

การส่งสัญญาณ PM ผ่านสัญญาณแสง



นายชัชวาล เตชะโพธิ์วิรุณ  
นายชัยณรงค์ จุฑาธิปไตย

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2541

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน... 36692  
วัน, เดือน, ปี... 23 ต.ค. 2543

สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SIGNALING PM VIA FIBER-OPTIC LINK**

**MR. CHATCHAWAN THECHAPOTIWORAKUL**

**MR. CHAINARONG JUTATIPAT**

**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement**

**for the Bachelor Degree of Science**

**Department of Applied Physics**

**Faculty of Science**

**King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang**

**1998**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



<b>Special Project Title</b>	Signaling PM via Fiber-Optic Link
<b>Name</b>	Mr.Chatchawan Taechapotiwoarakul Mr.Chainarong Jutatipat
<b>Special Project Advisor</b>	Assistant Professor Dr.Sirisak TECHATHAWIKUL
<b>Department</b>	Applied Physics
<b>Academic Year</b>	1998

### Abstract

The purpose of this project is to build up a simplex communication system for signaling PM via a fiber-optic link. The system is composed of three main parts, namely optical signal transmitter, optical signal receiver, and fiber-optic transmission line. Original analog signal in the 300 to 3,400 Hz frequency band is converted into light signal as wavelength 880 nm by using phase modulation technique. The light signal is transmitted via a single optical fiber to a photodiode that converts the optical signal into usable electrical signal again. After demodulation and then audio amplifying, the original AF signal is obtained. Moreover, parameter and test results show that the system has mediocrity, but the data are in good agreement with the analog modulation theory.

หัวข้อโครงการพิเศษ            การส่งสัญญาณ PM ผ่านเส้นใยนำแสง  
โดย                                    นายชัชวาล เตชะโพธิวรคุณ  
                                              นายชัยณรงค์ จุฑาธิปไตย  
ภาควิชา                                ฟิสิกส์ประยุกต์  
อาจารย์ที่ปรึกษา                ผศ.ดร.ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล  
ปีการศึกษา                        2540

#### บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษนี้ คือเพื่อสร้างระบบการติดต่อสื่อสารอย่างง่าย โดยส่งสัญญาณ PM ผ่านสายไฟเบอร์-ออปติก. ระบบจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ชุดส่งสัญญาณทางแสง, ชุดรับสัญญาณทางแสง และสายสัญญาณไฟเบอร์-ออปติก. ชั้นแรกสัญญาณอนาล็อกในช่วงความถี่ 300-3,400 Hz จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของสัญญาณแสงในช่วงความยาวคลื่น 880 nm โดยการใช้เทคนิคเฟสมอดูเลชัน. สัญญาณจะถูกส่งออกผ่านสายไฟเบอร์-ออปติก ไปยังโฟโตไดโอด จากนั้นจะทำการแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าอีกครั้ง. หลังจากการดีมอดูเลทและทำการขยายสัญญาณขึ้น, ก็จะได้สัญญาณ AF เดิมกลับมา. ยิ่งไปกว่านั้น, ค่าต่างๆและผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าระบบนั้นแม้จะง่าย ๆ, แต่ข้อมูลที่ได้ก็อยู่ในข่ายที่ยอมรับได้ เมื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎีการมอดูเลทสัญญาณอนาล็อก.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอบพระคุณทุกท่านและทุกสิ่งทุกอย่าง ทั้งที่เอ่ยนามและไม่เอ่ยนาม

- ผศ.ดร.ศิริศักดิ์ เศรษฐวิกุล และกราบขออภัยที่หนังสือฉบับนี้ค่อนข้างล่าช้า
- อาจารย์สุน่ จำประบุตร สำหรับเครื่องมือเครื่องมือ และอุปกรณ์ชั้นดี
- เกียรติภูมิ, ชัชชัย, อนันต์ชัย, ไม่ต้องอธิบายยืดเยื้อ เพราะเขาเหล่านี้ตั้งแต่แรกเริ่ม จนถึงทุกวันนี้
- ชัชศักดิ์, วรกุล แม้จะอยู่ต่างภาควิชา แต่...ไม่เห็นแปลก
- รุ่นพี่ทุกๆท่านที่คงไม่สามารถเอ่ยนามได้ทั้งหมด แต่ขอบคุณมากครับ
- รุ่นน้องที่คอยช่วยเหลือเสมอมา แล้วพี่จะกลับมา...สักวัน
- พี่เป้ (พีสิคส์รุ่น 6) ต้องขอกล่าวนามเป็นท่านสุดท้าย ด้วยเพราะรบกวนกันมาตั้งแต่ปีแรก จนจบแล้วก็ยังไม่วาย บางครั้งเรารู้สึกเกรงใจพี่มากแต่ก็ยังไม่เคยเลยสักครั้งที่พี่เป้จะปฏิเสธหรือไม่ช่วยน้อง แม้ว่าเราจะใช้คำขอบคุณและขอโทษกันค่อนข้างเปลือง แต่คำนี้ก็ดีที่สุดแล้ว...ขอบคุณพี่เป้มากครับ

คงไม่ต้องอธิบายความรู้สึกตอนนี้กันแล้ว

วันหนึ่งเมื่อคุณได้เขียนกิตติกรรมประกาศคุณจะเข้าใจ!

ที่ผ่านมาระหว่างเราอาจดูเป็นคนเลวๆ ดิบๆ เกือบ ถ้อย หยาบคาย ในสายตาของคนทั่วไป

แต่จงเชื่อเถิดว่า ไม่มีใครหรืออะไรมันเลวไป 100%

อย่างน้อยเราพอจะมีความคิดดีๆอยู่บ้าง

และเราก็มีจิตใจดีเฉกเช่นคนอื่นๆ

แต่เราไม่สามารถแสดงออกเยี่ยงคนดีๆ

ไม่รู้สักแปลกใจกันบ้างหรือที่ต้องทำตัวเป็นคนคิดตลอดเวลา

ต้องคิดให้ดี, ต้องแต่งตัวดี, ต้องพูดจาดี.....ต้องทำอะไรดีๆ ชีวิตมีสี่ส้นละหรือ

สุดท้าย...หากแม้ว่า โครงการพิเศษนี้ยังพอจะยังประโยชน์ให้กับผู้อื่นได้บ้าง ต้องขอ

มอบเครดิตแห่งความดีทั้งหมดให้กับผู้ซึ่งหนุนหลังเรามาทั้งชีวิต...ขอบพระคุณพ่อคุณแม่มาครับ

ชัชวาล เศรษฐวิกุล

ชัยณรงค์ จุฑาธิปไตย

## สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 คุณสมบัติพิเศษต่างๆของการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง	1
1.2 การเชื่อมต่อของเส้นใยนำแสง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ	3
1.3.1 หลักการของภาคส่ง	3
1.3.2 เส้นใยนำแสง	4
1.3.3 หลักการของภาครับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีการมอดูเลตเบื้องต้น	5
2.1 หลักการมอดูเลชัน	5
2.2 เฟสมอดูเลชัน	6
2.3 หลักการมอดูเลตแบบ FM	10
2.4 มอดูเลชันอินเด็กซ์และเปอร์เซ็นต์การมอดูเลตของสัญญาณ FM	12
2.5 การดีมอดูเลชันสัญญาณ FM	13
บทที่ 3 การสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง	22
3.1 วิวัฒนาการของการสื่อสารด้วยแสง	22
3.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของการสื่อสารด้วยแสง	24
3.3 เส้นใยนำแสง	25
3.3.1 โครงสร้างพื้นฐานของเส้นใยนำแสง	25
3.3.2 การเคลื่อนตัวของแสงในเส้นใยนำแสง	26
3.3.3 การแตกกระจายของรูปสัญญาณจากเส้นใยนำแสง	28
3.3.4 ชนิดของเส้นใยนำแสง	29
3.4 ความสูญเสียของสัญญาณในระบบการสื่อสารด้วยแสง	33
3.5 แแถบการส่งสัญญาณของเส้นใยนำแสง	34
บทที่ 4 ระบบออปโตอิเล็กทรอนิกส์	35
4.1 แหล่งกำเนิดแสง	35
4.1.1 ช่วงทำงานของความยาวคลื่น	36
4.1.2 พลังงานและการเชื่อมต่อของแสง	37
4.1.3 แหล่งกำเนิดแสง	37
4.1.4 แหล่งกำเนิดแสงเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์	41
4.1.5 ความแตกต่างของแหล่งกำเนิด	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.6 ความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอด	44
4.1.7 สเปกตรัมของเลเซอร์	45
4.1.8 Fiber Transmission windows	45
4.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของตัวส่งแสง	46
4.3 อุปกรณ์รับแสง	51
4.3.1 พีเอ็น โฟโตไดโอด	52
4.3.2 พีไอเอ็น โฟโตไดโอด	54
4.3.3 อะวาตานิซโฟโตไดโอด	55
4.4 คุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง	56
บทที่ 5 การออกแบบวงจรที่ใช้ในโครงการ	59
5.1 วงจรทางภาคส่ง	59
5.1.1 วงจรปริแอมพลิไฟร์	59
5.1.2 วงจรมอดูเลทแบบ FM	60
5.1.3 วงจรขับ	61
5.2 วงจรภาครับ	62
5.2.1 ภาครับก่อนขยาย	62
5.2.2 วงจรขยาย	63
5.2.3 วงจรดีมอดูเลทของสัญญาณ FM แบบ PLL	64
5.2.4 วงจรทางภาคขยายเสียง	67
บทที่ 6 การดำเนินการและผลการดำเนินการ	68
6.1 วงจรทางภาคส่ง	68
6.2 ผลการดำเนินงาน	68

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าไชน์แบนด์และดัชนีการมอดูเลทที่ใช้ในสมการ	13
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง	58
ตารางที่ 6.1 แสดงค่า output ที่ได้จากการส่งสัญญาณ โดยผ่านหลอดทองแดง	74
ตารางที่ 6.2 แสดงค่า output ที่ได้จากการส่งสัญญาณ โดยผ่านเส้นใยแก้วนำแสง	78



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการทำงานของภาคส่ง	3
รูปที่ 1.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการทำงานของภาครับ	4
รูปที่ 2.1 แสดงสัญญาณไซน์	7
รูปที่ 2.2 แสดงสัญญาณพาหะ ข้อมูล FM PM	8
รูปที่ 2.3 แสดงการเลื่อนเฟสของ PM	9
รูปที่ 2.4 การมอดูเลชันแบบ FM	12
รูปที่ 2.5 พื้นฐานของ PLL	14
รูปที่ 2.6 อินพุทและเอาต์พุทของเฟสดีเทคเตอร์	14
รูปที่ 2.7 ลักษณะของ VCO	15
รูปที่ 2.8 เฟสล็อกคัลและเพิ่มลดของสัญญาณอินพุท	16
รูปที่ 2.9 วงจรคิมอดูเลท FM แบบการแยกพัลส์เฉลี่ย	18
รูปที่ 2.10 รูปคลื่นจากวงจร pulse-averaging discrimination	19
รูปที่ 2.11 วงจรคิมอดูเลทแบบควอดเรเจอร์ดีเทคเตอร์	20
รูปที่ 2.12 รูปสัญญาณจากวงจรควอดเรเจอร์ดีเทคเตอร์	21
รูปที่ 3.1 แสดงการทำงานของโฟโต โฟน	23
รูปที่ 3.2 แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของระบบการสื่อสารเส้นใยแสง	24
รูปที่ 3.3 แสดง โครงสร้างพื้นฐานของเส้นใยแสง	25
รูปที่ 3.4 การหักเหของแสง	26
รูปที่ 3.5 การหักเหของแสงผ่านแท่งแก้วตัน	27
รูปที่ 3.6 การเคลื่อนที่ของแสงภายในแท่งแก้ว	28
รูปที่ 3.7 การเดินทางของแสงภายในเส้นใยนำแสง	30
รูปที่ 3.8 ดัชนีการหักเหแสงของเส้นใยนำแสงชนิดดัชนีชั้นบันได	31
รูปที่ 3.9 ดัชนีการหักเหแสงของเส้นใยนำแสงชนิดดัชนีรูปมน	31
รูปที่ 3.10 แนวทางของแสงในแกนเส้นใยนำแสงชนิดดัชนีรูปมน	32
รูปที่ 3.11 การสูญเสียจากการโค้งงอเส้นใยนำแสง	33
รูปที่ 4.1 แสดงชื่อเรียกและชนิดต่างๆของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	35
รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างสเปกตรัมของ LED และ เซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์	36
รูปที่ 4.3 การส่งแสงจากแหล่งกำเนิดสู่เส้นใยนำแสง	37
รูปที่ 4.4 ลักษณะการทำงานของ LED	38
รูปที่ 4.5 ระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำ	39

รูปที่ 4.6 ลักษณะการส่งแสงของ LED	40
รูปที่ 4.7 การปล่อยแสงของ LED แบบ edge-emitter diode	41
รูปที่ 4.8 การดูดกลืนกลืนพลังงาน	42
รูปที่ 4.9 พื้นฐานการเกิดเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์	43
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของกระแสกับกำลังของแสงที่ปล่อย	44
รูปที่ 4.11 Fiber Optic Transmission Windows	46
รูปที่ 4.12 ส่วนประกอบในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสง	47
รูปที่ 4.13 ส่วนเชื่อมต่อทางแสงของตัวส่ง	48
รูปที่ 4.14 วงจรขับอย่างง่ายสำหรับ LED source	50
รูปที่ 4.15 วงจรขับของเลเซอร์ไดโอดแบบอนาล็อก	50
รูปที่ 4.16 วงจรขับเลเซอร์ไดโอดแบบดิจิทัล	51
รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะของ Depletion zone	52
รูปที่ 4.18 เมื่อป้อนแรงดัน reverse bias	53
รูปที่ 4.19 โครงสร้างของ PIN photodiode	54
รูปที่ 4.20 ตั้บประสิทธิภาพการดูดกลืนทางแสง	55
รูปที่ 4.21 โครงสร้างของอะวาแลนซ์โฟโตไดโอด	56
รูปที่ 4.22 แสดงแรงดันทางไฟฟ้าที่ป้อนให้และกระแสโฟโต	57
รูปที่ 5.1 แสดงวงจรปริแอมพลิไฟร์	60
รูปที่ 5.2 แสดงวงจรมอดูเลทแบบ FM	61
รูปที่ 5.3 แสดงวงจรขับ LED ที่ใช้ในโครงการงาน	62
รูปที่ 5.4 แสดงวงจรถ่อนภาคขยาย	63
รูปที่ 5.5 วงจรขยายสัญญาณ	64
รูปที่ 5.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมของเฟสล็อกคูล	65
รูปที่ 5.7 แสดงวงจรมอดูเลทสัญญาณ FM	66
รูปที่ 5.8 แสดงวงจรถ่อนภาคขยายเสียง	67
รูปที่ 6.1 แสดงการจัดอุปกรณ์ทั้งหมด	68
รูปที่ 6.2 แสดงรูปคลื่นขณะไม่มีสัญญาณอินพุท	69
รูปที่ 6.3 แสดงลักษณะสัญญาณ FM	69
รูปที่ 6.4 แสดงสัญญาณ FM ที่ออกจาก LED	70
รูปที่ 6.5 แสดงสัญญาณ FM ที่รับจากวงจรรับ	70
รูปที่ 6.6 แสดงสัญญาณ FM ที่ถูกขยายขึ้น	71
รูปที่ 6.7 แสดงสัญญาณข้อมูลจากการใช้เฟสล็อกคูล	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.8 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณ PM และ FM

72

รูปที่ 6.9 แสดงการมอดูเลตสัญญาณในแบบ PM mode

73



## บทนำ

ในปัจจุบันนี้จากความเจริญก้าวหน้าทางเศรษฐกิจและการขยายตัวของสังคม ทำให้มีความต้องการในการแลกเปลี่ยนข่าวสารและข้อมูลเพิ่มขึ้นมากมาย และเพื่อเป็นการตอบสนองต่อความต้องการนี้ทั้งในปัจจุบันและในอนาคต ได้มีการใช้ระบบสื่อสารใหม่ขึ้นมาเรียกว่า ระบบสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง (Optical Fiber Communication System) ซึ่งสามารถส่งข่าวสารและข้อมูลต่างๆได้เป็นจำนวนมากในเวลาเดียวกัน และมีข้อดีอื่นๆอีกมากเมื่อเทียบกับระบบสื่อสารที่ใช้สายเคเบิลโลหะเป็นตัวกลาง ดังจะกล่าวถึงในตอนต่อไป

### 1.1 คุณสมบัติพิเศษต่างๆของการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง

ระบบสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงเมื่อเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารด้วยสายเคเบิลที่ทำด้วยโลหะ (Metallic cable) แล้วข้อดีต่างที่เกิดจากคุณสมบัติของเส้นใยนำแสงเอง มีดังนี้

1. ให้แบนด์วิธที่กว้างกว่า (Greater Bandwidth) การใช้คลื่นพาหะที่มีความถี่สูงในระบบสื่อสารทำให้แบนด์วิธ (Bandwidth) ของสัญญาณกว้างมากขึ้นด้วย เพราะเส้นใยนำแสง (Fiber Optic) ขึ้นกับคลื่นพาหะที่มีความถี่อยู่ในช่วง  $10^{13} - 10^{14}$  Hz เมื่อเปรียบเทียบกับความถี่วิทยุซึ่งมีความถี่  $10^6 - 10^8$  Hz แล้วจะเห็นว่าแบนด์วิธของสัญญาณกว้างขึ้นถึงประมาณ  $10^6$  เท่า
2. ขนาดเล็กและน้ำหนักเบา (Small Size and Light Weight) เส้นใยนำแสงเพียงเส้นเดียวมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ได้ในการส่งจำนวนช่องสัญญาณที่เท่ากัน
3. การสูญเสียต่ำ (Low Attenuation) เส้นใยนำแสงมีค่าการสูญเสียเนื่องจากมี Attenuation น้อยกว่าสายคู่ (Twisted Wire) หรือ โคแอกเชียลเคเบิล (Coaxial Cable)
4. ไม่ถูกรบกวนโดย EMI (Freedom From EMI) เนื่องจากเส้นใยนำแสงไม่ได้สร้างจากเส้นลวดเหมือนสายเคเบิล แต่สร้างจากแก้ว (Glass) หรือซิลิคอน (Silicon) ซึ่งเป็นฉนวน ดังนั้นจึงไม่แผ่หรือถูกรบกวนโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro-Magnetic Interference : EMI) และไม่ต้องใช้เทคนิค หรือวิธีการชิลด์ (Shield) ที่มีราคาแพงหรือยุ่งยากเพื่อป้องกันการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
5. คงทนไม่ถูกรบกวนโดยสภาพดินฟ้าอากาศ (Ruggedness) แก้วหรือซิลิคอนมีความแข็งแรงกว่าโลหะถึง 20 เท่า และซิลิคอนหรือแก้วก็เป็นธาตุเฉื่อย ดังนั้นสภาพแวดล้อมจึงมีผลน้อยกว่าแบบสายที่ทำด้วยโลหะ

6. มีความปลอดภัย (Safety) การใช้งานในระบบสายโลหะ จำเป็นจะต้องป้องกันอันตรายให้กับอุปกรณ์ และให้กับมนุษย์จากการช็อตระหว่างสาย หรือสายกับกราวด์ (Ground) แต่เมื่อใช้เส้นใยนำแสงแล้วจะไม่มีปัญหาเกี่ยวกับสิ่งเหล่านี้

7. ราคาถูกกว่า (Low Cost) ราคาของเส้นใยนำแสง ในปัจจุบันมีราคาต่ำลงเรื่อยๆ ในขณะที่ราคาของสายโลหะมีราคาเพิ่มขึ้น ในทางปฏิบัติทุกวันนี้ ราคาของการออกแบบระบบที่ใช้เส้นใยนำแสงราคาต่ำกว่าระบบแบบที่ใช้โลหะ

## 1.2 การเชื่อมต่อของเส้นใยนำแสง

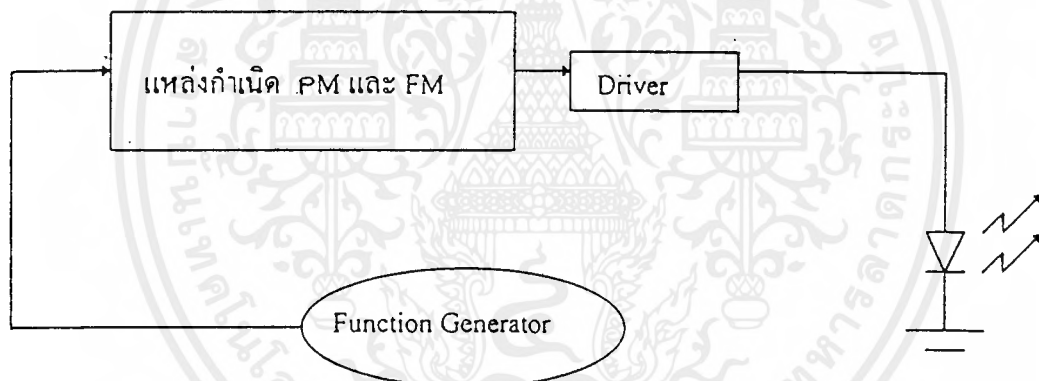
การเชื่อมต่อของเส้นใยนำแสงจะเชื่อมระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับสัญญาณที่เข้ามาอาจจะเป็นดิจิทัล หรืออนาล็อกก็ได้ ข้อมูลเหล่านี้จะนำมาทำการมอดูเลททางไฟฟ้าก่อน (Premodulated) ต่อจากนั้นจะถูกส่งไปยังแหล่งกำเนิดแสง เพื่อทำให้แสงที่ถูกขับออกมาเป็นแบบ การมอดูเลทบนความเข้มแสง (Intensity Modulation) ซึ่งตัวกำเนิดแสงที่ใช้คือ LED หรือ Laser Diode จะเกิดการสว่างมากหรือสว่างน้อย ตามระดับความแรงของสัญญาณอนาล็อก แต่ถ้าสัญญาณที่เข้ามาเป็นดิจิทัล ตัว LED หรือ Laser Diode จะสว่างหรือดับ ขึ้นอยู่กับระดับของสัญญาณทางดิจิทัล คือ “1” หรือ “0” ซึ่งก็คือ ON หรือ OFF นั่นเอง สัญญาณแสงที่ได้จากตัว LED หรือ Laser Diode จะถูกส่งผ่านเข้าไปในเส้นใยนำแสง เมื่อแสงผ่านเข้าไปในเส้นใยนำแสงแล้วจะมีการลดทอน (Attenuation) และมีการบิดเบือนไปของสัญญาณ (Dispersion) ซึ่งทำให้แบนด์วิธ (Bandwidth) หรืออัตราการส่งถูกจำกัดไปด้วย ทำให้แสงที่ออกจากจุดปลายของสายเส้นใยนำแสง แสงที่จุดปลายนี้จะพุ่งเข้าสู่ตัวรับ (Detector) ซึ่งจะเป็นตัวเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าต่อไป

