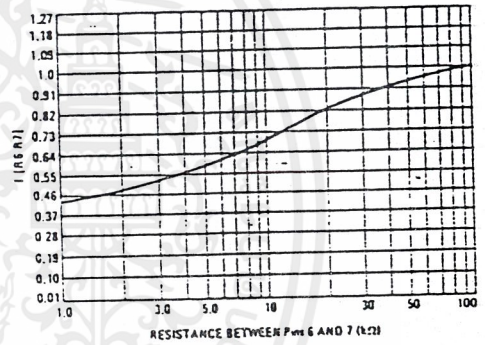
Where:  $f_L$  is the range of frequencies in the area of  $f_o$  over which the VCO, once locked to the input signal, will remain locked.

4. Capture Range -  $f_c \approx \pm \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\pi f_L}{\tau}}$

Where:  $f_c$  is that range of frequencies around  $f_o$  over which the loop will acquire lock with an input signal initially starting out of lock.

( $\tau$  = Time Constant at Pin 7)

FIGURE 9 - INTERNAL AMPLIFIER GAIN CHARACTERISTICS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





# OP-37

LOW-NOISE PRECISION HIGH-SPEED OPERATIONAL AMPLIFIER ( $A_{VCL} \geq 5$ )

Precision Monolithics Inc.

### FEATURES

- Low Noise ..... 80nV p-p (0.1Hz to 10Hz)
- ..... 3nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  at 1kHz
- Low Drift ..... 0.2 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- High Speed ..... 17V/ $\mu\text{s}$  Slew Rate
- ..... 63MHz Gain Bandwidth
- Low Input Offset Voltage ..... 10 $\mu\text{V}$
- Excellent CMRR ... 126dB (Common-Voltage of  $\pm 11\text{V}$ )
- High Open-Loop Gain ..... 1.8 Million
- Replaces 725, OP-05, OP-06, OP-07, AD510, AD517, SE5534 in Gains  $\geq 5$
- Available in Die Form

### ORDERING INFORMATION

$\pm 25^\circ\text{C}$ O <sub>5</sub> MAX (mV)	PACKAGE				OPERATING TEMPERATURE RANGE
	TO-99	CERDIP 8-PIN	PLASTIC 8-PIN	LCC 20-CONTACT	
25	OP37AJ*	OP37AZ*	-	-	MIL
25	OP37EJ	OP37EZ	OP37EP	-	INDCOM
60	OP37BJ*	OP37BZ*	-	OP37BRC/883	MIL
60	OP37FJ	OP37FZ	OP37FP	-	INDCOM
100	OP37CJ*	OP37CZ*	-	-	MIL
100	OP37GJ	OP37GZ	OP37GP	-	XIND
100	-	-	OP37GS††	-	XIND

- \* For devices processed in total compliance to MIL-STD-883, add /883 after part number. Consult factory for 883 data sheet.
- † Burn-in is available on commercial and industrial temperature range parts in CerDIP, plastic DIP, and TO-can packages. For ordering information, see 1990/91 Data Book, Section 2.
- †† For availability and burn-in information on SO package, contact your local sales office.

### GENERAL DESCRIPTION

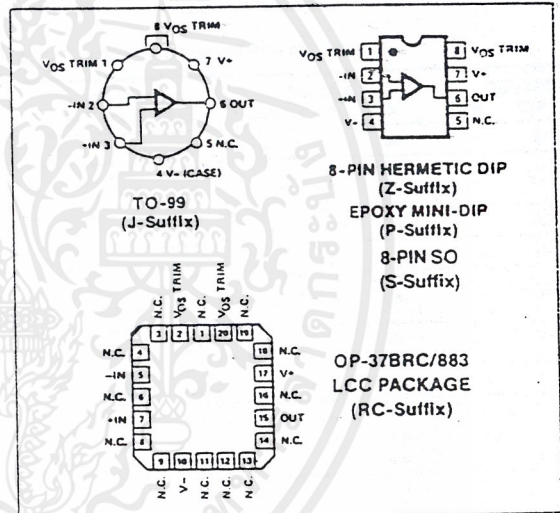
The OP-37 provides the same high performance as the OP-27, but the design is optimized for circuits with gains greater than five. This design change increases slew rate to 17V/ $\mu\text{s}$  and gain-bandwidth product to 63MHz.