### 1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

เพื่อศึกษาเรียนรู้และเข้าใจในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง (Optical Fiber Communication system) โดยใช้สัญญาณ PM และ FM เป็นสัญญาณข้อมูลที่เราต้องการส่งเข้าไปในสายเส้นใยนำแสง ซึ่งจะสร้างวงจรที่กำเนิดสัญญาณ PM และ FM ให้ระบบก่อน และศึกษาการทำงานของวงจรที่สร้างขึ้นและทั้งวงจรที่สร้างขึ้นและทั้งวงจรที่เกี่ยวกับเส้นใยนำแสง ซึ่งในโครงการพิเศษนี้จะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนใหญ่ ๆ ด้วยกัน คือ ภาคส่ง เส้นใยนำแสง และ ภาครับ ดังต่อไปนี้

#### 1.3.1 หลักการของภาคส่ง

เนื่องจากในโครงการนี้เป็นการสื่อสารโดยใช้สัญญาณอินพุตที่เป็นแบบ อนาล็อก ดังนั้นจึงใช้ LED เป็นแหล่งกำเนิดแสง เพราะว่าพลังงานแสงที่มันทำให้ออกมามีความเป็นเชิงเส้นดีกว่า Laser Diode และในการนำมาใช้งานสามารถทำได้ง่ายกว่า Laser Diode ในส่วนของวงจรภาคส่งแสดงเป็นองค์ประกอบได้ดังรูป 1.1



รูปที่ 1.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการทำงานของภาคส่ง

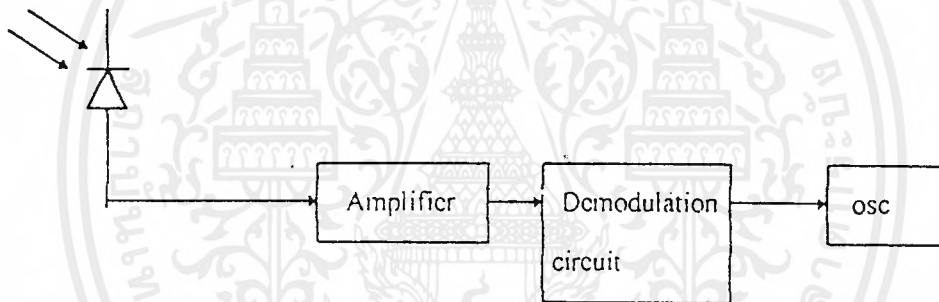
จากรูปที่ 1.1 แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมที่เป็นส่วนประกอบทางภาคส่ง ซึ่งสัญญาณความถี่ที่ให้กับแหล่งกำเนิดสัญญาณ PM และ FM นั้นจะใช้เป็นสัญญาณข้อมูลก่อนถูกมอดูเลตสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้วจะออกมาจากส่วนแหล่งกำเนิดนี้ ซึ่งจะมีความถี่เปลี่ยนแปลงไปตามแอมพลิจูดของสัญญาณความถี่ที่ใส่เข้าไปในกรณีที่เป็นสัญญาณ FM และ PM ก็เช่นเดียวกันเพียงแต่จะแตกต่างกันตรงที่เฟส จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งไปยังวงจรขับ หรือ Driver เพื่อทำการมอดูเลตสัญญาณทางไฟฟ้าเข้ากับสัญญาณแสง ทำให้ LED สว่างตามความเข้มของสัญญาณแล้วส่งแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสง

### 1.3.2 เส้นใยนำแสง

ในโครงการนี้ได้ใช้เส้นใยนำแสงแบบ Multimode ชนิด Step-Index Plastic Fiber 1 เส้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 mm ที่ปลายทั้งสองของเส้นใยนำแสงนี้จะถูกนำมาคัปปลิง (Coupling) กับ LED และ Photo Diode ทางภาครับ

### 1.3.3 หลักการของภาครับ

หน้าที่ของภาครับ คือเป็นตัวที่ทำการตรวจรับ (Detect) สัญญาณแสงที่ส่งผ่านออกมาจากเส้นใยนำแสงแล้วแปลงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า จากนั้นนำเข้าสู่วงจรแอมพลิไฟร์ขยายสัญญาณให้มีค่าแอมพลิจูดมากขึ้น จากนั้นนำเข้าสู่วงจรตีมอดูเลทสัญญาณเพื่อถอดสัญญาณข้อมูลออกมาและวงจรกรองความถี่ต่ำ สัญญาณที่ได้จะแสดงทางออสซิลโลสโคป (oscilloscope) ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของภาครับ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีการมอดูเลทเบื้องต้น

สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ใช้ในการสื่อสารทางอิเล็กทรอนิกส์คือการมอดูเลชัน การมอดูเลชัน เป็นกระบวนการของการนำสัญญาณข้อมูลที่จะส่งไปแปลงเป็นสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าความถี่เดิม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะส่งสัญญาณข้อมูลไปยังที่ใดที่หนึ่งในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยผ่านคลื่นวิทยุ โทรเลข (Wire) หรือเคเบิลเส้นใยนำแสง (Fiber optic cable) ประโยชน์ของกระบวนการมอดูเลชันที่สำคัญคือ ทำให้เกิดการย้าย

สเปกตรัมของสัญญาณขึ้นและทำให้สัญญาณข้อมูลถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวนภายนอกน้อยลง ในระบบการสื่อสารทางอิเล็กทรอนิกส์การมอดูเลชันที่นิยมใช้มีหลายแบบ เช่น FM (frequency modulation) และ PM(phase modulation) ความแตกต่างของกระบวนการมอดูเลชันทั้งสองนั้นคือกระบวนการมอดูเลชันทั้งสองนั้นกระบวนการมอดูเลชันแบบ FM นั้นเป็นการฝากข้อมูลไปกับความถี่ของคลื่นพาห้ เป็นกระบวนการทำให้ความถี่ของคลื่นพาห้เปลี่ยนแปลงไปตามความแรงของสัญญาณข้อมูล โดยยังคงรักษาขนาดของคลื่นพาห้ให้มีค่าคงที่อยู่เสมอ ส่วน PM ก็มีสัญญาณเหมือนกับ FM จะแตกต่างกันที่การเลื่อนเฟส อย่างไรก็ตามระบบมอดูเลชันสามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 2 ประเภท คือ

1. ระบบมอดูเลชันแบบอนาล็อก (analog Modulation) ระบบนี้จะให้สัญญาณที่ถูกมอดูเลท (Modulation signal) เป็นสัญญาณที่มีค่าต่อเนื่องแบบอนาล็อก เช่น เอฟเอ็ม พีเอ็ม พัลส์มอดูเลชันต่าง ๆ เป็นต้น
2. ระบบมอดูเลชันแบบดิจิทัล (digital Modulation) ระบบนี้จะให้สัญญาณที่ถูกมอดูเลทเป็นสัญญาณที่มีค่าตัวเลขลงตัวแบบดิจิทัล เช่น พีซีเอ็ม เป็นต้น

#### 2.1 หลักการมอดูเลชัน (principal Modulation)

สัญญาณข้อมูล เช่น สัญญาณเสียง สัญญาณภาพ หรือ ข้อมูลไบนารีในบางครั้งสามารถทำการส่งได้โดยตรงจากจุดหนึ่งไปยังจุดอื่น ๆ โดยอาศัยตัวกลางในการส่ง เช่น การส่งสัญญาณเสียงโดยใช้ระบบสายในโทรศัพท์ การส่งสัญญาณระหว่างจุด 2 จุดโดยใช้สายโคแอกเซียล (Coaxial Cables) อย่างไรก็ตามที่ระยะทางไกลๆการส่งสัญญาณโดยใช้สายเคเบิลไม่สามารถทำได้ กรณีนี้จะใช้การสื่อสารทางวิทยุ (radio communication) ซึ่งการสื่อสารโดยวิธีนี้จะทำให้สามารถส่งข้อมูลไปได้ในระยะทางไกลมากขึ้นซึ่งจะต้องใช้สัญญาณที่มีความถี่สูงช่วยในการส่ง แต่เนื่องจากเราไม่สามารถที่จะทำการแปลงสัญญาณข้อมูลไปเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้โดยตรง เพราะต้องใช้สาย

อากาศ(antenna) ที่มีความยาวมากและทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างสัญญาณได้ ด้วยเหตุนี้จึงต้องทำการย้ายสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าซึ่งภายในมีสัญญาณข้อมูลเดิมการมอดูเลชันอาจกล่าวได้ว่าเป็นกระบวนการของการแปลงคุณลักษณะของสัญญาณหนึ่งให้เข้ากันกับคุณลักษณะของสัญญาณอื่น ๆ โดยส่วนใหญ่สัญญาณข้อมูลเช่นสัญญาณเสียง สัญญาณภาพ ข้อมูลไบนารี หรือสัญญาณข้อมูลอื่น ๆ ตามปกติจะถูกแปลงเป็นสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าเดิม ซึ่งรู้จักกันดีว่าเป็นคลื่นพาห้(carrier) สัญญาณข้อมูลตามปกติเรียกว่า modulating signal และ สัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าซึ่งถูกมอดูเลทเรียกว่า คลื่นพาห้ (carrier)หรือ modulated wave คลื่นพาห้ตามปกติเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ ในขณะที่สัญญาณข้อมูลเป็นได้ทั้งสัญญาณอนาล็อกและสัญญาณดิจิทัล โดยส่วนใหญ่ความถี่คลื่นพาห้จะมีค่าสูงกว่าความถี่สูงสุดของสัญญาณข้อมูล

## 2.2 เฟสมอดูเลชัน (Phase Modulation)

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของสัญญาณพาห้ที่เป็นรูปไซน์ ทำให้ทราบว่าการเปลี่ยนแปลงสัญญาณพาห้ได้อีกสองวิธี คือ การเปลี่ยนแปลงความถี่ (Frequency) เรียกว่า Frequency Modulation และการเลื่อนเฟส (Phase shift) เรียกว่า Phase Modulation และจากการเลื่อนการเลื่อนเฟสของสัญญาณก็ทำให้เกิดการมอดูเลททางความถี่ได้ด้วย ทั้งสองวิธีต่างก็เป็นการมอดูเลชันทางมุม (Angle Modulation)

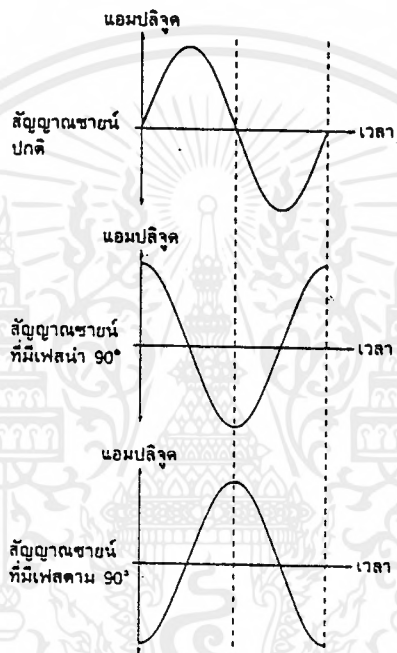
เฟสมอดูเลชัน (Phase Modulation) เป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณของการเลื่อนเฟส (Phase shift) ของความถี่ของสัญญาณพาห้ตามสัญญาณข้อมูล การเลื่อนเฟสหมายถึง เวลาที่แตกต่างกันระหว่างคลื่นไซน์สองลูกที่มีความถี่เดียวกัน คลื่นลูกหนึ่งมีเฟสนำ (Leading) หมายความว่า เป็นสัญญาณเวลาก่อนหน้าสัญญาณอีกลูกหนึ่ง หรือการที่มีเฟสตาม (Lagging) หมายความว่า เป็นสัญญาณที่เกิดขึ้นที่เวลาหลังจากสัญญาณอีกลูกหนึ่ง

การมอดูเลททางเฟสนั้น การเปลี่ยนแปลงทางเฟสของสัญญาณพาห้จะขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของสัญญาณข้อมูล ตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนแปลงทางบวกของสัญญาณข้อมูลอาจทำให้เกิดการเลื่อนเฟสตาม ส่วนสัญญาณทางลบอาจทำให้เกิดการเลื่อนเฟสแบบนำ เมื่อสัญญาณเพิ่มขึ้นทางบวก (ไม่เกี่ยวข้องกับแอมพลิจูด) ปริมาณของเฟสตามจะขึ้นพร้อมกับแอมพลิจูดของสัญญาณข้อมูล สัญญาณพาห้ก็จะถูกทำให้หน่วงเวลาไป เป็นผลทำให้สัญญาณที่ออกมาเป็นสัญญาณพาห้ที่ความถี่คงที่ ซึ่งถูกยึดออกไป หรืออาจกล่าวได้ว่าความถี่ที่ต่ำลงเมื่อสัญญาณข้อมูลลดลงทางเฟสลบ เฟสก็จะเปลี่ยนเป็นเฟสนำ ในช่วงสัญญาณนี้สัญญาณพาห้จะถูกเร่งความเร็วขึ้น นั่นคือความถี่ของพาห้จะสูงขึ้น จากปริมาณการเลื่อนเฟสมีการเปลี่ยนแปลง เป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางความถี่ของสัญญาณพาห้ เกิดเป็นมอดูเลททางอ้อม (Indirect FM) ที่ได้จากการมอดูเลททางเฟส (PM) แต่การมอดูเลททางความถี่จะเกิดขึ้น เมื่อการเลื่อนเฟสมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เท่านั้น หากไม่มีการเปลี่ยนแปลง

เอกรินทร์เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดย บริษัท อีกรินทร์ จำกัด โทร 02-2525252 โทรสาร 02-2525252 อีเมล info@agrinn.com

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกรินทร์ห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

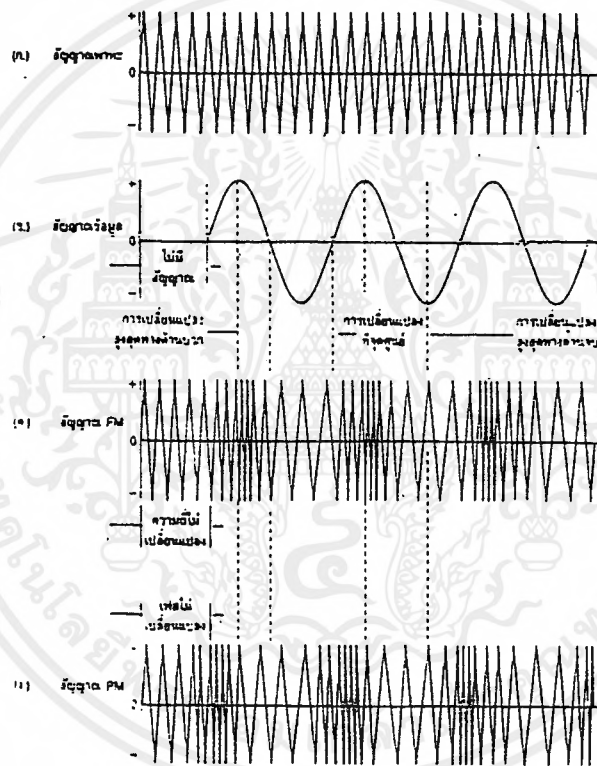
ทางเฟส การเปลี่ยนแปลงทางเฟสก็ไม่เกิดขึ้น หากพิจารณาสัญญาณข้อมูลขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มหรือลดแอมพลิจูด การเปลี่ยนแปลงความถี่ก็จะเกิดขึ้นจากตัวมอดูเลตทางเฟสหรือตัวเลื่อนเฟส และหากสัญญาณข้อมูลไม่มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด สัญญาณพาหะจะไม่มีค่าที่เปลี่ยนแปลง จะเป็นสัญญาณความถี่เดิมที่ถูกเลื่อนเฟสไปค่าหนึ่งเท่านั้น เพื่อที่จะเข้าใจถึงลักษณะของข้อมูลแบบเฟสมอดูเลชัน โดยเปรียบเทียบกับฟรีควอนซิมมอดูเลชันจะแสดงดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงสัญญาณไซน์ปกติ สัญญาณไซน์ที่มีเฟสหน้า 90 องศา และตาม 90 องศา

การมอดูเลตทางเฟสนั้น การเปลี่ยนแปลงทางเฟสของสัญญาณพาหะจะขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของมอดู ตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนแปลงทางบวกของสัญญาณข้อมูล อาจทำให้เกิดการเลื่อนเฟสตามส่วนสัญญาณทางลบอาจทำให้เกิดการเลื่อนเฟสแบบนำ เมื่อสัญญาณข้อมูลเพิ่มขึ้นทางบวก (ไม่เกี่ยวข้องกับแอมพลิจูด) ปริมาณของเฟสตามก็จะเพิ่มขึ้นพร้อมกับแอมพลิจูดของสัญญาณข้อมูล สัญญาณพาหะก็จะถูกทำให้หน่วงเวลาไป เป็นผลทำให้สัญญาณข้อมูลที่ออกมาเป็นสัญญาณพาหะที่ความถี่คงที่ซึ่งถูกยัดออกไป หรืออาจกล่าวได้ว่าความถี่ต่ำลงเมื่อสัญญาณข้อมูลลดลงทางเฟสลบ เฟสก็จะเปลี่ยนเป็นเฟสนำในช่วงสัญญาณนี้สัญญาณพาหะจะถูกเร่งความเร็วขึ้น นั่นคือ ความถี่ของพาหะก็จะสูงขึ้นจากปริมาณการเลื่อนเฟสมีการเปลี่ยนแปลง เป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางความถี่ของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

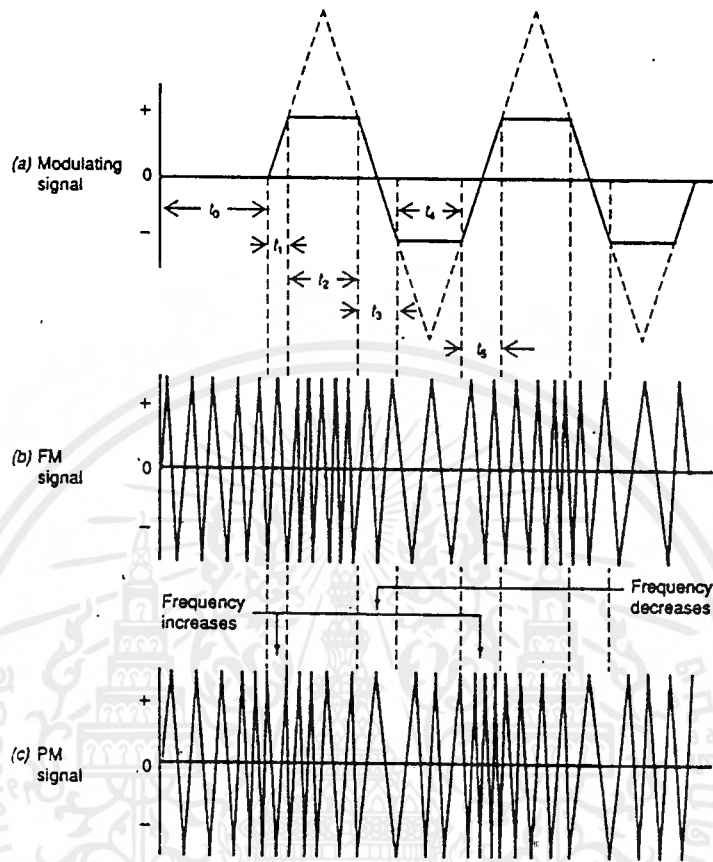
สัญญาณพาหะ เกิดเป็นมอดูเลตทางความถี่โดยอ้อม (Indirect FM) ที่ได้จากการมอดูเลตทางเฟส (PM) แต่การมอดูเลตทางความถี่จะเกิดขึ้นเมื่อการเลื่อนเฟสมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เท่านั้น หากไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเฟสการเปลี่ยนแปลงความถี่ก็จะไม่เกิดขึ้น หากพิจารณาสัญญาณข้อมูลขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มหรือลดแอมพลิจูด การเปลี่ยนแปลงความถี่ก็จะเกิดขึ้นจากตัวมอดูเลตทางเฟสหรือตัวเลื่อนเฟสและหากสัญญาณข้อมูลไม่มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด สัญญาณพาหะจะไม่มี ความถี่เปลี่ยนแปลง จะเป็นสัญญาณความถี่เดิมที่ถูกเลื่อนเฟสไปค่าหนึ่งเท่านั้น เพื่อที่จะเข้าใจถึงลักษณะของสัญญาณข้อมูลแบบเฟสมอดูเลชัน โดยเปรียบเทียบกับฟรีควีนซ์มอดูเลชันจะแสดงดังรูป 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงสัญญาณพาหะ สัญญาณข้อมูลและสัญญาณ FM และ PM

กล่าวคือใน FM การเปลี่ยนแปลงที่มากที่สุด จะปรากฏที่ amplitude ที่มากที่สุดด้านบวกและด้านลบของสัญญาณมอดูเลต ใน PM ค่าที่มากที่สุดจะอยู่ที่จุดตัดกับแกนเวลา คือ จะขึ้นอยู่กับการเพิ่มของอัตราการเปลี่ยนแปลงสัญญาณมอดูเลต ความเร็วที่มากขึ้นของการเปลี่ยนแปลงค่า voltage ของสัญญาณมอดูเลต ความเยื้องเบนความถี่ที่สร้างจึงมีค่ามากขึ้น ค่าของ modulating voltage ที่สูงขึ้นจะสร้าง phase shift ที่มีค่ามากขึ้น ปรากฏว่าเป็นการสร้างการเยื้องเบนความถี่มีค่ามากอีกด้วย ดังรูปที่ 3 จะอธิบายถึงลักษณะของการเยื้องเบน PM และ FM ดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงการเลื่อนเฟสของ PM ที่แอมพลิจูดและความถี่คงที่

จะสมมติสัญญาณมอดูเลตที่แสดงดังรูป คลื่นรูปสามเหลี่ยมที่มากที่สุดทางด้านบวกและลบ ถูกขลิบออกที่ Amplitude ค่าหนึ่ง ระหว่างช่วง  $t_0$  สัญญาณมีค่าเป็นศูนย์ดังรูป 3a ความถี่ที่ปรากฏจะเป็นค่าของความถี่กลาง สัญญาณมอดูเลตที่สร้างจะเป็น Frequency Modulator จะผลิตสัญญาณดังรูป 3b

ระหว่างเวลาที่รูปคลื่นกำลังสูงขึ้น ( $t_1$ ) ความถี่จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ช่วงเวลาที่แอมพลิจูดบวกคงที่( $t_2$ ) สัญญาณ FM ที่ออกมาก็จะคงที่ โดยจะมีค่าความถี่มากที่สุด ระหว่างเวลาที่แอมพลิจูดลดลงและเข้าสู่ช่วงลบ ( $t_3$ ) ความถี่ของสัญญาณ FM ก็จะลดลง เมื่อลดลงจนแอมพลิจูดช่วงลบคงที่( $t_4$ ) ความถี่ของสัญญาณก็จะคงที่ มีค่าความถี่น้อยที่สุด ช่วง  $t_5$  ความถี่จะมีค่าเพิ่มขึ้น

ส่วนสัญญาณมอดูเลตที่สร้างเป็น phase shifter ดังรูป 3c ความถี่ของสัญญาณ PM จะเปลี่ยนแปลงตามค่าแอมพลิจูดที่เพิ่มขึ้นและลดลง (ช่วงเวลาระหว่าง  $t_1, t_3$  และ  $t_5$ ) และช่วงที่แอมพลิจูดด้าน

เอกราชบัณฑิตยสถาน  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บวกและลบคงที่ สัญญาณที่ได้จะไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงนี้ ( $t_2$  และ  $t_4$ ) อัตราที่มากที่สุดของการเปลี่ยนแปลงของ Modulating voltage จะชัดเจนที่เส้นสัญญาณที่ผ่านจุดศูนย์ ในทางตรงกันข้าม FM มีการเปลี่ยนแปลงความถี่มากที่สุดที่แอมพลิจูดที่จุดสูงสุดของบวกและลบ แม้ว่า phase modulator จะผลิต FM ขึ้นจริง การเบี่ยงเบนที่มากที่สุดจะเกิดขึ้นที่ความแตกต่างของจุดสัญญาณ modulating

ใน PM พาหะที่มีความถี่เบี่ยงเบนจะเป็นสัดส่วนระหว่าง modulating frequency และ amplitude ทั้งคู่ ส่วนใน FM ความถี่เบี่ยงเบนจะเป็นสัดส่วนระหว่าง modulating amplitude เท่านั้น

จากการมอดูเลชันทางเฟสค่าเบี่ยงเบนความถี่มากที่สุดจะปรากฏในช่วงที่สัญญาณข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงในอัตราสูงสุด เช่น จุดที่สัญญาณข้อมูลรูปไซน์มีการเปลี่ยนค่าความต่างศักย์จากบวกไปลบ หรือจากลบไปบวก หรือจุดที่สัญญาณตัดกับแกนเวลาและมีค่าความต่างศักย์เป็นศูนย์นั่นเอง แต่สำหรับการมอดูเลชันทางความถี่ ค่าเบี่ยงเบนความถี่ที่มากที่สุดจะเกิดในช่วงที่แอมพลิจูดของสัญญาณข้อมูลมีค่าสูงสุดทั้งทางบวกและลบ ถึงแม้ว่าตัวมอดูเลชันทางเฟสจะสร้างสัญญาณแบบมอดูเลชันทางความถี่ (FM) แต่ค่าความเบี่ยงเบนจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้น นั่นคือความแตกต่างของการมอดูเลชันทั้งสองแบบ

ในการมอดูเลชันทางเฟส (PM) ค่าของเฟสนำและเฟสตามที่มากที่สุดจะปรากฏที่แอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณข้อมูล และค่าเบี่ยงเบนความถี่สัญญาณขาออกของวงจรเลื่อนเฟสจะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณข้อมูล ยิ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลมีค่าสูงมาก ค่าเบี่ยงเบนความถี่จะยิ่งมาก ทำให้สรุปได้ว่า ในการมอดูเลชันทางเฟส (PM) ในการเบี่ยงเบนความถี่ของสัญญาณพาหะจะขึ้นอยู่กับปัจจัยสองอย่าง คือ ความถี่และแอมพลิจูดของสัญญาณข้อมูล ในขณะที่การมอดูเลชันทางความถี่ (FM) จะมีค่าเบี่ยงเบนความถี่ขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของสัญญาณข้อมูลเพียงอย่างเดียวจะมีค่าเบี่ยงเบนความถี่ขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของสัญญาณข้อมูลเพียงอย่างเดียว

### 2.3 หลักการมอดูเลชันแบบ FM (Frequency Modulation)

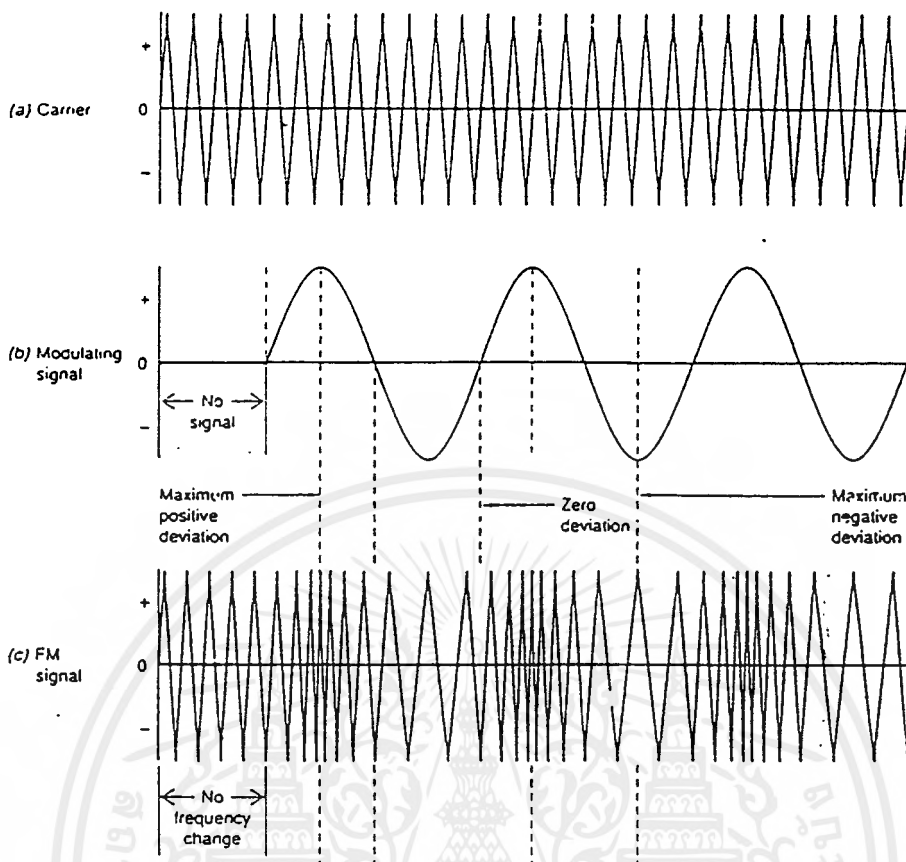
การมอดูเลชันสัญญาณแบบ FM แอมพลิจูดของคลื่นพาหะ (carrier) จะคงที่ โดยที่ความถี่ของคลื่นพาหะจะเปลี่ยนแปลงโดยสัญญาณข้อมูล ซึ่งแอมพลิจูดของสัญญาณข้อมูลเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นพาหะก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วน โดยหากสัญญาณข้อมูลมีแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นความถี่ของคลื่นพาหะจะเพิ่มขึ้น ถ้าแอมพลิจูดของสัญญาณข้อมูลลดลงความถี่ของคลื่นพาหะจะลดลง โดยในทางกลับกันความถี่ที่เพิ่มขึ้นอาจได้มาจากทางปฏิบัติ หากสัญญาณข้อมูลลดลงจะทำให้ขนาดของคลื่นพาหะเพิ่มมากกว่าระยะเดิม ของความถี่ที่เป็นตัวอ้างอิง และถ้าสัญญาณข้อมูลเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดของคลื่นพาหะลดระยะจากเดิมลงมา สัญญาณข้อมูลมีแอมพลิจูดเปลี่ยนและความถี่ของคลื่น

พาห์เปลี่ยนไปทั้งมากและน้อยกว่าความถี่ปกติ ก่อนการมอดูเลชันจำนวนของความถี่ที่เปลี่ยนไปจะเปลี่ยนโดยสัญญาณข้อมูล โดยเรียกว่า การเบี่ยงเบนความถี่(Frequency deviation) การเปลี่ยนแปลงความถี่จะมากที่สุดเมื่อขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณข้อมูลมีมากที่สุด

ความถี่ของสัญญาณข้อมูลสามารถดูได้จากจำนวนครั้งต่อหนึ่งวินาทีของความถี่ของคลื่นพาห์ที่เปลี่ยนแปลงไปทั้งมากกว่าและน้อยกว่าความถี่ก่อนการมอดูเลท (modulation) ถ้าสัญญาณข้อมูลมีความถี่ 100Hz แล้วนั้นความถี่ของคลื่นพาห์จะมีการกระเพื่อมทั้งมากกว่าและน้อยกว่าทั้งหมด 100 ครั้งต่อวินาที สิ่งเหล่านี้เรียกว่า อัตราการเบี่ยงเบนความถี่ (Frequency deviation rate)

สัญญาณ FM จะแสดงได้ตามรูปที่ 2.4c ความถี่ปกติของคลื่นพาห์คือรูป 2.4a เป็นรูปคลื่นแบบไซน์ แต่ตามรูปเป็นแบบสามเหลี่ยมเพื่อง่ายต่อการแบ่งแยกสัญญาณ ถ้าหากไม่มีสัญญาณข้อมูลเข้าไปความถี่ของคลื่นพาห์จะคงที่ตลอดเวลา สัญญาณข้อมูลแสดงตามรูป 2.4b เป็นคลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่ต่ำกว่า ซึ่งถ้าคลื่นรูปไซน์มาทางด้านบวก ความถี่ของคลื่นพาห์จะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วน เมื่อมาถึงจุดที่สัญญาณข้อมูลมีแอมพลิจูดสูงสุดความถี่จะเป็นความถี่ที่สูงที่สุด และถ้าสัญญาณข้อมูลลดลงความถี่ของคลื่นพาห์จะลดลงตาม เมื่อมาถึงจุดที่สัญญาณข้อมูลเป็นศูนย์ความถี่ของคลื่นพาห์จะมีค่าเท่ากับความถี่ของคลื่นพาห์ก่อนทำการมอดูเลชัน

เมื่อสัญญาณลงมาทางด้านลบ ความถี่ของคลื่นพาห์จะลดลงและจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมาถึงจุดพีคของรอบทางด้านลบ สัญญาณข้อมูลจะเพิ่มมาถึงจุดศูนย์ ความถี่จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งดูจากรูป 2.4c คลื่นพาห์จะมีการหดตัวและคลายตัวได้โดยสัญญาณข้อมูล ถ้ากำหนดคลื่นพาห์มีความถี่ 50 MHz ถ้าพีคแอมพลิจูดของสัญญาณข้อมูลทำให้มีความถี่สูงสุด 200 KHz คลื่นพาห์จะมีความถี่เปลี่ยนทางขึ้นเป็น 50.2 MHz และลดลง 49.8 MHz ผลรวมของการเปลี่ยนแปลงความถี่ 0.4 MHz คือ 400 Hz ดังนั้นความถี่ที่เปลี่ยนแปลงจะเป็นจำนวนการเลื่อนไปของคลื่นพาห์มากกว่าและน้อยกว่าความถี่คงที่ (constant frequency) ดังนั้นเรียกได้ว่าการเปลี่ยนแปลง  $\pm 200$  Hz ซึ่งหมายความว่าสัญญาณข้อมูลเปลี่ยนแปลงสัญญาณคลื่นพาห์ทั้งทางบวกและทางลบจากความถี่คงที่ โดย 200 KHz ความถี่ของสัญญาณข้อมูลหาได้จากอัตราการเบี่ยงเบนนี้ แต่ที่มีเหตุการณ์ของจำนวนการเปลี่ยนแปลงซึ่งต้องเข้มงวดกับแอมพลิจูดของสัญญาณข้อมูลด้วย



รูปที่ 2.4 การมอดูเลชันแบบ FM

2.4 มอดูเลชันอินเด็กซ์และเปอร์เซ็นต์การมอดูเลทของสัญญาณ FM

อัตราส่วนของการเบี่ยงเบนความถี่ (frequency deviation) ต่อความถี่สัญญาณข้อมูล (frequency modulating) เรียกว่า modulation index m

$$m = f_d / f_m \dots\dots\dots (12)$$

โดยที่  $f_d$  คือ ค่าเบี่ยงเบนความถี่ (frequency deviation)

$f_m$  คือ ความถี่สัญญาณข้อมูล (modulating frequency)

โดยที่ถ้าค่าเบี่ยงเบนความถี่สูงสุดและค่าความถี่สัญญาณข้อมูลสูงสุดใช้ในการหาดัชนีการมอดูเลชัน หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อัตราส่วนค่าเบี่ยงเบน (deviation ratio)

แบนด์วิธของสัญญาณ FM ขึ้นอยู่กับดัชนีการมอดูเลท ถ้าดัชนีการมอดูเลทสูงแบนด์วิธของสัญญาณ FM ก็จะมีค่ากว้าง แบนด์วิธทั้งหมดของสัญญาณสามารถคำนวณหาได้ถ้าเราทราบค่าดัชนีการมอดูเลท และรวมถึงตารางด้านล่างโดยคำนวณ ได้จากสมการ

$$BW = 2Nf_{max} \dots\dots\dots 13$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ N เป็นจำนวนไซน์แบนด์

Modulation Index	Sidebands (Pairs)																
	Carrier	1st	2d	3d	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th	11th	12th	13th	14th	15th	16th
0.00	1.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.25	0.98	0.42	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.5	0.94	0.24	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.0	0.77	0.44	0.11	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.5	0.51	0.56	0.23	0.06	0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.0	0.22	0.58	0.35	0.13	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.5	0.05	0.50	0.45	0.22	0.07	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3.0	0.26	0.34	0.49	0.31	0.13	0.04	0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4.0	0.40	0.07	0.36	0.43	0.28	0.13	0.05	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5.0	0.18	0.33	0.05	0.36	0.39	0.26	0.13	0.05	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—
6.0	0.15	0.28	0.24	0.11	0.36	0.36	0.25	0.13	0.06	0.02	—	—	—	—	—	—	—
7.0	0.30	0.00	0.30	0.17	0.16	0.35	0.34	0.23	0.13	0.06	0.02	—	—	—	—	—	—
8.0	0.17	0.23	0.11	0.29	0.10	0.19	0.34	0.32	0.22	0.13	0.06	0.03	—	—	—	—	—
9.0	0.09	0.24	0.14	0.18	0.27	0.06	0.20	0.33	0.30	0.21	0.12	0.06	0.03	0.01	—	—	—
10.0	0.25	0.04	0.25	0.06	0.22	0.23	0.01	0.22	0.31	0.29	0.20	0.12	0.06	0.03	0.01	—	—
12.0	0.05	0.22	0.08	0.20	0.18	0.07	0.24	0.17	0.05	0.23	0.30	0.27	0.20	0.12	0.07	0.03	0.01
15.0	0.01	0.21	0.04	0.19	0.12	0.13	0.21	0.03	0.17	0.22	0.09	0.10	0.24	0.28	0.25	0.18	0.12

## ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าไซน์แบนด์และดัชนีการมอดูเลตที่ใช้ในสมการ

เปอร์เซ็นต์การมอดูเลตของสัญญาณ FM ขึ้นอยู่กับค่าเบี่ยงเบนความถี่ที่เพิ่มหรือลดตามขนาดของแอมพลิจูดของสัญญาณข้อมูล ซึ่งเป็นไปตามสมการ

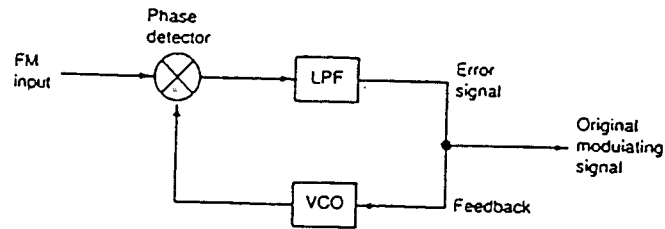
$$\text{เปอร์เซ็นต์การมอดูเลต} = \frac{\text{ค่าเบี่ยงเบนความถี่คลื่นพาห้จริง} * 100}{\text{ค่าเบี่ยงเบนความถี่คลื่นพาห้สูงสุด}}$$

## 2.5 การดีมอดูเลชันสัญญาณ FM ( Frequency demodulation )

วิธีที่ดีที่สุดสำหรับการดีมอดูเลชันสัญญาณ FM คือ phase - locked loop ( PLL ) คือวงจรที่มีการควบคุมของความถี่หรือเฟส ซึ่งไม่ได้ใช้กับการดีมอดูเลชันสัญญาณเข้ามาร่วมในการทำงานของการดีมอดูเลชันสัญญาณด้วย

### 2.5.1 Phase - locked loop ( PLL )

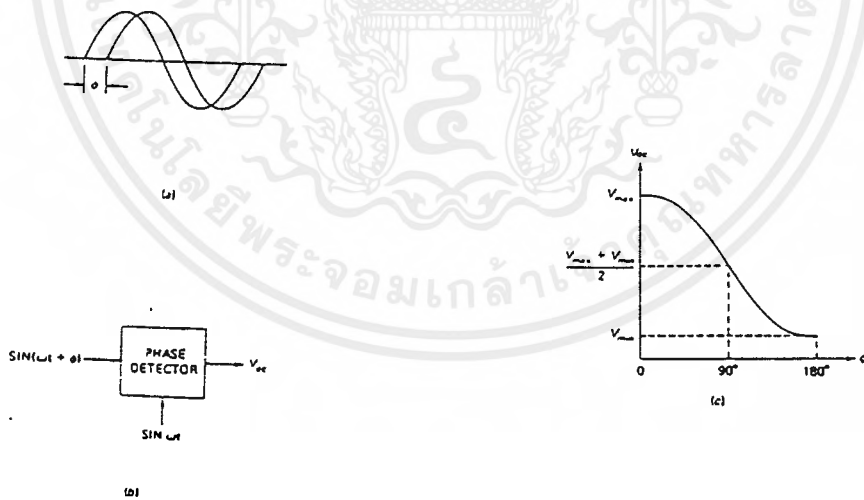
PLL ทั้งหมดจะประกอบด้วยอุปกรณ์พื้นฐานดังแสดงในรูป 2.5 คือมี phase detector หรือ mixer ใช้ในการเปรียบเทียบสัญญาณอินพุท หรือสัญญาณที่อ้างถึงจากเอาต์พุทที่ออกมาจาก voltage - controlled oscillator ( VCO ) โดย VCO จะมีความถี่ที่แปรผันกับค่าของแรงดันไฟตรงจากวงจรรองความถี่ต่ำ โดยที่จะอาศัยเอาต์พุทของ phase detector มาทำให้เกิดแรงดันไฟตรงจากวงจรรองความถี่ต่ำโดยแต่ละส่วนทำงานดังนี้



รูปที่ 2.5 พื้นฐานของ PLL

## 1). เฟสดีเทคเตอร์ (Phase Detector)

สมมติว่าเรามีมิกเซอร์ (mixer) ที่มีความถี่เข้าที่ 50 และ 50 KHz ดังนั้นความแตกต่างของความถี่เท่ากับศูนย์ ซึ่งเราแสดงโดยแรงดันไฟตรง ( dc voltage ) โดยค่าแรงดันไฟตรงจะออกมาต่อเมื่อความถี่เข้ามีการเปรียบเทียบ เฟสดีเทคเตอร์เป็นอุปกรณ์สำหรับเปรียบเทียบความถี่ที่เท่ากัน เนื่องจากจำนวนของแรงดันไฟตรงขึ้นอยู่กับสถานะของมุม  $\phi$  ระหว่างสัญญาณอินพุตทั้งสองโดยเฟสที่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นแรงดันไฟตรงก็มีการเปลี่ยนแปลงด้วย



รูปที่ 2.6 อินพุตและเอาต์พุตของเฟสดีเทคเตอร์

ในรูป 2.6a แสดงถึงสถานะของมุมระหว่างคลื่นไซน์ (sinusoidal signals) ทั้งสอง เมื่อสัญญาณนี้ผ่านเข้าไปในเฟสดีเทคเตอร์ ตามรูปที่ 2.6b จะได้แรงดันไฟตรงออกมาที่เอาต์พุตเป็นรูปเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบหนึ่งของเฟสดีเทคเตอร์ซึ่งมีแรงดันไฟตรงเป็นแรงดันเอาต์พุตซึ่งเปลี่ยนแปลงตามรูป 2.6c ถ้าความต่างมุม (phase angle) มีค่าเท่ากับศูนย์ แรงดันไฟตรงจะมากที่สุด และถ้าความแตกต่าง phase angle มีค่ามากขึ้นจาก  $0-180^\circ$  องศา ค่าของแรงดันไฟตรงจะลดลงจนถึงค่าต่ำที่สุด เมื่อค่าของ phase angle ( $\Phi$ ) เป็น  $90^\circ$  องศา ค่าของแรงดันเอาต์พุตจะเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างค่าที่น้อยที่สุดและค่าที่มากที่สุด ถ้าสมมติว่าเฟสดีเทคเตอร์มีเอาต์พุตสูง 10 โวลต์ และค่าแรงดันไฟตรงเอาต์พุตน้อยสุดเท่ากับ 5 โวลต์ เมื่อมีสองสัญญาณที่มีเฟสตรงกัน แรงดันเอาต์พุตของเฟสดีเทคเตอร์จะมีค่าเท่ากับ 10 โวลต์ ถ้าสองสัญญาณมีเฟสต่างกัน  $90^\circ$  องศา แรงดันไฟตรงจะมีค่าเท่ากับ 7.5 โวลต์ เมื่อสองสัญญาณอินพุตมีความต่างเฟส  $180^\circ$  องศา แรงดันไฟตรงเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 5 โวลต์ ค่าตอบของข้อมูลนี้คือแรงดันเอาต์พุตจะลดลงเมื่อความต่างเฟสเพิ่มขึ้น