The OP-37 provides the low offset and drift of the OP-07 plus higher speed and lower noise. Offsets down to 25 $\mu\text{V}$  and drift of 0.6 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  maximum make the OP-37 ideal for precision instrumentation applications. Exceptionally low noise ( $e_n = 3.5\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  at 10Hz), a low 1/f noise corner frequency of 2.7Hz, and the high gain of 1.8 million, allow accurate high-gain amplification of low-level signals.

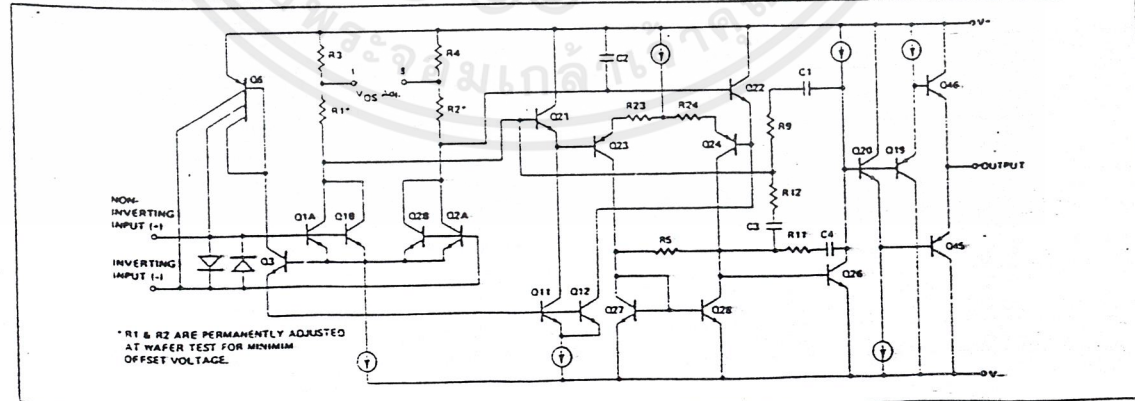
The low input bias current of  $\pm 10\text{nA}$  and offset current of 7nA are achieved by using a bias-current-cancellation circuit. Over the military temperature range this typically holds  $I_B$  and  $I_{OS}$  to  $\pm 20\text{nA}$  and 15nA respectively.

The output stage has good load driving capability. A guaranteed swing of  $\pm 10\text{V}$  into 600 $\Omega$  and low output distortion make the OP-37 an excellent choice for professional audio applications.

### PIN CONNECTIONS



### SIMPLIFIED SCHEMATIC



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OP-37 LOW-NOISE PRECISION HIGH-SPEED OPERATIONAL AMPLIFIER

ELECTRICAL CHARACTERISTICS at  $V_S = \pm 15V$ ,  $T_A = 25^\circ C$ , unless otherwise noted. (Continued)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	OP-37A/E			OP-37B/F			OP-37C/G			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Loop Output Resistance	$R_O$	$V_O = 0, I_O = 0$	—	70	—	—	70	—	—	70	—	$\Omega$
Power Consumption	$P_d$	$V_O = 0$	—	90	140	—	90	140	—	100	170	mW
Input Bias Current Adjustment	$R_p$	$R_p = 10k\Omega$	—	$\pm 4.0$	—	—	$\pm 4.0$	—	—	$\pm 4.0$	—	mV

NOTES:  
 1. Input offset voltage measurements are performed by automated test equipment approximately 0.5 seconds after application of power. A/E grades guaranteed fully warmed up.  
 2. Long-term input offset voltage stability refers to the average trend line of  $V_{OS}$  vs. Time over extended periods after the first 30 days of operation. Excluding the initial hour of operation, changes in  $V_{OS}$  during the first 30

days are typically  $2.5\mu V$  — refer to typical performance curve.  
 3. Sample tested.  
 4. Guaranteed by design.  
 5. See test circuit and frequency response curve for 0.1Hz to 10Hz tester.  
 6. See test circuit for current noise measurement.  
 7. Guaranteed by input bias current.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS for  $V_S = \pm 15V$ ,  $-55^\circ C \leq T_A \leq +125^\circ C$ , unless otherwise noted.