## 2). VCO (voltage-controlled-oscillator)

ความสำคัญเกี่ยวกับ VCO ที่น่าจะจำไว้คือ ค่าแรงดันไฟตรงอินพุตจะควบคุมให้เกิดความถี่เอาต์พุตออกมา ในการทดลองนี้ ถ้าเพิ่มแรงดันไฟตรงที่ควบคุมจะเป็นผลทำให้ความถี่เอาต์พุตของ VCO ลดลง ถ้าแรงดันไฟตรงในรูป 2.7a เพิ่มขึ้น ความถี่ของเอาต์พุตลดลง โดยที่แรงดันไฟตรงที่ควบคุมการกำเนิดความถี่ ตามปกติความถี่จะลดลงเป็นเชิงเส้นกับแรงดันไฟตรงที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.7b



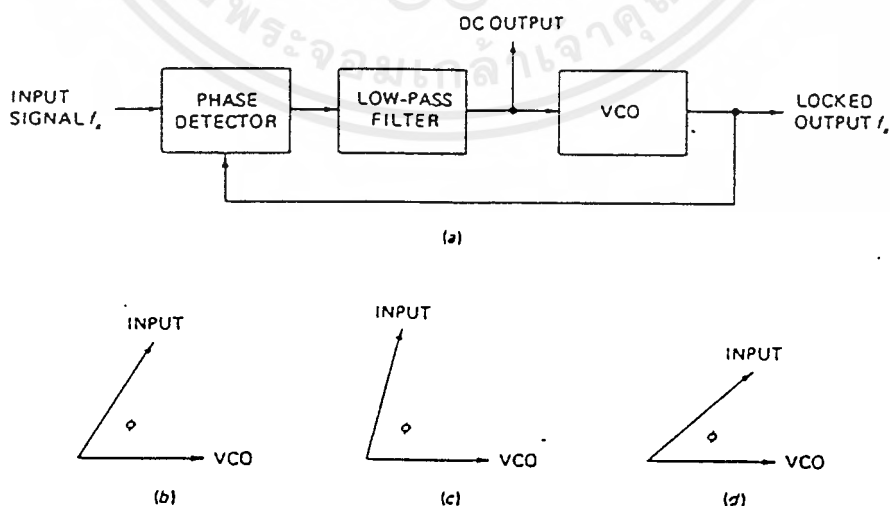
รูปที่ 2.7 ลักษณะของ VCO

### 3). การทำงานของ phase-locked loop (PLL)

ตามรูปที่ 2.8 เป็นบล็อกไดอะแกรมของเฟสล็อกคิคลูป phase-locked loop (PLL) สัญญาณอินพุตซึ่งมีความถี่  $f_x$  เป็นหนึ่งของอินพุตที่เข้าเฟสดีเทคเตอร์ (phase detector) ขาอินพุตอีกอันหนึ่งมาจาก VCO เอาท์พุทของเฟสดีเทคเตอร์จะถูกกรองโดยวงจรกรองความถี่ต่ำ (low pass filter) แล้วทำการเปรียบเทียบความถี่ทั้งสอง ความถี่ที่แตกต่างกันเท่านั้นจึงจะเกิดเป็นแรงดันไฟตรงผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำออกมา แรงดันไฟตรงนี้จะถูกนำไปควบคุมความถี่ของ VCO

ระบบป้อนกลับ (feedback system) จะทำการนำความถี่ไปเป็นอินพุตอีกครั้งหนึ่ง เมื่อระบบทำงานถูกต้อง ความถี่ของ VCO จะเท่ากับ  $f_x$  เหมือนกับสัญญาณทางอินพุต ดังนั้นเฟสดีเทคเตอร์จะมีสัญญาณอินพุตเป็น 2 อินพุต ซึ่งมีความถี่เท่ากัน ความต่างเฟสระหว่างสองอินพุตนั้นจะทำให้มีจำนวนแรงดันไฟตรงเอาท์พุท (dc output) ตามรูปที่ 2.8b ซึ่งแสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมสำหรับสัญญาณขาเข้าและจาก VCO

ถ้าความถี่อินพุตเปลี่ยนแปลงแล้วที่ VCO ความถี่จะเปลี่ยนแปลงตามด้วย เช่นถ้าความถี่อินพุต  $f_x$  เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เฟสเซอร์จะหมุนและเกิดความต่างเฟสมากขึ้น ดังแสดงในรูป 2.8c ซึ่งหมายความว่า จะมีแรงดันไฟตรงเอาท์พุทจากเฟสดีเทคเตอร์น้อยลง ค่าแรงดันไฟตรงที่น้อยลงนี้จะมีผลต่อ VCO ทำให้ความถี่เพิ่มมากขึ้นจนเท่ากับ  $f_x$  หรืออีกทางหนึ่ง ถ้าความถี่อินพุตลดลงเฟสเซอร์ (phaser) จะหมุนต่ำลงและความแตกต่างของเฟสจะลดลงด้วย แสดงดังรูป 2.8d ซึ่งตอนนี้ค่าแรงดันไฟตรงจะมากขึ้น เป็นผลทำให้ความถี่จาก VCO ลดลงจนกระทั่งเท่ากับความถี่อินพุต  $f_x$  โดยจะทำงานอย่างอัตโนมัติขึ้นอยู่กับความถี่ของ VCO กับความแตกต่างของเฟสเซอร์นั้น



รูปที่ 2.8 เฟสล็อกคิคลูปและการเพิ่มและลดของเฟสเซอร์ของสัญญาณอินพุต

ช่วงการล็อก (lock range) เป็นช่วงของความถี่ VCO สามารถสร้างขึ้นให้เท่ากับความถี่ที่เข้ามาเปรียบเทียบ โดยกำหนดว่า

$$B_L = f_{\max} - f_{\min}$$

เมื่อ  $f_{\max}$  และ  $f_{\min}$  เป็นความถี่สูงสุด และความถี่ต่ำสุดของ VCO

ถ้ากำหนดว่าขาหนึ่งจะเป็นขาที่ต่อเข้ากับความถี่ของ VCO เฟสดีเทคเตอร์จะเปรียบเทียบความถี่ค่า free-running frequency และความถี่จากภายนอกและให้แรงดันไฟตรงออกมาเป็นสัดส่วนตามความแตกต่างของสัญญาณ ซึ่งเป็นผลทำให้ค่าแรงดันไฟตรงนี้ใส่เข้าไปใน VCO แรงดันไฟตรงนี้จะมีผลต่อความถี่ของ VCO เมื่อค่าแรงดันไฟตรงลดลง โดยถ้าลดจำนวนค่าแรงดันไฟตรง (error voltage) ของความแตกต่างของเฟสหรือความถี่ระหว่างอินพุทกับ VCO ในที่สุดความถี่จะเท่ากับอินพุท เมื่อเกิดเหตุการณ์เช่นนี้ เรียกว่า locked ถึงแม้ว่า อินพุทและ VCO จะเท่ากันก็ยังคงมีความแตกต่างของเฟส (phase difference) ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันไฟตรง โดยเป็นผลมาจาก VCO ผลิตความถี่ออกมา

#### 4). Free-running Mode

ถ้ากำหนดว่าความถี่เริ่มต้นที่เข้ามาเป็นอินพุทไม่ถูกป้อนให้แก่เฟสดีเทคเตอร์ ความแตกต่างของเฟสของในกรณีนี้เอาท์พุทของดีเทคเตอร์ (detector) จะเป็นศูนย์ VCO ในกรณีนี้เรียกว่า Free-running frequency ซึ่งตามปกติแล้วความถี่ของ VCO นี้จะสามารถหาได้จากวงจรสวนประกอบของ VCO เอง

เนื่องจากเฟสล็อกคูลูป (PLL) นี้สามารถเปลี่ยนแปลงตามความถี่ที่เข้ามาเป็นอินพุท ดังนั้นจึงนำมาใช้กับการคิโมอดคูเลทของสัญญาณเอฟเอ็ม (FM signal) ถ้าใส่สัญญาณเอฟเอ็มเป็นอินพุท ความถี่ที่ออกมาจากเอาท์พุทของ VCO นี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณเอฟเอ็มที่เข้ามาทางอินพุท หรือเป็นสัญญาณเอฟเอ็มเหมือนกับอินพุทของดีเทคเตอร์ โดยส่วนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่นี้ สัญญาณอินพุทที่เข้ามาใน VCO จะต้องเป็นความถี่ที่เป็นสัญญาณข้อมูลก่อนทำการมอดคูเลท ดังนั้นจึงนำเอาเฟสล็อกคูลูป (PLL) มาเป็นคิโมอดคูเลท (Demodulate) สัญญาณเอฟเอ็ม

การคิโมอดคูเลทสัญญาณ FM มีอีกหลายวิธีนอกจากวิธีเฟสล็อกคูลูปซึ่งมีทั้งแบบวงจรรแยกพัลส์เฉลี่ย (pulse-averaging discrimination) วงจรรควอดเครเจอร์ดีเทคชัน (Quadrature detection) วงจรรแยกของฟรอสเตอร์ซีลีย์ (Fostert-Seely discrimination) และเรดิโอดีเทคเตอร์ (radio-detector)

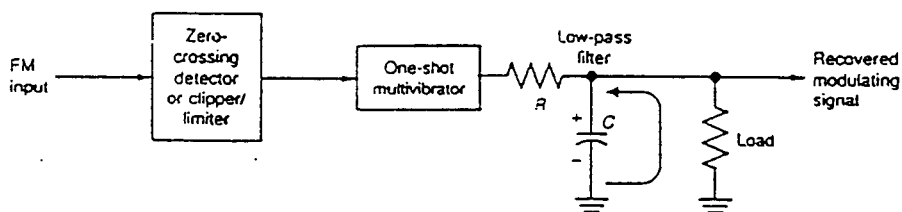
### 2.8.2 วงจรแยกพัลส์เฉลี่ย (pulse-averaging discrimination)

โดยบล็อกไดอะแกรมของวงจรแยกพัลส์เฉลี่ย (pulse-averaging discrimination) แสดงดังรูป 2.17 สัญญาณ FM จะถูกป้อนเข้าไปใน zero-crossing detector หรือวงจรคลิปปอร์/ลิมิตเตอร์ ซึ่งจะสร้างระดับแรงดันไบนารี ในแต่ละครั้งที่ระดับแรงดันเปลี่ยนสัญญาณ FM จะเปลี่ยนจากลบไปบวกหรือจากบวกไปลบ ผลก็คือได้คลื่นรูปสามเหลี่ยมที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณอินพุตแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูด

สัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมของ FM จะถูกป้อนเข้าไปยัง one-shot multivibrator ซึ่งจะสร้างแอมพลิจูดของสัญญาณให้คงที่ ความกว้างของพัลส์ dc จะกำหนดด้วยขอบเริ่มต้นของแต่ละรอบสัญญาณ FM ต่อจากนั้นพัลส์เอทพุทจะถูกเลี้ยงไปยังวงจรรองความถี่ต่ำ RC ซึ่งจะเฉลี่ยพัลส์ dc จนกระทั่งได้สัญญาณข้อมูลเดิมกลับคืน

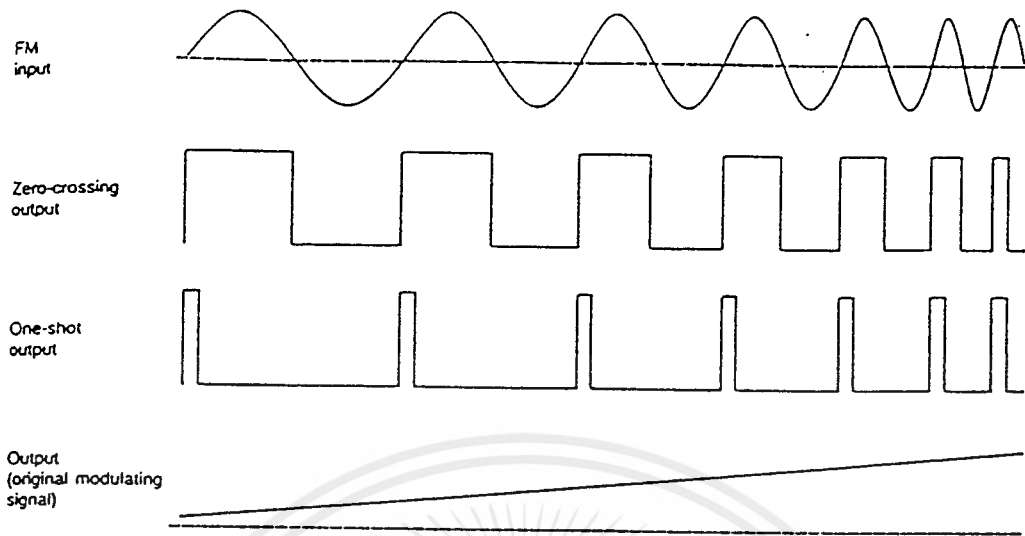
สัญญาณคลื่นของวงจรแยกแยะพัลส์เฉลี่ยแสดงดังรูป 2.9 โดยที่ความถี่ต่ำช่วงของพัลส์จะกว้างและเมื่อความถี่สูงขึ้นช่วงของพัลส์จะแคบลง เมื่อพัลส์เหล่านี้ผ่านเข้าไปในฟิลเตอร์จะทำให้ได้แรงดันเอทพุท dc ที่ดีขึ้น แอมพลิจูดของแรงดัน dc นี้จะเป็นสัดส่วนกับค่าเบี่ยงเบนความถี่ ขณะที่พัลส์เกิดขึ้นพัลส์หนึ่ง ตัวเก็บประจุในฟิลเตอร์จะชาร์จแอมพลิจูดของพัลส์นั้น เมื่อไม่มีพัลส์ตัวเก็บประจุจะดิสชาร์จเข้าไปในโหลด ถ้า RC time constant มีค่าสูง ประจุบนตัวเก็บประจุจะไม่ลดลงมาก อย่างไรก็ตามถ้าเวลาระหว่างพัลส์มีมากตัวเก็บประจุจะสูญเสียประจุบางส่วนเข้าไปยังโหลด ดังนั้นแรงดันเอทพุท dc เฉลี่ยจะมีค่าต่ำ เมื่อมีพัลส์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วตัวเก็บประจุจะมีเวลาน้อยในอันที่จะดิสชาร์จระหว่างพัลส์

ดังนั้นแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อมจะมีค่าสูงกว่าแรงดันเอทพุทของฟิลเตอร์จะเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดตามค่าเบี่ยงเบนความถี่ ซึ่งสังเกตได้จากรูป 2.10 แรงดันที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบเชิงเส้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น สัญญาณข้อมูลเดิมจะข้ามผ่านที่เอทพุทของฟิลเตอร์ ส่วนประกอบของฟิลเตอร์จะถูกเลือกให้มีค่าริปเปิลน้อยซึ่งมีสาเหตุมาจากการชาร์จและดิสชาร์จของตัวเก็บประจุ ในขณะเดียวกันก็จะให้การตอบสนองของความถี่สูงแก่สัญญาณข้อมูลเดิม



รูปที่ 2.9 วงจรดีมอดูเลทสัญญาณ FM แบบการแยกพัลส์เฉลี่ย  
(pulse-averaging discrimination)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

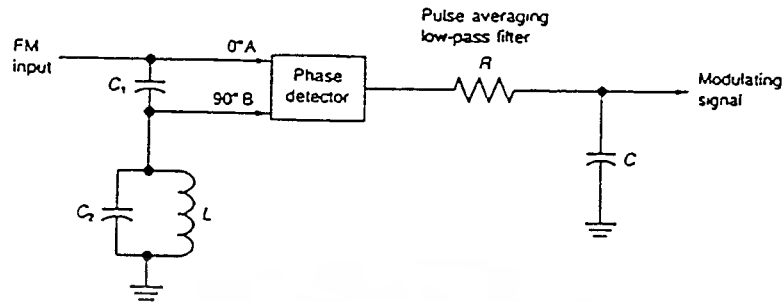


รูปที่ 2.10 รูปคลื่นจากวงจร pulse-averaging discrimination

### 2.8.3 ควอดเรเจอร์ทีเทคเตอร์ (Quadrature detector)

การคิมอดคูลเลทสัญญาณ FM ซึ่งเป็นที่นิยมอีกวงจรหนึ่ง คือ ควอดเรเจอร์ทีเทคเตอร์ (Quadrature detector) โดยเทอม Quadrature จะหมายถึงความต่างเฟสระหว่างสัญญาณทั้งสองเป็น  $90^\circ$  ควอดเรเจอร์ทีเทคเตอร์จะใช้วงจรเฟสชิฟ (phase-shift circuit) เพื่อที่จะทำการเปลี่ยนเฟสไป  $90^\circ$  ที่ความถี่คลื่นพาหะที่ไม่ได้มอดคูลเลท วงจรเฟสชิฟที่ใช้กันมากที่สุดแสดงดังรูป 2.11 สัญญาณ FM จะถูกป้อนเข้าไปในตัวเก็บประจุ  $C_1$  ที่มีค่าน้อยมากไปยังวงจรจันซึ่งถูกปรับตรงกับค่าเรโซแนนซ์ที่ความถี่คลื่นพาหะกลาง วงจรจันที่ปรากฏจะมีค่าความต้านทานสูงมากที่ความถี่เรโซแนนซ์ ตัวเก็บประจุขนาดเล็กจะมีค่ารีแอกแตนซ์สูงมากเมื่อเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรจัน ดังนั้นเอาต์พุตที่ตกคร่อมวงจรจันที่ความถี่คลื่นพาหะจะเข้าใกล้  $90^\circ$  ซึ่งนำหน้าสัญญาณอินพุต เมื่อมีสัญญาณ FM เกิดขึ้นความถี่คลื่นพาหะจะเบี่ยงเบนสูงและต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรแอลซีหรือวงจรจันเนอร์ ผลคือจะทำให้ขนาดของเฟสชิฟระหว่างสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง

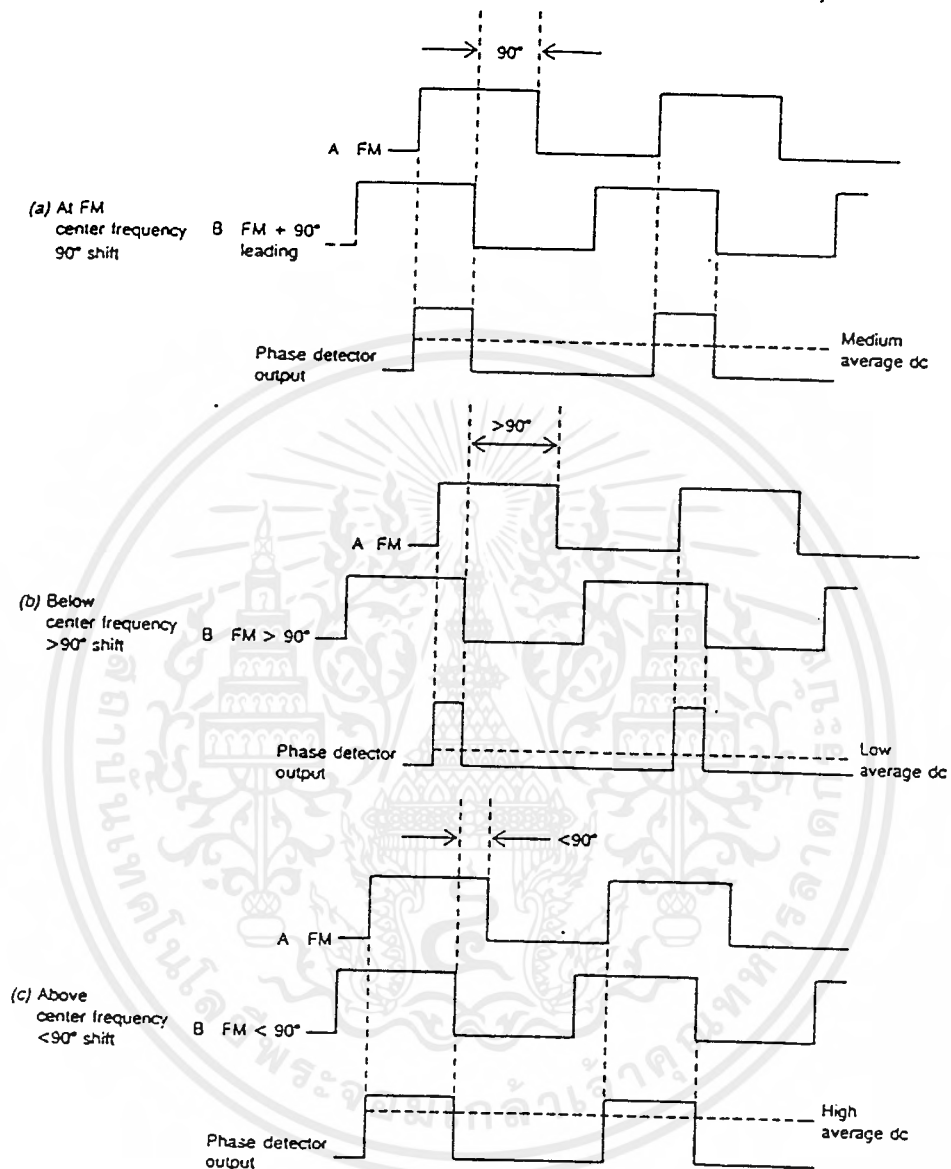
จากนั้นสัญญาณควอดเรเจอร์สองสัญญาณจะถูกส่งเข้าไปในวงจรเฟสดีเทคเตอร์ ซึ่งเป็นวงจรที่มีสัญญาณเอาต์พุตเป็นฟังก์ชันกับขนาดของเฟสชิฟระหว่างสัญญาณอินพุตสองสัญญาณ วงจรเฟสดีเทคเตอร์ที่ใช้กันมากที่สุดคือบาลานซ์มอดูเลเตอร์ (Balanced modulator) ซึ่งใช้ดีฟเฟอร์เรนเชียลแอมพลิฟายเออ สัญญาณเอาต์พุตของวงจรเฟสดีเทคเตอร์จะเป็นชุดของพัลส์ที่มีความกว้างเปลี่ยนแปลงตามขนาดของเฟสชิฟระหว่างสัญญาณทั้งสอง สัญญาณเหล่านี้จะถูกเฉลี่ยให้เท่ากันในวงจรกรองความถี่ต่ำ RC เพื่อที่จะสร้างสัญญาณข้อมูลเดิมขึ้นมา