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	OP-37A			OP-37B			OP-37C			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	$V_{OS}$	Note 1	—	30	60	—	50	200	—	70	300	$\mu V$
Large Signal Input Offset Drift	$TCV_{OS}$ $TCV_{OSn}$	Note 2 Note 3	—	0.2	0.6	—	0.3	1.3	—	0.4	1.8	$\mu V/^\circ C$
Input Offset Current	$I_{OS}$		—	15	50	—	22	85	—	30	135	nA
Input Bias Current	$I_B$		—	$\pm 20$	$\pm 60$	—	$\pm 28$	$\pm 95$	—	$\pm 35$	$\pm 150$	nA
Input Voltage Range	IVR		$\pm 10.3$	$\pm 11.5$	—	$\pm 10.3$	$\pm 11.5$	—	$\pm 10.2$	$\pm 11.5$	—	V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$V_{CM} = \pm 10V$	108	122	—	100	119	—	94	116	—	dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_S = \pm 4.5V$ to $\pm 18V$	—	2	16	—	2	20	—	4	51	$\mu V/V$
Large-Signal Voltage Gain	$A_{VO}$	$R_L \geq 2k\Omega, V_O = \pm 10V$	600	1200	—	500	1000	—	300	800	—	V/mV
Output Voltage Swing	$V_O$	$R_L \geq 2k\Omega$	$\pm 11.5$	$\pm 13.5$	—	$\pm 11.0$	$\pm 13.2$	—	$\pm 10.5$	$\pm 13.0$	—	V

ELECTRICAL CHARACTERISTICS for  $V_S = \pm 15V$ ,  $-25^\circ C \leq T_A \leq +85^\circ C$  for OP-37EJ/FJ and OP-37EZ/FZ,  $0^\circ C \leq T_A \leq +70^\circ C$  for OP-37EP/FP and  $-40^\circ C \leq T_A \leq +85^\circ C$  for OP-37GP/GS/GJ/GZ, unless otherwise noted.

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	OP-37E			OP-37F			OP-37G			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	$V_{OS}$		—	20	50	—	40	140	—	55	220	$\mu V$
Large Signal Input Offset Drift	$TCV_{OS}$ $TCV_{OSn}$	Note 2 Note 3	—	0.2	0.6	—	0.3	1.3	—	0.4	1.8	$\mu V/^\circ C$
Input Offset Current	$I_{OS}$		—	10	50	—	14	85	—	20	135	nA
Input Bias Current	$I_B$		—	$\pm 14$	$\pm 60$	—	$\pm 18$	$\pm 95$	—	$\pm 25$	$\pm 150$	nA
Input Voltage Range	IVR		$\pm 10.5$	$\pm 11.8$	—	$\pm 10.5$	$\pm 11.8$	—	$\pm 10.5$	$\pm 11.8$	—	V
Common-Mode Rejection Ratio	GMRR	$V_{CM} = \pm 10V$	110	124	—	102	121	—	96	118	—	dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_S = \pm 4.5V$ to $\pm 18V$	—	2	15	—	2	16	—	2	32	$\mu V/V$
Large-Signal Voltage Gain	$A_{VO}$	$R_L \geq 2k\Omega, V_O = \pm 10V$	750	1500	—	700	1300	—	450	1000	—	V/mV
Output Voltage Swing	$V_O$	$R_L \geq 2k\Omega$	$\pm 11.7$	$\pm 13.6$	—	$\pm 11.4$	$\pm 13.5$	—	$\pm 11.0$	$\pm 13.3$	—	V

NOTES:  
 1. Input offset voltage measurements are performed by automated test equipment approximately 0.5 seconds after application of power. A/E grades guaranteed fully warmed up.