รูปที่ 2.11 วงจรตีมอดูเลทแบบควอดเรเตอร์ดีเทกเตอร์ (quadrature detector)

โดยปกติสัญญาณ FM ซึ่งเป็นสัญญาณอินพุทรูปไซน์ที่ผ่านเข้าไปในวงจรเฟสดีเทกเตอร์จะอยู่ที่ระดับสูงมาก ดังนั้นสัญญาณนี้จะขับคิฟเฟอเรนเชียลแอมพลิฟายเออร์ในวงจรเฟสดีเทกเตอร์จนกระทั่งคัทออฟและอิมิตัว คิฟเฟอเรนเชียลทรานซิสเตอร์จะประพุดิตัวเหมือนเป็นสวิทช์ ดังนั้นเอาท์พุทจะเป็นชุดของพัลส์ ถ้าสัญญาณอินพุทใดพอกก็ไม่จำเป็นต้องใช้วงจรลิมิตเตอร์ ช่วงพัลส์เอาท์พุทถูกกำหนดด้วยขนาดของเฟสชิฟ

รูป 2.12 เป็นการแสดงรูปคลื่นในควอดเรเตอร์ดีเทกเตอร์ เมื่อไม่มีการมอดูเลทสัญญาณสัญญาณอินพุททั้งสองจะมีเฟสตรงข้ามกันเป็น  $90^\circ$  ดังนั้นจะให้ความกว้างของพัลส์เอาท์พุทเป็นเครื่องแสดง เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นขนาดของเฟสชิฟจะลดลงซึ่งเป็นเหตุทำให้ความกว้างของพัลส์เอาท์พุทมีค่ามากขึ้น พัลส์ที่ขยายกว้างออกไปจะถูกเฉลี่ยด้วย RC ฟิวเตอร์ ทำให้แรงดันเอาท์พุทเฉลี่ยสูงกว่า เช่นเดียวกันกับสัญญาณที่มีแอมพลิจูดสูงกว่าก็ต้องการที่จะสร้างความถี่คลื่นพาห์ที่สูงกว่าด้วย



รูปที่ 2.12 รูปสัญญาณจากวงจรควอดเรเจอร์ตีเทกเตอร์ (Quadrature detector)

เมื่อความถี่ของสัญญาณ FM ลดลง เฟสชิฟต์จะยังมีมากซึ่งเป็นผลทำให้พัลส์เอทพุทแคบลง เมื่อพัลส์แคบลงจะทำให้แรงดันเอทพุทเฉลี่ยต่ำลงดังนั้นสัญญาณข้อมูลเดิมจะน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

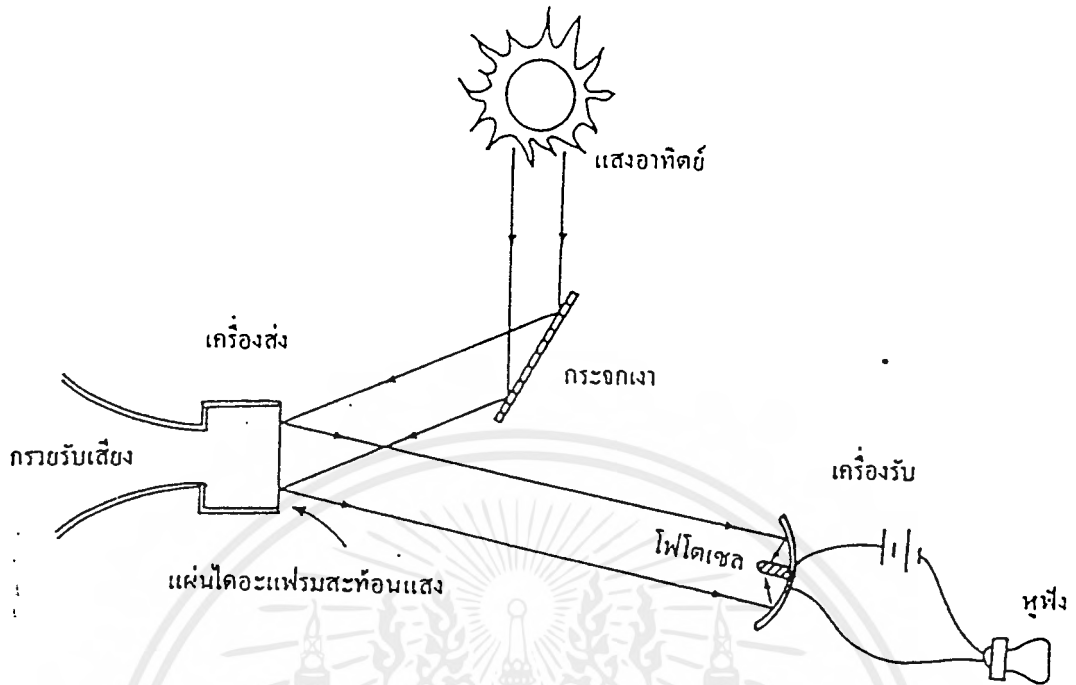
### บทที่ 3

#### การสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง

##### 3.1 วิวัฒนาการของการสื่อสารด้วยแสง

แม้ว่าจะมีการบันทึกจากชนชาติกรีกโบราณ ที่กล่าวถึงเรื่องราวเกี่ยวกับแสงที่สามารถเดินทางไปตามสายน้ำที่ไหลอยู่ในท่อระบายน้ำซึ่งคาดเดาก็ตาม แต่ก็ดูเหมือนว่า มิได้มีใครที่จะใส่ใจในเรื่องนี้อย่างจริงจังเลย จนกระทั่งในปี 1870 จอห์น ทิดัล (John Tydal) ได้ทำการทดลองให้เห็นว่า แสงนั้นสามารถเดินทางตามสายน้ำที่ถูกเทออกจากภาชนะที่มีแสงสว่างส่องอยู่ภายในได้และกล่าวกันว่าบันทึกเรื่องราวต่าง ๆ เหล่านี้คือ ต้นเหตุที่มาของการคิดค้นเกี่ยวกับเส้นใยนำแสงในปัจจุบันเมื่อไม่นานกระจกที่ใช้ในการสะท้อนแสงอาทิตย์หรือการสื่อสารแบบโบราณแล้ว สิ่งประดิษฐ์ชิ้นแรกที่เกี่ยวเนื่องกับระบบการสื่อสารด้วยแสงก็จะเป็นโฟโตโฟน (Photo phone) ของอเล็กซานเดอร์ เกรแฮม เบล (Alexander Graham Bell) ซึ่งได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นในปี 1880 ส่วนประกอบนั้นมีแสดงในรูปที่ 3.1

การทำงานของโฟโตโฟนนั้นอธิบายได้ง่ายดังนี้ คือ เมื่อมีเสียงพูดเข้าไปในกรวยรับเสียง เสียงจะทำให้แผ่นไดอะแฟรม (diaphragm) ซึ่งสะท้อนแสงที่ติดอยู่กับกรวยรับรับเสียงนั้นสั่นเป็นเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแสงที่สะท้อนออกมาจากแผ่นไดอะแฟรมนั้น ดังนั้นแสงที่ถูกสะท้อนนี้จะพุ่งไปยังเครื่องรับซึ่งมีโฟโตเซลล์ (photo cell) เป็นตัวรับแสงและเป็นตัวควบคุมการไหลของไฟฟ้าในวงจรที่มีดังแสดงไว้ในรูป เพราะฉะนั้นโฟโตโฟนจึงสามารถที่จะส่งข่าวสารที่เป็นเสียงได้โดยใช้แสงเป็นตัวพาห้จากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากสถานภาพของสิ่งแวดล้อมต่างๆ มีอิทธิพลต่อการส่งสัญญาณในระบบนี้มาจึงทำให้ระยะเวลาใช้งานของโฟโตโฟนนั้นสั้นมากคือเพียงประมาณ 200 เมตร เท่านั้น เลยทำให้ไม่มีบทบาทเท่าใดนัก

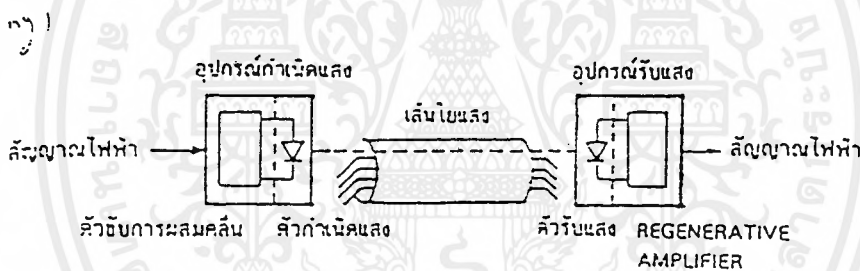


รูปที่ 3.1 แสดงการทำงานของโฟโตโฟน

แม้ว่าในปี 1960 Dr. Theodore Maiman จะสามารถคิดค้นวิธีผลิตแสงเลเซอร์ออกมาได้ เป็นผลสำเร็จก็ตาม แต่แสงเลเซอร์ที่ผลิตออกมาด้วยวิธีการนี้ก็ยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการสื่อสารจนกระทั่งปี 1970 จึงได้มีการผลิตเลเซอร์ไดโอดซึ่งสามารถใช้เป็นตัวผลิตสัญญาณเพื่อการสื่อสารขึ้นได้สำเร็จ และได้นำมาใช้ในการสื่อสารร่วมกับสายใยนำแสงขึ้นได้เป็นครั้งแรก อย่างไรก็ตาม สมบัติของเลเซอร์ไดโอดและสายใยนำแสงในสมัยนั้น เมื่อคิดเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียในการสื่อสารในระบบไฟฟ้าที่มีอยู่ก็ยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานจริง อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่ได้ในครั้งนั้นได้เกิดแรงจูงใจอันยิ่งใหญ่ที่ทำให้มีการพัฒนาระบบการสื่อสารด้วยแสงขึ้นมาอย่างจริงจัง ประเด็นสำคัญในการพัฒนานี้คือ ความต้องการที่จะลดค่าความลดทอนในเส้นใยนำแสงให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะน้อยได้จนบัดนี้นับว่าการพัฒนาได้ประสบความสำเร็จเป็นอย่างมาก โดยพิจารณาจากปี 1970 ค่าความลดทอนของสัญญาณในเส้นใยแสงมีค่ามากถึง 20 dB / กิโลเมตร แต่ในปัจจุบันการลดทอนของสายใยนำแสงนั้นได้รับการปรับปรุงให้มีค่าลดลงเหลือเพียงประมาณ 0.2 dB / กิโลเมตร เท่านั้น

### 3.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของการสื่อสารด้วยแสง

ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง แสดงดังรูป 3.2 โดยทั่วไปแล้วสัญญาณไฟฟ้าที่ส่งจากอุปกรณ์ปลาย (Terminal equipment) ต่าง ๆ เช่น โทรศัพท์ เครื่องป้อนข้อมูล (data terminal) โทรสาร (Facsimile) เป็นต้น จะถูกอุปกรณ์เปลี่ยนไฟฟ้าเป็นแสง (E/O converter) เปลี่ยนให้เป็นสัญญาณแสง (นั่นคือความแรงของสัญญาณไฟฟ้าจะเปลี่ยนเป็นความเข้มของแสงหรือ “1” “0” ของสัญญาณไฟฟ้าจะเปลี่ยนเป็นแสงที่สว่าง และมีค) และส่งเข้าไปในเส้นใยนำแสง สัญญาณที่เดินทางในเส้นใยนำแสงนั้นกำลังของมันจะอ่อนลง เมื่อเดินทางในระยะทางที่เพิ่มขึ้นพร้อมทั้งรูปคลื่นก็ขยายกว้าง (Spreading) ออกไปด้วย เมื่อไปถึงอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแสงให้เป็นไฟฟ้า (O/E converter) ของทางคานรับสัญญาณ แสงที่ส่งมาจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าและส่งไปยังอุปกรณ์ปลาย เพื่อทำการเปลี่ยนกลับคืนให้เป็นสัญญาณของโทรศัพท์ เครื่องป้อนข้อมูล โทรภาพ และอื่น ๆ เป็นต้น



รูป 3.2 แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของระบบการสื่อสารเส้นใยแสง

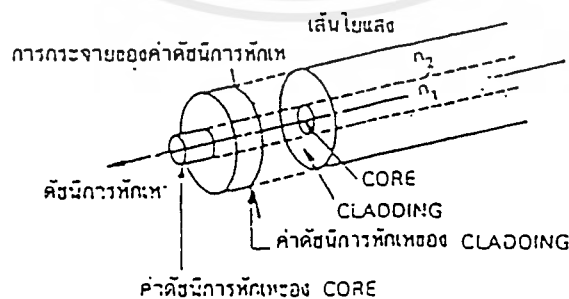
อนึ่ง อุปกรณ์เปลี่ยนไฟฟ้าเป็นแสงนั้นทำได้โดยใช้อุปกรณ์กำเนิดแสงได้แก่ LED หรือ Semiconductor laser ส่วนอุปกรณ์เปลี่ยนแสงให้เป็นไฟฟ้านั้นทำได้โดยใช้ไดโอดแสง (Photo diode), ทรานซิสเตอร์แสง (Photo transistor) นอกจากนี้กรณีที่ระยะทางของสายส่งยาวอาจจำเป็นต้องติดตั้งตัวทวนสัญญาณ (repeater) ณ ตำแหน่งที่เหมาะสม ตัวทวนสัญญาณนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงที่เข้ามาให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า จากนั้นจึงทำการขยายแล้วเปลี่ยนกลับให้เป็นสัญญาณแสงอีกและส่งเข้าไปในเส้นใยนำแสงในช่วงต่อไป

### 3.3 เส้นใยนำแสง

#### 3.3.1 โครงสร้างพื้นฐานของเส้นใยนำแสง

โดยทั่วไปแล้วเส้นใยนำแสงเป็นเส้นใยขนาดเล็กที่ทำจากแก้ว สิ่งที่เราพบเห็นบ่อย ๆ คือเส้นใยที่ใช้ในการนำแสงของคอกไม้เรืองแสงสำหรับตั้งประดับเพื่อความสวยงามที่มีขายตามห้างสรรพสินค้าทั่วไป โดยการป้อนแสงสีแดง สีเหลือง สีเขียวเข้าไปที่ปลายข้างหนึ่งของเส้นใยนำแสง และเราจะมองเห็นแสงออกมาจากปลายอีกข้างหนึ่งของเส้นใยนำแสงนี้ได้

โครงสร้างพื้นฐานของเส้นใยนำแสงประกอบด้วยสารไดอิเล็กตริก 2 ชนิดที่มีค่าดัชนีหักเหไม่เท่ากัน โดยสารไดอิเล็กตริกที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงต่ำจะเป็นส่วนที่ห่อหุ้มส่วนที่อยู่ตรงกลาง ส่วนตรงกลางนั้นมีดัชนีหักเหของแสงสูงเรียกว่า Core และส่วนห่อหุ้มด้านนอกที่มีดัชนีหักเหของแสงต่ำกว่าเรียกว่า Cladding ยกตัวอย่างเช่น ที่ Core ของเส้นใยนำแสงมีค่าดัชนีหักเหของแสงคงที่ แต่ค่าดัชนีหักเหของ Core กับ Cladding เปลี่ยนแปลงในลักษณะของขั้นบันได เส้นใยนำแสงแบบนี้เรียกว่า Step-index Optical Fiber ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในรูป 3.3 เส้นผ่านศูนย์กลางของ Core และเส้นผ่านศูนย์กลางของ Cladding จะมีค่าต่างกันตามชนิดของเส้นใยนำแสง สำหรับเส้นใยนำแสงแบบ Multimode นั้น เส้นผ่านศูนย์กลางของ Core มีค่า 40~100  $\mu\text{m}$  ส่วนเส้นใยนำแสงแบบ Single mode นั้น เส้นผ่านศูนย์กลางของ Core มีค่า 5~15  $\mu\text{m}$  สำหรับส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของ Clad นั้น กำหนดให้มีค่าเหมือนกันหมดไม่ว่าจะเป็นเส้นใยนำแสงชนิดไหนโดยมีค่า 100~200  $\mu\text{m}$  นอกจากนั้นค่าดัชนีหักเหของ Core จะมีค่ามากกว่าค่าดัชนีหักเหของ Cladding โดยที่เส้นใยนำแสงแบบ Multimode จะมีค่า 1~5% แต่ถ้าเป็นเส้นใยนำแสงแบบ Single mode จะมีค่า 0.1~0.5% มากกว่าค่าดัชนีหักเหของ Cladding เป็นต้น



รูป 3.3 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเส้นใยแสง

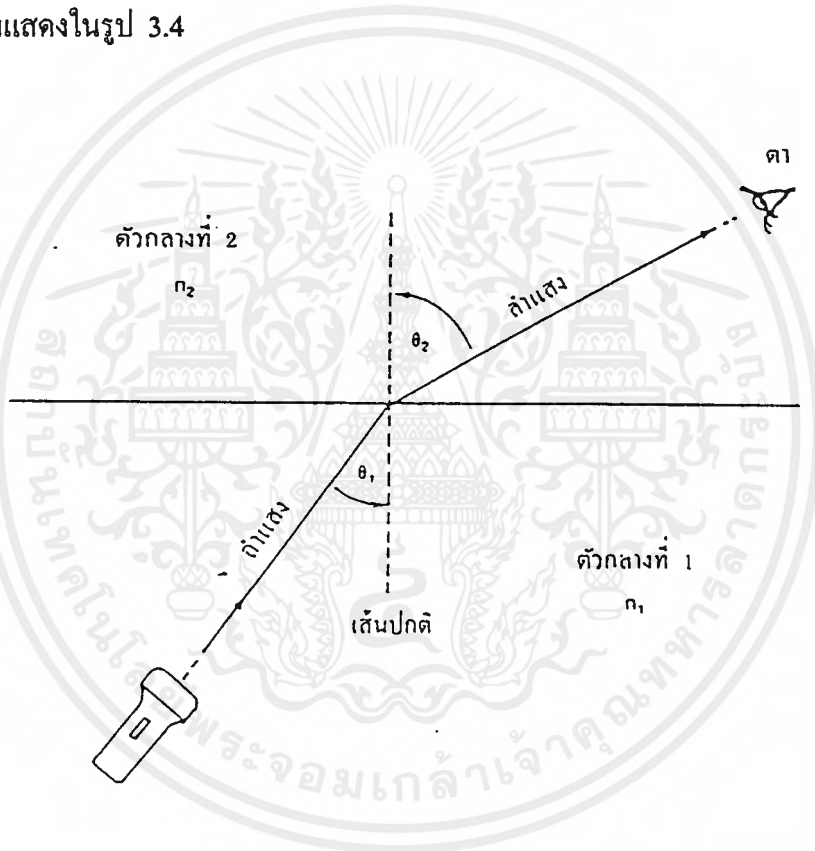
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การเคลื่อนที่ของแสงในเส้นใยนำแสง

ดังเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลาง 2 ชนิดที่มีดัชนีหักเห (Light reflective index) ต่างกันแล้ว ก็จะมีการหักเหของแสงเกิดขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎของสเนลล์ (Snell's Law) คือ

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

โดยที่ในที่นี้  $n_1$  และ  $n_2$  คือ ค่าดัชนีการหักเหของแสงของตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2 ตามลำดับ ส่วน  $\theta_1$  และ  $\theta_2$  คือค่าของมุมที่ลำแสงทำกับเส้นปกติ (normal line) บนผิวรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง ดังแสดงในรูป 3.4



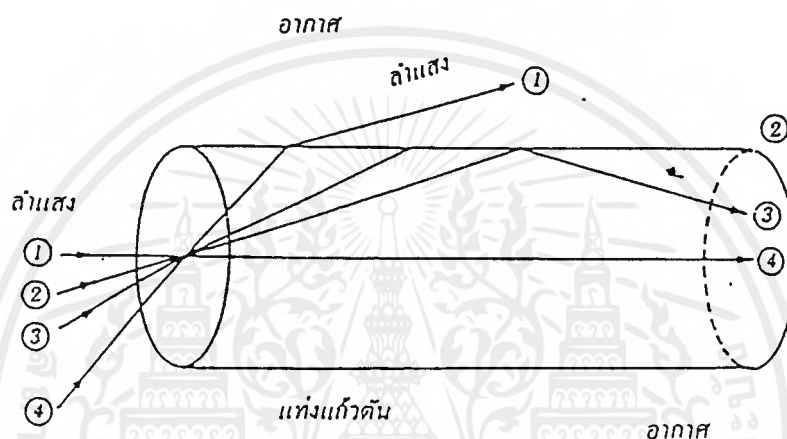
รูปที่ 3.4 การหักเหของแสง

ดังนั้นเมื่อมีการฉายแสงเข้าสู่แท่งแก้วตันที่วางอยู่ในอากาศด้วยค่ามุมตกกระทบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 แล้วเราจะพบว่าเนื่องจากมุมตกกระทบของลำแสงที่หนึ่งมีขนาดเล็กดังนั้นลำแสงนี้จึงเดินทางหักเหทะลุผ่านแท่งแก้วออกไปได้ เมื่อมุมตกกระทบของลำแสงนั้นโตขึ้นเรื่อย ๆ แล้ว ก็ย่อมที่จะมีค่ามุมตกกระทบอยู่มุมหนึ่งที่ทำให้แสงนั้นเกิดการหักเหไปในแนวที่ขนานไปกับผนังของแท่งแก้วนั้นพอดี ซึ่งเรียกมุมตกกระทบที่สามารถทำให้แสงเดินทางขนานไปกับแท่งแก้ว