2. The  $TCV_{OS}$  performance is within the specifications unnull'd or when null'd with  $R_p = 8k\Omega$  to  $20k\Omega$ .  $TCV_{OS}$  is 100% tested for A/E grades, sample tested for B/C/F/G grades.  
 3. Guaranteed by design.

5 OPERATIONAL AMPLIFIERS/BUFFERS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# LM386 low voltage audio power amplifier

## general description

The LM386 is a power amplifier designed for use in low voltage consumer applications. The gain is internally set to 20 to keep external part count low, but the addition of an external resistor and capacitor between pins 1 and 8 will increase the gain to any value up to 200.

The inputs are ground referenced while the output is automatically biased to one half the supply voltage. The quiescent power drain is only 24 milliwatts when operating from a 6 volt supply, making the LM386 ideal for battery operation.

## features

- Battery operation
- Minimum external parts
- Wide supply voltage range
- Low quiescent current drain

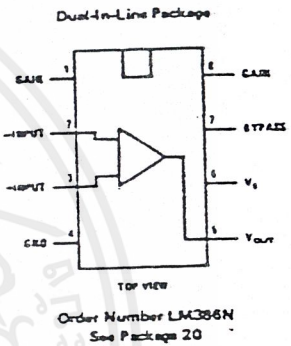
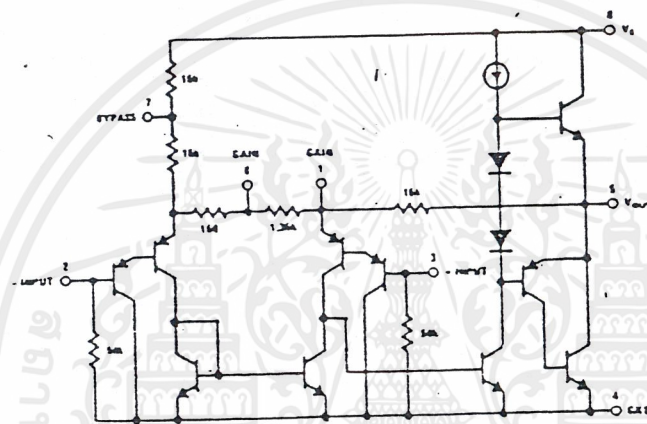
4-12 Volts  
4 mA

- Voltage gains from 20 to 200
- Ground referenced input
- Self-centering output quiescent voltage
- Low distortion
- Eight pin dual-in-line package

## applications

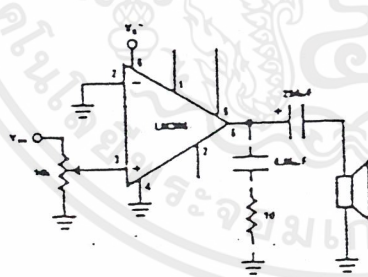
- AM-FM radio amplifiers
- Portable tape player amplifiers
- Intercoms
- TV sound systems
- Line drivers
- Ultrasonic drivers
- Small servo drivers
- Power converters

## equivalent schematic and connection diagrams

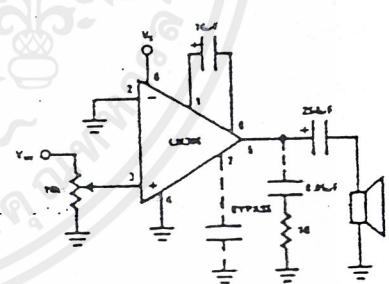


## typical applications

Amplifier with Gain = 20  
Minimum Parts



Amplifier with Gain = 200



## absolute maximum ratings

Supply Voltage (Note 1)	15V
Package Dissipation 8 Pin DIP (Note 2)	660 mW
Input Voltage	±0.4V
Storage Temperature	-65°C to +150°C
Operating Temperature	0°C to +70°C
Junction Temperature	+150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)	+300°C

## electrical characteristics $T_A = 25^\circ\text{C}$

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Operating Supply Voltage ( $V_S$ )		4		12	V
Quiescent Current ( $I_Q$ )	$V_S = 6V, V_{IN} = 0$		4	8	mA
Output Power ( $P_{OUT}$ ) (Note 3)	$V_S = 6V, R_L = 8\Omega, THD = 10\%$ $V_S = 9V, R_L = 16\Omega, THD = 10\%$	250	325 500		mW mW
Voltage Gain ( $A_v$ )	$V_S = 6V, f = 1\text{ kHz}$ 10 $\mu\text{F}$ from Pin 1 to 8		26 46		dB dB
Bandwidth (BW)	$V_S = 6V, \text{Pins 1 and 8 Open}$		300		kHz
Total Harmonic Distortion (THD)	$V_S = 6V, R_L = 8\Omega, P_{OUT} = 125\text{ mW}$ $f = 1\text{ kHz, Pins 1 and 8 Open}$		0.2		%
Power Supply Rejection Ratio (PSRR)	$V_S = 6V, f = 1\text{ kHz, } C_{BYPASS} = 10\mu\text{F}$ Pins 1 and 8 Open, Referred to Output		50		dB
Input Resistance ( $R_{IN}$ )			50		k $\Omega$
Input Bias Current ( $I_{BIAS}$ )	$V_S = 6V, \text{Pins 2 and 3 Open}$		250		nA

Note 1: Parts selected for higher absolute maximum supply voltage available on special request.

Note 2: For operating at elevated temperatures, the device must be derated based on a 150°C maximum junction temperature and a thermal resistance of 187°C/W junction to ambient.

Note 3: If oscillation exists under some load conditions, add 10 $\Omega$  and 0.05 $\mu\text{F}$  series network from pin 5 to ground.

## application hints

### GAIN CONTROL

To make the LM386 a more versatile amplifier, two pins (1 and 8) are provided for gain control. With pins 1 and 8 open the 1.35 k $\Omega$  resistor sets the gain at 20 (26 dB). If a capacitor is put from pin 1 to 8, bypassing the 1.35 k $\Omega$  resistor, the gain will go up to 200 (46 dB). If a resistor is placed in series with the capacitor, the gain can be set to any value from 20 to 200. Gain control can also be done by capacitively coupling a resistor (or FET) from pin 1 to ground.

Additional external components can be placed in parallel with the internal feedback resistors to tailor the gain and frequency response for individual applications. For example, we can compensate poor speaker bass response by frequency shaping the feedback path. This is done with a series RC from pin 1 to 5 (paralleling the internal 15 k $\Omega$  resistor). For 6 dB effective bass boost:  $R \approx 15\text{ k}\Omega$ , the lowest value for good stable operation is  $R = 10\text{ k}\Omega$  if pin 8 is open. If pins 1 and 8 are bypassed then  $R$  as low as 2 k $\Omega$  can be used. This restriction is because the amplifier is only compensated for closed-loop gains greater than 9.

### INPUT BIASING

The schematic shows that both inputs are biased to ground with a 50 k $\Omega$  resistor. The base current of the input transistors is about 250 nA, so the inputs are at about 12.5 mV when left open. If the dc source resistance driving the LM386 is higher than 250 k $\Omega$  it will contribute very little additional offset (about 2.5 mV at the input, 50 mV at the output). If the dc source resistance is less than 10 k $\Omega$ , then shorting the unused input to ground will keep the offset low (about 2.5 mV at the input, 50 mV at the output). For dc source resistances between these values we can eliminate excess offset by putting a resistor from the unused input to ground, equal in value to the dc source resistance. Of course all offset problems are eliminated if the input is capacitively coupled.