ได้นั้น เรียกว่า มุมรับแสงสูงสุด ( $\theta_{max}$ ) ดังเช่นการเดินทางของลำแสงที่ 2 ค่ามุมตกกระทบของลำแสงดังกล่าวมีชื่อว่า มุมวิกฤต (critical angle) โดยค่าของมุมวิกฤตสามารถหาได้จากสมการ

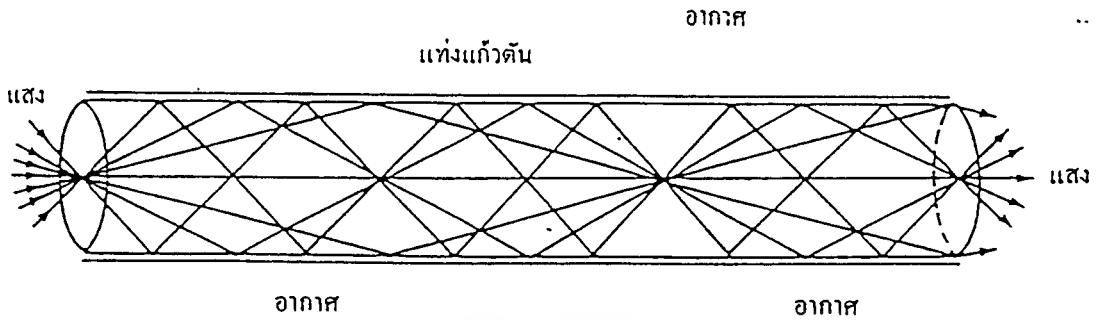
$$\theta_{max} = \sin^{-1}[(n_2/n_1)\sin\theta_c] \dots\dots\dots (2)$$

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



รูปที่ 3.5 การหักเหของแสงผ่านแท่งแก้วตัน

ดังที่เราทราบกันดีอยู่แล้วว่า เมื่อมุมตกกระทบของลำแสงโตขึ้นเกินกว่ามุมวิกฤตดังกรณีของลำแสงที่ 3 นั้น ลำแสงนี้ก็จะไม่สามารถหักเหออกไปจากแท่งแก้วได้ และจะเกิดการสะท้อนกลับของลำแสงนั้นกลับไปในแท่งแก้วนั้นอีก และถ้าแท่งแก้วนี้ยาวมากลำแสงนี้ก็จะสะท้อนกลับไปกลับมาอยู่ในแท่งแก้วนี้เรื่อยไป ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยการสะท้อนของแสงในลักษณะนี้เรียกว่า การสะท้อนกลับหมด ลักษณะเช่นนี้เอง ทำให้แสงสามารถเดินทางจากปลายข้างหนึ่งไปยังปลายอีกข้างหนึ่งของแท่งแก้วนั้นได้ ในทำนองเดียวกันลักษณะการเคลื่อนที่ของแสงในเส้นใยนำแสงนั้นก็เช่นเช่นเดียวกับการเคลื่อนที่ของแสงตามรูปที่ 3.6 นี้เอง เพราะแกนของเส้นใยนำแสงซึ่งใช้เพื่อเป็นทางเดินของสัญญาณแสงนั้น ก็มีลักษณะโครงสร้างเหมือนกับแท่งแก้วทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็ก ๆ มากเท่านั้น



รูปที่ 3.6 การเคลื่อนที่ของแสงภายในแท่งแก้ว

### 3.3.3. การแตกกระจายของรูปสัญญาณจากเส้นใยนำแสง

จากรูปที่ 3.5 เราจะพบว่าเพราะแท่งแก้วนั้นมีขนาดใหญ่ ดังนั้นแนวของลำแสงที่มีมุมตกกระทบมากกว่ามุมวิกฤตก็ย่อมมีได้หลายแนว จึงทำให้แนวการเดินทางของลำแสงที่สะท้อนไปมาระหว่างผนังของแท่งแก้วนี้เกิดขึ้นได้หลายแนวด้วยกัน ฉะนั้นจึงเป็นการแน่นอนว่าแสงที่เดินทางไปในแต่ละแนวทางนี้ย่อมจะใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านจากปลายข้างหนึ่งของแท่งแก้วไปสู่ปลายอีกข้างหนึ่งนั้นจะไม่เท่ากัน ดังนั้นถ้าลำแสงแต่ละลำแสงที่เคลื่อนที่ผ่านแท่งแก้วนี้ทำหน้าที่เป็นคลื่นพาห์ของสัญญาณเดียวกันอยู่แล้ว สัญญาณนั้นก็จะต้องเดินทางไปถึงปลายอีกข้างหนึ่งของแท่งแก้วได้ไม่พร้อมกัน จึงเป็นเหตุให้สัญญาณผลลัพธ์ที่เกิดจากผลรวมของสัญญาณจากลำแสงแต่ละลำนั้นเกิดการกระจาย ตัวอย่างเช่น ถ้าลักษณะของสัญญาณที่มีอยู่ก่อนหน้านั้นเป็นพัลส์สี่เหลี่ยมแคบๆ สัญญาณผลลัพธ์ก็อาจจะกลายเป็นพัลส์กว้างๆ ที่มีลักษณะไม่เป็นรูปสี่เหลี่ยม ดังนี้เป็นต้น ลักษณะที่สัญญาณเกิดความผิดเพี้ยนดังกล่าวมาแล้วนี้ เราเรียกว่า ยืดขยายตัว (dispersion) ของสัญญาณนั้น จากเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นจึงเกิดความจำเป็นที่ต้องสร้างเส้นใยนำแสงให้มีขนาดเล็กทั้งนี้เพื่อลดจำนวนของแนวแสงให้น้อยลง อันจะทำให้เกิดการแตกกระจายของสัญญาณนั้นน้อยลงด้วยนั่นเอง

โดยวิธีวิเคราะห์คุณสมบัติของแสงด้วยทฤษฎีขั้นสูงแล้ว พบว่าในการที่แสงสะท้อนไปมาอยู่ได้ในแท่งแก้วหรือเส้นใยนำแสงนั้น นอกจากมุมตกกระทบของลำแสงแต่ละลำบนผนังของแท่งแก้วหรือเส้นใยนำแสงนั้นต้องมีค่าโตกว่ามุมวิกฤตแล้ว เรายังได้ทราบเพิ่มเติมอีกว่า ค่าของมุมตกกระทบของลำแสงเหล่านั้นมีค่าไม่ต่อเนื่องกัน หากแต่จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเป็นแบบคิสิกิริทซึ่งก็หมายความว่า ลำแสงต่างๆ ที่เคลื่อนที่อยู่ได้ในเส้นใยนำแสงนั้นจะเกิดขึ้นโดยแยกกันออกเป็นลำๆ ซึ่งสามารถนับจำนวนได้อย่างแน่นอน ในเส้นใยนำแสงนั้นจำนวนลำแสงที่เกิดขึ้นเหล่านั้นจะเป็นตัวบอกจำนวนโหมด (mode) ของเส้นใยนำแสงนั้น ยกตัวอย่างเช่น เส้นใยนำแสงที่มีแนวลำแสงอยู่เพียงแนวเดียวเรา

เรียกว่า เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยว (single mode fiber) แต่ในเส้นใยนำแสงที่มีแนวลำแสงเกิดขึ้นได้เป็นจำนวนมาก เราเรียกเส้นใยนำแสงนั้นว่า เส้นใยนำแสงมัลติโหมด (multimode fiber)

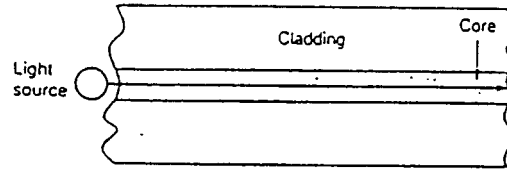
การแตกกระจายของสัญญาณอันเนื่องมาจากที่แสงแต่ละ โหมดเดินทางโดยใช้ระยะเวลาที่แตกต่างกันนี้มีชื่อว่า โหมดดิสเพอร์ชัน (mode dispersion) นอกจากการแตกกระจายของสัญญาณชนิดนี้แล้ว ยังมีสาเหตุอื่นที่ทำให้เกิดการแตกกระจายของสัญญาณอีกนั่นก็คือ การแตกกระจายของสัญญาณอันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของเนื้อสารในแกนเส้นใยนำแสงนั้นซึ่งเรียกว่า แมทริเรียลดิสเพอร์ชัน (material dispersion) นอกจากนี้แล้วยังมีการแตกกระจายของสัญญาณอันเนื่องมาจากความแตกต่างของความยาวคลื่นในลำแสงที่เคลื่อนที่ไปตามเส้นใยนำแสงนั้น ซึ่งเราเรียกว่า เวฟเลนทึดิสเพอร์ชัน (wavelength dispersion) ข้อดีของเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยวจะเกิดการแตกกระจายของสัญญาณน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเส้นใยนำแสงแบบมัลติโหมด

### 3.3.4 ชนิดของเส้นใยนำแสง

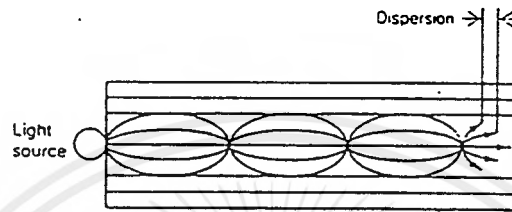
ชนิดของเส้นใยนำแสงสามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีการหักเห แบ่งตามจำนวนโหมด แบ่งตามสารที่ใช้ผลิต แบ่งตามกรรมวิธีการผลิต แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเส้นใยนำแสงเพียง 3 ชนิดเท่านั้น คือ 1. แบ่งตามลักษณะการเดินทางของแสง (propagation mode) คือ

1.1 เส้นใยนำแสง Single mode โดยแนวลำแสงที่เคลื่อนที่ ภายในเส้นใยนำแสงมีเพียงแนวลำแสงเดียวเท่านั้น

1.2 เส้นใยนำแสง Multimode โดยแนวลำแสงที่เคลื่อนที่อยู่ภายในเส้นใยนำแสงมีหลายแนวลำแสงด้วยกัน



(a)



(b)

### รูปที่ 3.7 การเดินทางของแสงภายในเส้นใยนำแสง

a) Single-mode step-index cable

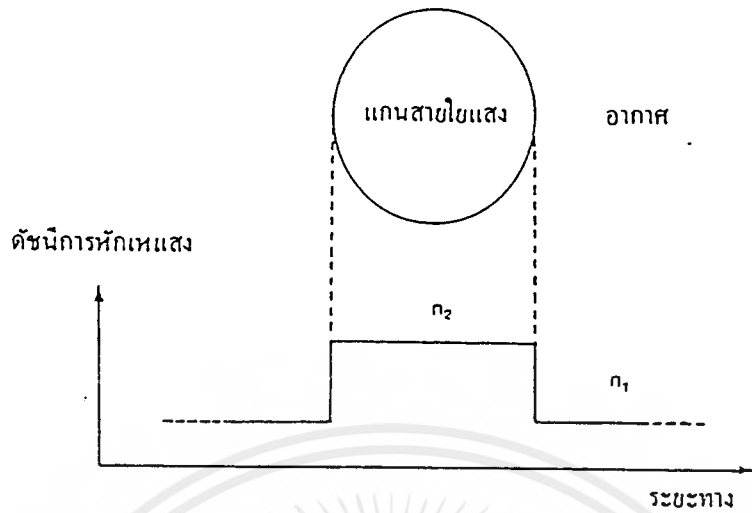
b) A Multimode graded-index cable

2. แบ่งตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของแสง (Index profile) คือ

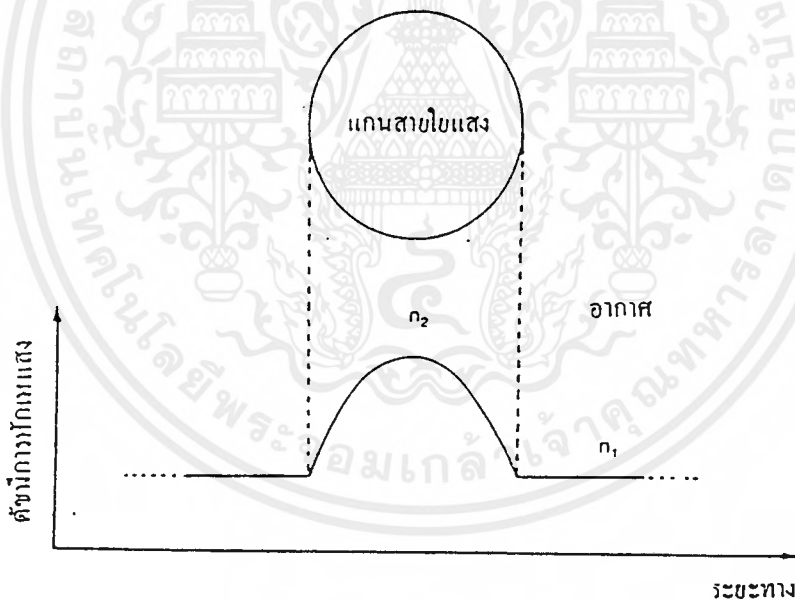
2.1 เส้นใยนำแสงชนิดดัชนีชั้นบันได (step-index fiber)

2.2 เส้นใยนำแสงชนิดดัชนีรูปมน (graded-index fiber)

โดยเส้นใยนำแสงชนิดดัชนีชั้นบันไดนั้นแกนของตัวเส้นใยนำแสงดังกล่าวมีค่าดัชนีหักเหของแสงที่สม่ำเสมอเท่ากันตลอดทั้งเส้น ซึ่งถ้าเขียนกราฟแสดงค่าดัชนีหักเหแสงของแกนของเส้นใยนำแสง เมื่อเปรียบเทียบกับดัชนีหักเหแสงของอากาศที่มีอยู่รอบตัวมันแล้วจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งมีลักษณะเหมือนว่าเป็นชั้นบันได ส่วนเส้นใยนำแสงชนิดดัชนีรูปมนนั้นดัชนีหักเหของแสงค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงไปอย่างช้า ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับดัชนีหักเหของแสงของอากาศที่อยู่รอบตัวมันแล้วจะมีลักษณะตามรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 ดัชนีการหักเหแสงของเส้นใยนำแสงชนิดดัชนีชั้นบันได (step-index fiber)

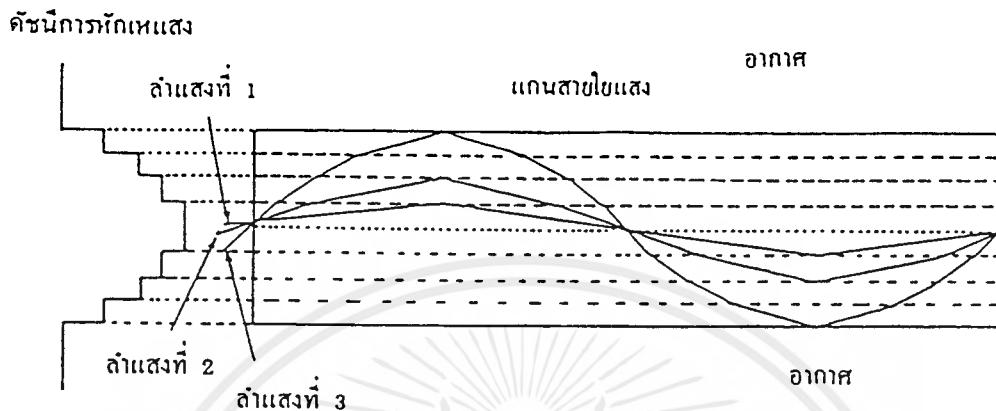


รูปที่ 3.9 ดัชนีการหักเหแสงของเส้นใยนำแสงชนิดดัชนีรูปมน (graded-index fiber)

เส้นใยนำแสงชนิดดัชนีรูปมน (graded-index fiber) ถูกสร้างขึ้นเพื่อปรับปรุงลดการแตกกระจายของสัญญาณที่เกิดขึ้นจากเส้นใยนำแสงแบบมัลติโหมดให้น้อยลง โดยลำแสงทุกลำที่เคลื่อนที่ผ่านเส้นใยนำแสงชนิดนี้จะมีเวลาการเดินทางในเวลาเท่ากันจึงเป็นเหตุทำให้การแตกกระจายของ

เส้นใยนำแสงน้อยลง ลักษณะแนวทางการเดินของแสงภายในเส้นใยนำแสงชนิดนี้ก็จะแสดงได้ดังรูปที่

3.10



รูปที่ 3.10 แนวทางของแสงในแกนเส้นใยนำแสงชนิดดัชนีรูปมน

สำหรับเส้นใยนำแสงเหล่านี้ ถ้าหากจะแสดงการสูญเสียของแสงเมื่อแสงเดินทางในเส้นใยนำแสงแล้วจะไม่แตกต่างกัน แต่ถ้าหากแสดงด้วย Transmission bandwidth ว่าสามารถส่งปริมาณข่าวสารได้มากเท่าไรนั้น เส้นใยนำแสงทั้งหลายแบบจะแตกต่างกันมากทีเดียว โดยทั่วไปแล้วเส้นใยนำแสง single mode มีแบนด์วิธกว้างที่สุด รองลงมาคือเส้นใยนำแสง Multimode แบบ Graded index และถัดมาคือ เส้นใยนำแสง Multimode แบบ Step index

### 3. แบ่งตามชนิดของสารที่ใช้ผลิต

3.1 Silica glass Optic Fiber ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริกที่เป็น Silica glass นอกจากจะใช้ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ที่บริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่แล้วยังใช้สารอื่นเติมลงไปเพื่อให้ค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงตามต้องการ สารอื่นที่เติมลงไปนี้ เรียกว่า โดปแทนท์ (Dopant) ได้แก่ เจอร์มันเนียม (Ga), โบรอน (B), ฟลูออรีน (F) เป็นต้น

3.2 Multi component glass Optic Fiber ซึ่งใช้สารไดอิเล็กตริกที่เป็นแก้วหลายชนิดปนกัน ส่วนมากจะใช้โซดาแคลเซียม (Soda Calcium) แก้วที่มีโบรอน และซิลิคอนผสมสารอื่นๆ เป็นหลัก ส่วนสารเจือได้แก่ โซเดียม (Na) แคลเซียม (Ca)

3.3 Plastic Optic Fiber ซึ่งใช้สาร ไดอิเล็กตริกที่เป็นพลาสติกในการทำเส้นใยนำแสง เป็นพวกที่มีดัชนีหักเหสูงส่วนมากทำจากสารโพลีเมทิลเมทาไครเลท (polymethyl methacrylate) เรียกชื่อย่อๆ ว่า PMMA ส่วนใหญ่แล้วเส้นใยนำแสงแบบพลาสติกนิยมใช้กันมากเนื่องจากราคาถูก มีการยึดหยุ่นที่ดี และสะดวกต่อการเคลื่อนย้ายและไม่แตกหักง่าย ส่วนข้อเสียของมันคือเส้นใยนำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบพลาสติกมีการลดทอนของสัญญาณมาก ส่วนใหญ่เส้นใยนำแสงแบบพลาสติกจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนประมาณ 85-300 ไมครอน

### 3.4 ความสูญเสียของสัญญาณในระบบการสื่อสารด้วยแสง

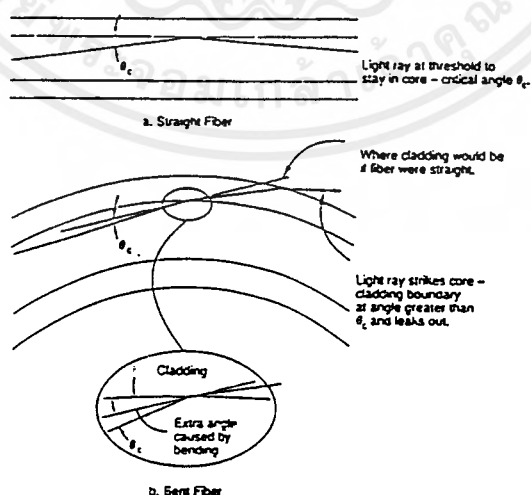
สาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณในระบบการสื่อสารด้วยแสงที่ผ่านในเส้นใยนำแสงนั้นเกิดจากความสูญเสียโดยสาเหตุ 4 ประการ

1. ความสูญเสียอันเนื่องมาจากการแผ่รังสีหรือการกระจายของคลื่น (scattering loss) ซึ่งเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของเนื้อสารเพราะมีสิ่งเจือปนอื่น ๆ เช่น อนุภาคของน้ำแฝงปนอยู่ในสาร ซึ่งเป็นแกนของเส้นใยนำแสงนั้น เป็นเหตุให้แสงที่เคลื่อนที่ผ่านไปในนั้นเกิดการกระจาย ทำให้สูญเสียพลังงานไป

2. ความสูญเสียเพราะถูกซึมซับพลังงาน (absorption loss) เกิดขึ้นเนื่องจากเนื้อสารนั้นได้ซึมซับเอาพลังงานของแสงไว้ โดยแปรรูปของพลังงานแสงไปเป็นพลังงานรูปอื่น เช่น พลังงานความร้อน เป็นต้น

3. ความสูญเสียที่จุดต่ออุปกรณ์ (connection loss) เกิดขึ้นเพราะการที่เราไม่สามารถติดตั้งเครื่องมืออย่างมีประสิทธิภาพเหมือนในอุดมคติได้

4. ความสูญเสียจากการโค้งงอของเส้นใยนำแสง (bending loss) เมื่อเกิดการโค้งงอของสายเส้นใยนำแสงจะทำให้ค่ามุมตกกระทบที่ผนังของเส้นใยนำแสงเปลี่ยนแปลงไป และถ้าความโค้งนั้นมีค่ามากพอสมควรแล้วก็จะทำให้แสงบางส่วนเกิดการหักเหออกจากเส้นใยนำแสงได้จึงทำให้มีการสูญเสียเกิดขึ้น ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การสูญเสียจากการโค้งงอเส้นใยนำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 แถบการส่งสัญญาณของเส้นใยแสง (Transmission Bandwidth)