When using the LM386 with higher gains (bypassing the 1.35 k $\Omega$  resistor between pins 1 and 8) it is necessary to bypass the unused input, preventing degradation of gain and possible instabilities. This is done with a 0.1 $\mu\text{F}$  capacitor or a short to ground depending on the dc source resistance on the driven input.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LF155/155A/LF255/LF355/LF355A/LF355B/LF355A/355B/LF156/LF156A/LF256/LF356/LF356A/LF356B/LF157/LF157A/LF257/LF357/LF357A/LF357B



## LF155/LF156/LF157 Series Monolithic JFET Input Operational Amplifiers

LF155/LF155A/LF255/LF355/LF355A/  
 LF355B Low Supply Current  
 LF156/LF156A/LF256/LF356/LF356A/  
 LF356B Wide Band  
 LF157/LF157A/LF257/LF357/LF357A/  
 LF357B Wide Band Decompensated ( $A_{V_{MIN}} = 5$ )  
**General Description**

These are the first monolithic JFET input operational amplifiers to incorporate well matched, high voltage JFETs on the same chip with standard bipolar transistors (BI-FET™ Technology). These amplifiers feature low input bias and offset currents/low offset voltage and offset voltage drift, coupled with offset adjust which does not degrade drift or common-mode rejection. The devices are also designed for high slew rate, wide bandwidth, extremely fast settling time, low voltage and current noise and a low 1/f noise corner.

### Advantages

- Replace expensive hybrid and module FET op amps
- Rugged JFETs allow blow-out free handling compared with MOSFET input devices
- Excellent for low noise applications using either high or low source impedance—very low 1/f corner
- Offset adjust does not degrade drift or common-mode rejection as in most monolithic amplifiers
- New output stage allows use of large capacitive loads (10,000 pF) without stability problems
- Internal compensation and large differential input voltage capability

### Applications

- Precision high speed integrators
- Fast D/A and A/D converters
- High impedance buffers
- Wideband, low noise, low drift amplifiers
- Logarithmic amplifiers

- Photocell amplifiers
- Sample and Hold circuits

### Common Features

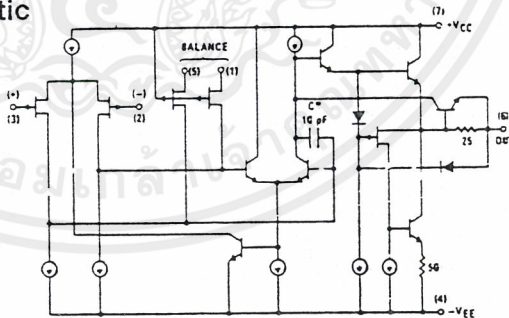
(LF155A, LF156A, LF157A)

- Low input bias current 30 pA
- Low Input Offset Current 3 pA
- High input impedance  $10^{12}\Omega$
- Low input offset voltage 1 mV
- Low input offset voltage temp. drift  $3 \mu V/^{\circ}C$
- Low input noise current  $0.01 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
- High common-mode rejection ratio 100 dB
- Large dc voltage gain 106 dB

### Uncommon Features

	LF155A	LF156A	LF157A ( $A_V = 5$ )	Units
■ Extremely fast settling time to 0.01%	4	1.5	1.5	$\mu s$
■ Fast slew rate	5	12	50	$V/\mu s$
■ Wide gain bandwidth	2.5	5	20	MHz
■ Low input noise voltage	20	12	12	$nV/\sqrt{\text{Hz}}$

### Simplified Schematic



\*3 pF in LF157 series.

TL/H/5646-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. Henry Zanger, Cynthi Zanger, Fiber Optic Communication and Other Appication , 1 st , Maxwell Macmillan, Inc,1991.
2. Joseph C. palaif , Fiber Optic Communication , 2 nd ,ed ,Pacici-hall, Inc, 1988
3. อตนันท์ มณียานนท์ , การสื่อสารเส้นใยนำแสง , พิมพ์ครั้งที่ 1 , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้