องค์ประกอบสำคัญที่กำหนดระยะห่างของตัวทวนสัญญาณ (Repeater) ในการสื่อสารเส้นใยแสงได้แก่ การสูญเสียแสง (Loss) และ Transmission Bandwidth ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า เส้นใยนำแสงมีหลายชนิดคือ เส้นใยนำแสง multimode แบบ step index เส้นใยนำแสง multimode แบบ graded index และเส้นใยนำแสง single mode สำหรับเส้นใยนำแสง multimode ทั้ง 2 แบบนั้นความเร็วในการเดินทางของแสงจะแตกต่างกันตาม mode ทำให้ในระหว่างที่แสงเดินทาง ความกว้างของรูปคลื่นขยายกว้างออกตามระยะทาง นอกจากนั้น ทั้งเส้นใยนำแสง multimode และ singlemode ค่า Propagation constant ของสารที่ใช้ทำเส้นใยนำแสงจะมีค่าแตกต่างกันตามความยาวคลื่นของแสง ดังนั้นแสง Incoherent light ในขณะที่เดินทางความกว้างของรูปคลื่นจะขยายกว้างออกตามระยะทาง นั่นคือรูปคลื่นของสัญญาณแสงจะมีรูปร่างผิดไปจากเดิม ในการสื่อสารเส้นใยนำแสงนั้น ความเร็วในการส่งและระยะห่างของตัวค้ำทานสัญญาณ (repeater) จะขึ้นอยู่กับ Transmission Bandwidth นี้

องค์ประกอบที่กำหนด Transmission Bandwidth สำหรับเส้นใยนำแสง singlemode ซึ่งมี propagation mode เพียงอันเดียวจึงไม่มีปัญหาจากผลของ Dispersion ดังนั้น Bandwidth ของการส่งสัญญาณจึงขึ้นกับความไม่สมบูรณ์ของความเป็น coherent light ของต้นกำเนิดแสง ส่วนเส้นใยนำแสง multimode แบบ graded-index ให้ผลต่างของความเร็วในการเดินทางระหว่างโหมดน้อยมาก จึงมีแบนด์วิธ กว้างต่างกับ multimode แบบ step-index ที่ให้ dispersion เกิดขึ้น ดังนั้นเส้นใยนำแสงแบบ multimode แบบ graded index จึงมีคุณสมบัติรองลงมาจากเส้นใยนำแสงแบบ single mode ซึ่งเหมาะแก่การใช้งานในระยะทางไกลและการส่งช่วงสัญญาณจำนวนมากได้

## บทที่ 4 ระบบออปโตอิเล็กทรอนิกส์

### 4.1 แหล่งกำเนิดแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง แสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้ (Visible light) จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 0.4 nm ถึง 0.7 nm คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไปตามช่วงความยาวคลื่น และช่วงความถี่ ดังแสดงในรูป 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงชื่อเรียกและชนิดต่าง ๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

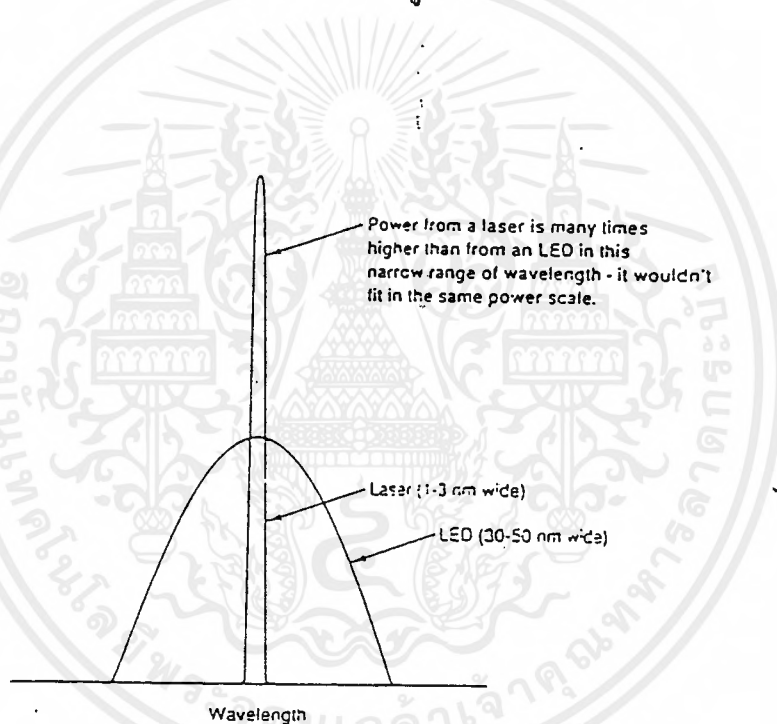
การเลือกช่วงของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงสำหรับเส้นใยนำแสงนั้นแสงจะต้องมีความยาวคลื่นที่ทำให้มีประสิทธิภาพในการส่งผ่านเส้นใยนำแสงมากที่สุด ตามปกติจะนิยมใช้กันอยู่ที่ 850, 1300 หรือ 1550 นาโนเมตร สำหรับเส้นใยนำแสงแบบแก้ว ช่วงของความยาวคลื่นนี้สำคัญมากเนื่องจากช่วงความกว้างของมันมากก็จะเกิดปัญหาการเพี้ยนและการกระจายของสัญญาณ แหล่งกำเนิดแสงจะต้องสามารถให้พลังงานที่เพียงพอที่จะสามารถส่งสัญญาณผ่านไปบนเส้นใยนำแสงได้ และไม่มีผลต่อการเพี้ยนของสัญญาณที่เครื่องรับด้วย แหล่งกำเนิดแสงส่วนมากที่ใช้ในระบบการสื่อสารทางแสงนี้จะอุปกรณ์ชนิดสารกึ่งตัวนำ คือ light emitter diode หรือ LED และเซมิคอนดัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตอร์เลเซอร์ (semiconductor laser) และบ่อยครั้งที่จะได้ยินว่า เลเซอร์ ไดโอด (laser diode (LD)) อุปกรณ์พวกนี้ส่วนมากจะเป็นมาตรฐานซึ่งใช้ควบคู่กับวงจรที่ใช้ในการสื่อสารระบบนี้ด้วย

#### 4.1.1 ช่วงทำงานของความยาวคลื่น (operating wavelength)

แหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่นมีผลทั้งต่อการลดทอนของสัญญาณและการแตกกระจายของสัญญาณในการส่งผ่านเส้นใยนำแสง ปกติจะใช้ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 750-850, 1300, 1550 นาโนเมตร ในเส้นใยนำแสงชนิดซิลิคอน และประมาณ 660 ในเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกความกว้างของช่วงสเปกตรัมหรือช่วงความยาวคลื่นที่ส่งนี้ สำหรับแหล่งกำเนิดที่เป็น LED และแหล่งกำเนิดเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์จะมีความแตกต่างกันตามรูปที่ 4.2



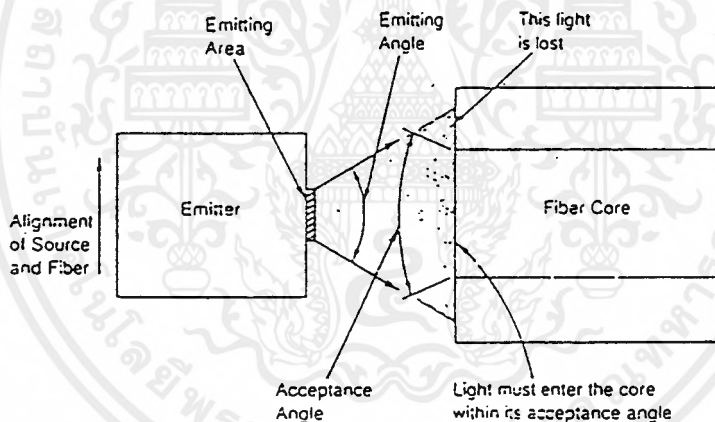
รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างความกว้างของสเปกตรัมของ LED และเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์

ความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยออกมาและช่วงความกว้างของสเปกตรัมขึ้นอยู่กับความแตกต่างของส่วนประกอบความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมาขึ้นอยู่กับสารกึ่งตัวนำที่นำมาทำเป็นแหล่งกำเนิดแสง ส่วนช่วงสเปกตรัมขึ้นอยู่กับโครงสร้างของอุปกรณ์ ทั้งแหล่งกำเนิดที่เป็นเลเซอร์และ LED นั้นทำมาสารกึ่งตัวนำเหมือนกันและมีความยาวศูนย์กลางเหมือนกัน แต่ LED จะมีความกว้างของ

ช่วงสเปกตรัมมากกว่า ซึ่งถ้าเป็นเลเซอร์ 2 อันที่มีโครงสร้างเหมือนกันแต่ทำจากสารกึ่งตัวนำชนิดต่างชนิดกันช่วงสเปกตรัมแคบคล้ายกันแต่ความยาวคลื่นต่างกัน

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

พลังงานที่ใช้ในการสื่อสารทางแสงนี้แหล่งกำเนิดแสงต้องมีพลังงานที่สอดคล้องกับเส้นใยนำแสงที่ใช้ซึ่งโดยปกติจะใช้พลังงานอยู่ในช่วงที่มากกว่า 100 มิลลิวัตต์ สำหรับแหล่งกำเนิดที่เป็นเลเซอร์ และ 10 ไมโครวัตต์สำหรับแหล่งกำเนิดที่เป็น LED พลังงานเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับมุมของแสงที่ปล่อยออกจากแหล่งกำเนิด ขนาดของพื้นที่หน้าตัดของช่องปล่อยแสง การจัดเรียงของแหล่งกำเนิดกับเส้นใยนำแสง และลักษณะการรับแสงของเส้นใยนำแสง ดังรูปที่ 4.3 ความเข้มของแสงที่ปล่อยออกมาจะไม่สม่ำเสมอที่แสงถูกปล่อยออกมาแต่แสงจะมีความเข้มมากตรงตำแหน่งศูนย์กลางการปล่อยปกติแล้วเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์จะไม่มีกระจายของแสงด้วยมุมประมาณ  $10\text{-}20^\circ$  และแสงจาก LED จะกระจายแสงด้วยมุมที่ใหญ่กว่ามุมของเลเซอร์

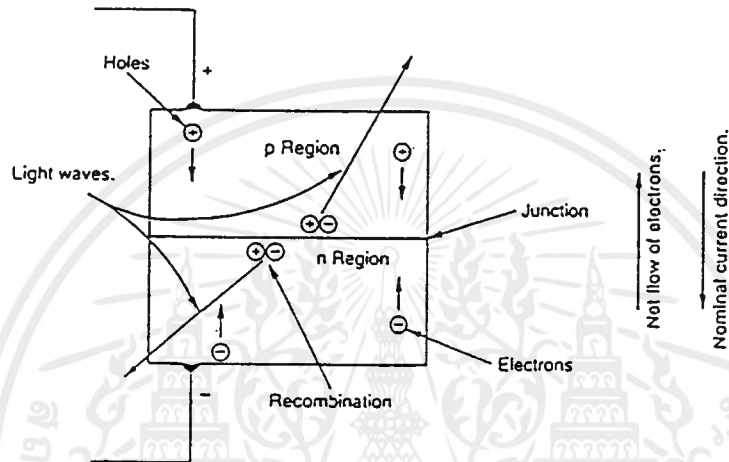


รูปที่ 4.3 การส่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงสู่เส้นใยนำแสง

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

LED เป็นแหล่งกำเนิดแสงในช่วงที่ตาไม่สามารถมองเห็นได้อยู่ในช่วงของแสงอินฟราเรด (infrared light) โดยปกติแหล่งกำเนิดนี้จะใช้ในการสื่อสารในระยะสั้น ๆ แนวคิดพื้นฐานของการปล่อยแสงของ LED นี้แสดงดังรูปที่ 4.4 ถ้ามีแรงดันไฟอย่างอ่อนดกคร่อมเซมิคอนดักเตอร์ไดโอด (semiconductor diode) จะมีผลทำให้เกิดการไหลของกระแสดกคร่อมในรอยต่อ เนื่องจากไดโอดทำมาจากพื้นที่ 2 บริเวณแต่ละบริเวณมีการเจือสารไม่บริสุทธิ์ (impurities) ทำให้มีลักษณะความ

ต้องการทางไฟฟ้าต่างกัน บริเวณด้านพีจะถูกเจือด้วยสารเจือไม่บริสุทธิ์ที่น้อยกว่าอะตอมของสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดโฮล (hole) บริเวณด้านเอ็นจะถูกเจือด้วยสารที่ไม่บริสุทธิ์ซึ่งจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้น (free-electron) ดังนั้นจึงมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อย่างมากภายในโครงสร้างผลึก ถ้าใส่แรงดันไฟบวกให้กับด้านพีและแรงดันไฟลบให้กับบริเวณด้านเอ็น มีผลทำให้อิเล็กตรอนก็จะเคลื่อนที่ผ่านไปเป็นไดโอดและเกิดการรวมตัวกันอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 4.4 ลักษณะการทำงานของ LED

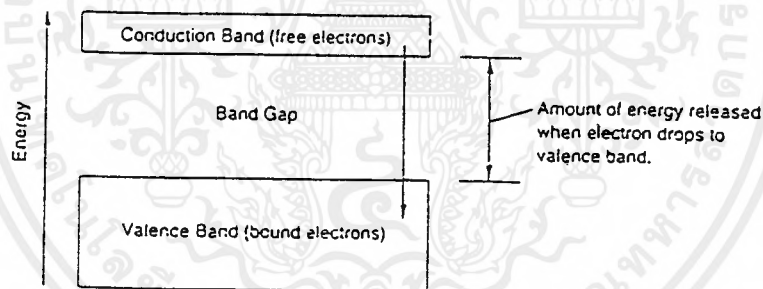
สารกึ่งตัวนำหลายชนิดไม่จำเป็นต้องเป็นซิลิคอนและเจอร์เมเนียมจะมีการปล่อยพลังงานความร้อนซึ่งเกิดจากการสั้นในโครงสร้างผลึก ซึ่งในสารที่นำมาทำเป็น LED นี้การรวมตัวกันของพาหะจะทำให้เกิดโฟตอนของแสงขึ้นซึ่งเกิดจากการปล่อยมาจากสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญที่สุด คือ แกลเลียมอะเซไนด์ (Gallium arsine) และอื่นๆ ที่สัมพันธ์กัน จะถูกสร้างจากธาตุในหมู่ที่ 3a และ 5a ในตารางธาตุดังแสดงในตาราง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงความยาวคลื่นที่ถูกปล่อยออกมานั้นขึ้นอยู่กับระดับพลังงานภายในของสารกึ่งตัวนำ ถ้าเป็นสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิค่า อิเล็กตรอนทั้งหมดจะมีพันธะอยู่ภายในโครงสร้างผลึก ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นอิเล็กตรอนบางตัวจะแตกจากพันธะแล้วกระโดดสู่ระดับพลังงานที่สูงกว่าเรียกว่าระดับคอนดักชัน (conduction level) ทำให้พวกมันสามารถที่จะเคลื่อนที่อย่างอิสระในโครงสร้างผลึกนั้น แถบพลังงานชั้นวาเลนซ์ (valence band) และแถบพลังงานคอนดักชัน (conduction band) จะแยกกันอยู่โดยมีระดับพลังงานที่แบ่งกันเอาไว้เรียกว่า แถบพลังงานหวงห้าม (band gap) ซึ่งจะเป็นตัวบอกคุณลักษณะหลายอย่างของสารกึ่งตัวนำ

แถบพลังงานคอนดักชันจะมีอิเล็กตรอนอิสระหลังจากเกิดโฮลที่แถบพลังงานวาเลนซ์ซึ่งมันจะถูกพิจารณาว่าเป็นประจุบวก โฮลนี้สามารถเคลื่อนที่ได้ อิเล็กตรอนจากตำแหน่งอื่นๆ ในโครงสร้างผลึกจะเคลื่อนที่มารวมตัวกับโฮลและแตกออกเป็นโฮลตามเดิมอีกครั้ง สารเจือที่ไม่บริสุทธิ์ของสารกึ่งตัวนำจะเป็นตัวกำเนิดอิเล็กตรอนและโฮล เมื่ออิเล็กตรอนตกจากแถบพลังงานคอนดักชันลงสู่แถบพลังงานวาเลนซ์จะเกิดการปล่อยพลังงานที่มีค่าเท่ากับความแตกต่างของพลังงานของทั้งสองระดับ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

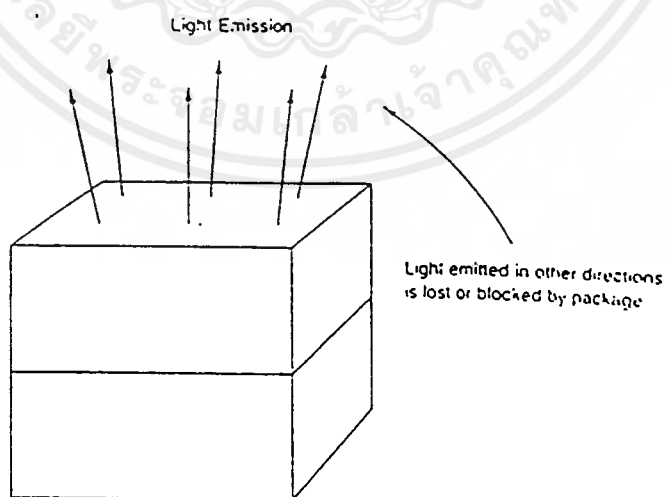
ความแตกต่างของระดับพลังงานทั้งสองหรือแถบพลังงานหวงห้ามซึ่งทำให้เกิดจำนวนพลังงานที่คายออกมาและความยาวคลื่นที่ถูกปล่อยซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารกึ่งตัวนำนั้น ตามปกติแล้วจะใช้ LED ในเส้นใยนำแสงแบบพลาสติก โดยทำจากแกเลียมอะลูมิเนียมอะเซไนด์ (Gallium aluminum arsenide) หรือแกเลียมอะเซไนด์ (Gallium arsenide) LED แบบแกเลียมอะเซไนด์จะให้แสงอยู่ในช่วง 930 นาโนเมตร ถ้าเพิ่มอะลูมิเนียมเข้าไปจะเกิดการลดลงของค่ากระแสขีดเริ่ม (threshold current) ซึ่งทำให้มีช่วงชีวิตดีขึ้นและสามารถเพิ่มพลังงานในแถบพลังงานหวงห้ามได้ทำให้แสงที่ปล่อยออกมาอยู่ในช่วง 750-900 นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่ใช้กันอยู่ที่ 820-850 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ ก็สามารถนำมาใช้ทำ LED ได้ซึ่งจะมีช่วงความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมาแตกต่างกันออกไป เช่น แกลเลียมอะเซไนด์ฟอสไฟด์ (Gallium arsenide phosphide : GaAsP) ให้แสงในช่วง 5 นาโนเมตร เป็นแสงสีแดง แต่จะไม่ดีเท่ากับแกลเลียมอะลูมิเนียมอะเซไนด์ (GaAlAs) และ GaAsP มีราคาถูกกว่า GaAlAs แต่มีคุณภาพในการทำงานต่ำกว่า

สารประกอบสารกึ่งตัวนำที่สำคัญมีคุณภาพสูง คือ อินเดียมแกลเลียมอะเซไนด์ฟอสไฟด์ (InGaAsP) ทำจากอินเดียมแกลเลียมอะเซไนด์และฟอสฟอรัสรวมกันด้วยจำนวนของอินเดียม (indium) บวกกับแกลเลียม (gallium) อย่างเท่าๆกัน และเติมอะเซไนด์กับฟอสฟอรัสลงไปด้วย ผลของสารประกอบนี้คือเขียนได้เป็น  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  เมื่อ  $x$  เป็นสัดส่วนของอินเดียมและ  $y$  เป็นสัดส่วนของอาร์เซนิค ซึ่งพวกนี้จะถูกเรียกว่า ควอเตอ์นารี (quaternary) เป็นพวกที่มี 4 สารประกอบพวกนี้ทำยากกว่าเตอ์นารี (ternary) พวก 3 สารประกอบคือ GaAlAs ซึ่งให้ความยาวคลื่น 1300 และ 1550 nm LED บ่อยครั้งใช้ในระยะสั้น ๆ โดยใช้ความยาวคลื่น 1300 nm เพื่อความสะดวกและการแตกกระจายของสีน้อย แต่ 1550 nm นั้นความแตกกระจายของสีมีมากกว่า

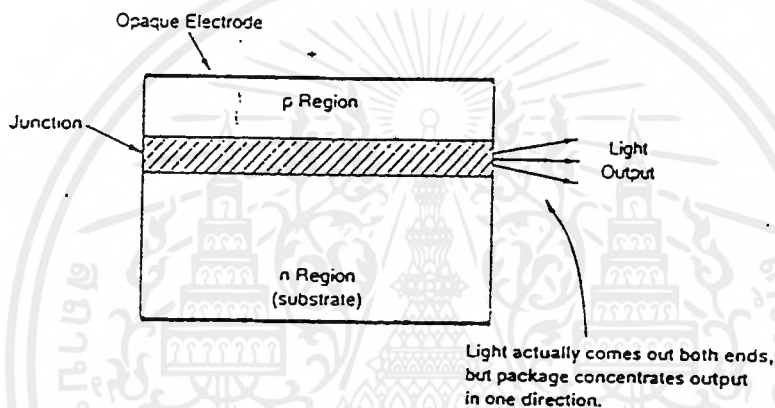
คุณลักษณะอื่นๆ ของ LED ขึ้นอยู่กับรูปทรงของอุปกรณ์และโครงสร้างภายใน ซึ่งไม่สามารถอธิบายทิศทางของการเกิดแสงได้ ในความจริงแล้วตัวอย่างการเกิดแสงในทุกทิศทางแสดงดังรูปที่ 4.6 และรูปแบบส่วนใหญ่จะเกิดการปล่อยแสงจากผิวหน้าของมัน แสงที่ถูกปล่อยออกมาจะเป็นรูปทรงกรวยแบบกว้างๆ ซึ่งความเข้มของแสงจะตกมากและจะเป็นไปตามมุมของรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า เป็นการกระจายแบบแลมเบิร์ตเทียน (Lambertian distribution)



รูปที่ 4.6 ลักษณะการส่องแสงของ LED

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างพื้นฐานที่แตกต่างกันคือไดโอดที่เปล่งแสงทางขอบ (edge emitter diode) ดังแสดงในรูป 4.7 บริเวณที่สัมผัสกับคุณลักษณะของไฟฟ้าจะครอบคลุมทั้งด้านบนสุดและล่างสุดของขอบอิมิตเตอร์ ดังนั้นแสงจึงไม่สามารถออกมาได้ LED จะจำกัดแสงให้อยู่ในแนวแคบในระนาบของรอยต่อ p/n ซึ่ง LED ที่สร้างขึ้นนี้จะถูกล้อมรอบด้วยบริเวณที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่า โดยการสร้างท่อนำคลื่น (waveguide) ซึ่งมีหน้าที่เหมือนกันกับเส้นใยแสง และทำการปล่อยแสงออกจากปลายทั้งสองซึ่งสามารถที่จะต่อเชื่อมเข้าไปในเส้นใยแสง ข้อเสียคือเมื่อปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้ LED เสื่อมหาย



รูปที่ 4.7 การปล่อยแสงของ LED แบบ edge-emitter diode

#### 4.1.4 แหล่งกำเนิดเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ (Semiconductor Laser Sources)

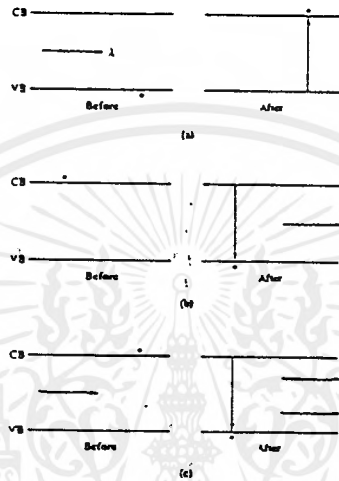
ถึงแม้ว่าเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์จะมีพื้นที่ในการปล่อยแสงเหมือน LED แต่จะให้แสงในช่วงที่ต่างกัน ซึ่งมีผลต่อพลังงานที่ดีกว่าและทิศทางที่แน่นอนกว่า

##### 4.1.4.1 การปล่อยแสงด้วยการกระตุ้น (Stimulated Emission)

แสงจะถูกปล่อยออกมาเมื่อมีอิเล็กตรอนอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าตกลงสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า ซึ่งจะให้พลังงานออกมา โดยจะปลดปล่อยแสงที่ปราศจากอิทธิพลจากภายนอกซึ่งเรียกว่า การปล่อยแสงตามธรรมชาติ (spontaneous emission) แต่ก็เป็นเพียงชั่วขณะเท่านั้น ถ้าเราใช้เวลารอบๆ การเกิดแสงอย่างการปล่อยแสงตามธรรมชาตินี้ โดยสมมติว่ามีอิเล็กตรอนที่อยู่บนระดับพลังงานบนซึ่งพร้อมที่จะปลดปล่อยพลังงานอยู่แล้ว และใส่พลังงานโฟตอนเข้าไป ซึ่งจะเป็นจำนวนของพลังงานที่อิเล็กตรอนต้องการที่จะปลดปล่อย โฟตอนภายนอกนี้สามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับพลังงานชั้นบนลงสู่ระดับพลังงานชั้นล่างและคายพลังงานออกมาเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นเดิมได้ กระบวนการนี้เรียกว่า การขยายแสงด้วยการกระตุ้น (Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation) หรือเรียกย่อๆ ว่า LASER ซึ่งแสดงได้ตามไดอะแกรมของการปล่อยแสงแบบต่างๆ ในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 a) การดูดกลืนพลังงาน b) การปล่อยตามธรรมชาติ  
c) การปล่อยโดยการกระตุ้น

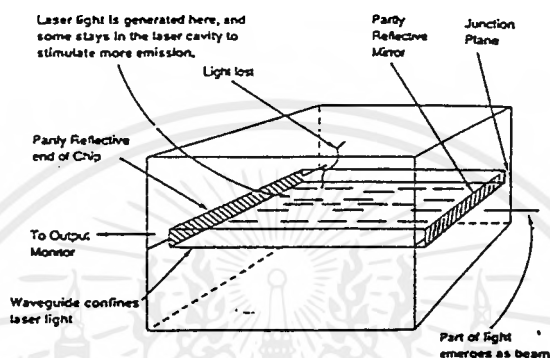
#### 4.1.4.2 Population Inversion

เงื่อนไขพิเศษที่ต้องสนใจของการเกิดเลเซอร์ คือ มีจำนวนอิเล็กตรอน หรืออะตอม หรือโมเลกุลอย่างมาก ในชั้นระดับพลังงานด้านบนมากกว่าชั้นระดับพลังงานด้านล่าง เงื่อนไขนี้เรียกว่า population inversion เนื่องจากตามปกติอิเล็กตรอนมากมายอยู่ในชั้นล่างอยู่แล้ว สิ่งนี้เป็นสิ่งจำเป็นเนื่องจากอะไรก็ตามที่อยู่ในระดับพลังงานชั้นล่างนั้นสามารถดูดกลืนแสงถูกปล่อยออกมาได้ โดยจะมีการดูดกลืนแสงเร็วกว่าการปล่อยแสง ถ้ามีเงื่อนไขนี้เกิดขึ้น การกระตุ้นให้เกิดการปล่อยแสงก็จะหยุดลงในทุกทิศทาง

#### 4.1.4.3 การจัดรูปของลำเลเซอร์ (Laser Beam Formation)

ลำแสงเลเซอร์ถูกจัดรูปแบบโดยอุปกรณ์สำหรับเพิ่มค่าการเรโซแนนซ์ (resonator) ซึ่งเป็นตัวจำกัดขอบเขตของแสงและทำให้ผ่านไปมาอีกครั้งในตัวกลางที่ถูกกระตุ้น ดังรูปที่ 4.9 สำหรับเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ เรโซเนเตอร์นี้สามารถทำได้จากส่วนของกระจกที่ขอบแต่ละด้านของ

บริเวณที่อะตอมถูกกระตุ้นนั้นอยู่แสงที่ถูกปล่อยออกมาจะเคลื่อนไปข้างหน้าตรงไปยังกระจกด้านหนึ่งแล้วจะสะท้อนกลับและเป็นอย่างนี้ต่อไปแสงที่ถูกกระตุ้นให้ปล่อยอิเล็กตรอนจะรวมเข้ากันกับแสงที่ผ่านระนาบของรอยต่อแสงที่ถูกปล่อยในทิศทางอื่นๆ จะรั่วไหลออกไปดังนั้นแสงที่มีการเดินทางกลับมาตลอดทางแคบๆ ของบริเวณที่ถูกกระตุ้นจะถูกขยายและสร้างขึ้นเป็นลำแสงเลเซอร์

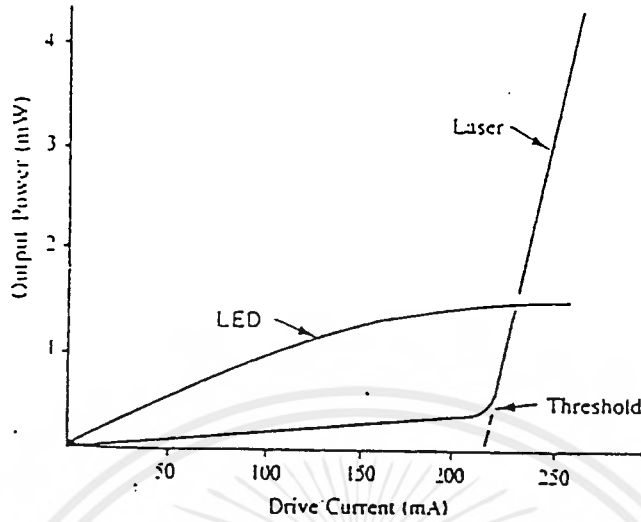


รูปที่ 4.9 พื้นฐานการเกิดเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์

ส่วนปิดกั้นที่เห็นแสงอยู่นั้นเป็นขบวนการที่ยุงยากเล็กน้อยกระจกจะอยู่ส่วนขอบของ โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำเรียกว่าแฟคเต็ท (facts) ซึ่งแฟคเต็ทตอนท้ายจะทำให้แสงทะลุออกมาแต่จะครอบคลุมการสะท้อนของแสงส่วนใหญ่ ในทางปฏิบัติแฟคเต็ทที่อยู่ด้านหน้าจะไม่ทำให้แสงออกมา แต่จะเป็นตัวสะท้อนไปมาในสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำเป็นสารซึ่งถูกกระตุ้นให้ปล่อยแสงมาก ดังนั้นที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จึงจำเป็นต่อการสร้างลำแสงเลเซอร์

#### 4.1.5 ความแตกต่างของแหล่งกำเนิด (Functional Differences)

สิ่งที่แตกต่างกันระหว่าง LED กับเลเซอร์ไดโอดนั้นมีอยู่ 2 ประการคือ ถ้าเป็น LED นั้นจะไม่มีตัวเรโซเนเตอร์ แต่ก็สามารถสร้างให้มีขนาดเล็กได้และเลเซอร์นั้นต้องทำที่แรงขับเคลื่อนสูงเพื่อที่จะได้ความหนาแน่นของเลเซอร์มากเอาที่พุทของเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ขึ้นอยู่กับแรงขับเคลื่อนที่ผ่านทะลุตัวมัน โดยต้องมีแรงดันไบอัสที่มีค่าแรงขับเคลื่อนอย่างน้อยตามต้องการ และยาวนานที่ค่ากระแสต่ำๆ เลเซอร์ที่ถูกปล่อยออกมาจะอ่อนเหมือนการปล่อยแสงตามธรรมชาติ (spontaneous emission) ซึ่งมีประสิทธิภาพเหมือนกับ LED ถ้ากระแสที่ให้ผ่านค่าขีดเริ่มไปแล้วนั้นก็จะเป็นแสงเลเซอร์และเพิ่มความเข้มข้นเรื่อยๆ ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของกระแสกับกำลังของแสงที่ปล่อย

ความสัมพันธ์ของกระแสกับกำลังงานของแสงที่ปล่อยสามารถหาได้จากสมการด้านล่างคือ

$$p = \frac{N \cdot hc}{\lambda} = (\eta \cdot E_g \cdot I) / e \dots\dots\dots (1)$$

เมื่อ N คือ จำนวนของการประจุต่อวินาที

$\eta$  คือ อัตราส่วนของแพร์กระจายประจุที่ถูกรวมตัว

$E_g$  คือ พลังงานแถบหวงห้ามของสารในหน่วยของจูล

ความแตกต่างภายใน โครงสร้างนี้เป็นส่วนสำคัญเลเซอร์นั้นสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่า LED ธรรมดาและให้กระแสที่สูงด้วยดังนั้นเลเซอร์จึงมีกำลังงานมากกว่า LED มากความเข้มข้นของแสงที่ปล่อยออกมานั้นจะเป็นลำแคบกว่าแสงจาก LED ซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 4.1 ที่กล่าวมาแล้ว

4.1.6 ความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอด

แสงเลเซอร์ของเลเซอร์ไดโอดนั้นขึ้นอยู่กับสิ่งที่ประกอบขึ้นของชั้นรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ เหมือนกับ LED สารประกอบสารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่ที่นำมาทำเป็นแหล่งกำเนิดแสงสำหรับเส้นใยนำแสงจะใช้สารประกอบสารกึ่งตัวนำหมู่ที่ 3 รวมกับหมู่ที่ 5 เช่น แกลเลียมอะเซไนด์ (Gallium arsenide) หรือ อินเดียมอะเซไนด์ (Indium phosphide) โดย

- |                                                                             |                             |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 1. $\text{Ga}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{As}$ บน GaAs                          | ความยาวคลื่น 780 ถึง 850 nm |
| 2. $\text{In}_{0.73}\text{Ga}_{0.27}\text{As}_{0.58}\text{P}_{0.42}$ บน InP | ความยาวคลื่น 1310 nm        |
| 3. $\text{In}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}\text{As}_{0.9}\text{P}_{0.1}$ 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 ถึง 3 nm ก็ใหญ่เพียงพอที่จะทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการแตกกระจายของสัญญาณสเปกตรัมของเลเซอร์ไดโอด ถึงแม้ว่าจะมีความเข้มข้นของกำลังงานมากที่สุดที่ความยาวคลื่นหนึ่งก็ตาม แต่ในเลเซอร์ไดโอดการเกิดเลเซอร์ออสซิลเลชัน (Laser oscillation) ที่ต่อเนื่องกันทำให้เกิดอัตราขยายซึ่งมีผลต่อการเกิดความยาวคลื่นอื่นๆ ด้วย แต่ความยาวคลื่นเดียวเท่านั้นที่มีอัตราขยายสูงสุดระหว่างระยะทางของตัวเรโซเนเตอร์ที่กำเนิดเลเซอร์ โดยความยาวคลื่นหาได้จาก

$$2D = N\lambda \dots\dots\dots (3)$$

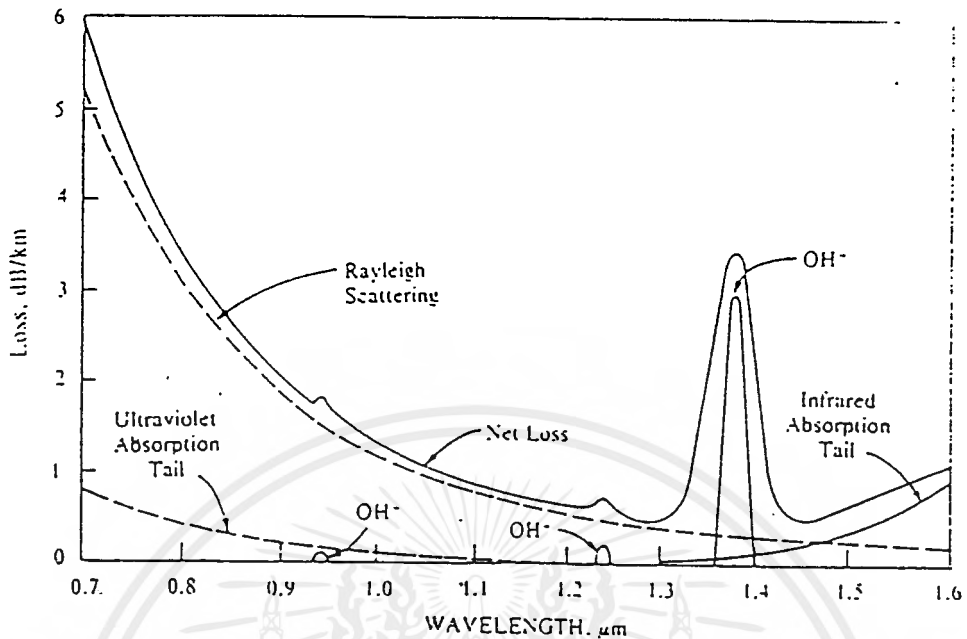
เมื่อ 2D คือ ระยะไปกลับในระหว่างเรโซเนเตอร์ในหนึ่งรอบ

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, 1.5 ไมโครเมตร โดยแสดงไว้ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียในเส้นใยนำแสงน้อย วัสดุที่ใช้ทำแหล่งกำเนิดนั้นสามารถทำให้มีพฤติกรรมตามช่องทางนี้ได้



รูปที่ 4.11 Fiber Optic transmission windows

อัตราส่วนของการได้ไปในสารที่เป็นวัสดุที่ใช้ทำเลเซอร์ไดโอดจะสามารถหาช่องว่างแถบพลังงาน (band gap) ของสารผสมนั้นได้ ซึ่งจะทำได้ความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมาด้วย สมการด้านล่างนี้ใช้ในการหาความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมาเมื่อทราบค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารผสมนั้น

$$\lambda (\mu\text{m}) = 1.240 / E_g (\text{eV}) \quad \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นที่ต้องการหา

$E_g$  คือ ช่องว่างแถบพลังงานในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์

#### 4.2.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของตัวส่งแสง

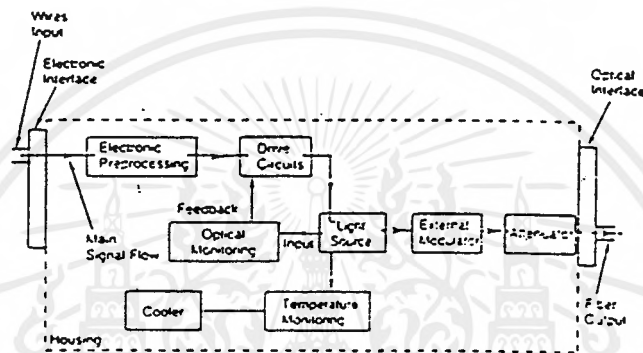
ในตัวเรือนของตัวส่งแสงจะต้องประกอบไปด้วยอุปกรณ์พื้นฐานที่จะกล่าวถึงซึ่งส่วนประกอบเหล่านี้สามารถแสดงให้เห็นได้ในรูปที่ 4.12

1. ตัวเรือน (housing)
2. ส่วนเชื่อมต่อทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic interfaces)
3. ส่วนเชื่อมต่อทางแสง (Optical interfaces)
4. วงจรขับ (drive circuitry)
5. ส่วนควบคุมอุณหภูมิและส่วนหล่อเย็น (Temperature sensing and control)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

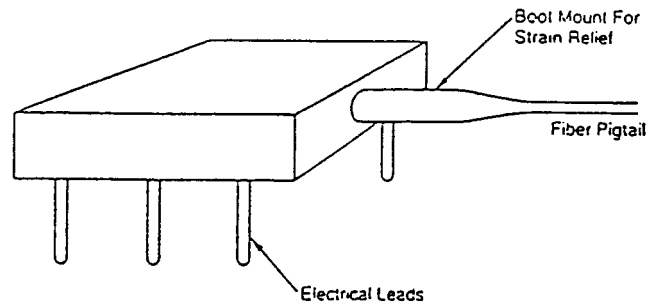
6. กระบวนการทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic processing)
7. ส่วนของมอนิเตอร์ทางแสง (Optical Monitoring)
8. ตัวลดทอนสัญญาณ (Attenuator)

โดยบางครั้งอาจจะมีอุปกรณ์ส่วนอื่น ๆ เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เช่น External modulator ในกรณีที่แหล่งกำเนิดแสงไม่สามารถมอดูเลตแสงได้เอง หรือส่วนของการลดทอนสัญญาณในกรณีที่มีการติดต่อสื่อสารในระบบสั้นๆ

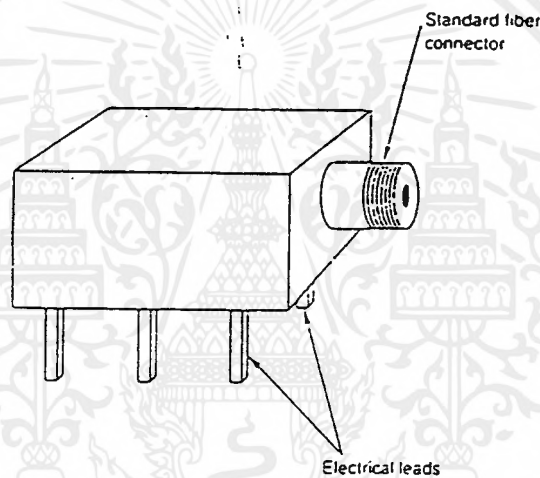


รูปที่ 4.12 ส่วนประกอบในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสง

1. ตัวเรือน (housing) ตัวเรือนนี้จะมีรูปแบบอย่างง่ายๆ โดยจะออกแบบเป็นกล่องสี่เหลี่ยมเพื่อความสะดวกซึ่งจะมีหัวต่อ 2 ส่วน คือ ส่วนเชื่อมต่อทางแสงและส่วนเชื่อมต่อทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งส่วนใหญ่จะออกแบบเป็นมาตรฐาน
2. ส่วนเชื่อมต่อทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic interfaces) ส่วนนี้อาจจะเป็นสายไฟ (wire) ธรรมดา หรือเป็นขั้วยื่นออกมาจากรูปทรงของหีบห่อ (packages) ตัวส่งแสงอย่างง่ายสามารถที่จะจับกระแสด้วยสัญญาณไฟฟ้าที่เข้าไปได้โดยตรง
3. ส่วนเชื่อมต่อทางแสง (Optical interfaces) เป็นการเชื่อมต่อระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและเส้นใยนำแสง ดังแสดงในรูป 4.13 ซึ่งเป็นหัวต่ออยู่ในตัวเรือน แสงจะถูกส่งไปยังเส้นใยนำแสงโดยเลนส์ข้างในที่ประกอบด้วย collimating lens และส่วนของเส้นใยนำแสง ส่วน Fiber Pigtail จะทำการรวมแสงจากบริเวณที่มีแสงเปล่งออกมาและส่งไปข้างนอกซึ่งสามารถต่อเข้ากับเส้นใยนำแสงภายนอกได้



a) Transmitter with Fiber Pigtail



b) Transmitter with Integral Connector

รูปที่ 4.13 ส่วนเชื่อมต่อทางแสงของตัวส่ง

4. วงจรขับ (Drive circuitry) ขึ้นอยู่กับชนิดของการใช้งาน ขนาดข้อมูล และแหล่งกำเนิดแสง LED สามารถถูกขับได้โดยตรง โดยอาศัยแหล่งกำเนิดกระแส (current source) ที่เหมาะสม (ถึงแม้ว่าสัญญาณส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแรงดันและจะต้องถูกแปลงให้เป็นกระแส) อย่างไรก็ตามเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์จะต้องถูกไบอัสจนถึงระดับกระแสที่ใกล้เคียงกับค่า laser threshold

5. กับกระแสขับที่มีค่ามากกว่า threshold current กำลังเอาต์พุตลดลงขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น กำลังเอาต์พุตจะถูกทำให้หมดไปภายในเลเซอร์ ดังนั้นช่วงชีวิต (life time) ของเลเซอร์จะลดลงตามอุณหภูมิทำงานการเปลี่ยนแปลงในเรื่องลักษณะการทำงานของเซมิคอนดักเตอร์ อันได้แก่ threshold current กำลังเอาต์พุตและความยาวคลื่นจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ค่า threshold current จะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โปเนนเชียลตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ( $T = (T_1 - T_2) / T_1$  ซึ่ง  $T_1$  คืออุณหภูมิคอนเริ่มค้น  $T_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คืออุณหภูมิสุดท้ายเนื่องจากสัญญาณเอาต์พุตเป็นส่วนส่วนควบคุมอุณหภูมิและส่วนหล่อเย็น (Temperature sensing and cooling) คุณความยาวคลื่นมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิใน คิวนี้หักเหของสารกึ่งตัวนำและในช่องว่างเลเซอร์ (laser cavity)

Thermoelectric cooler ในตัวส่งแสงสามารถทำให้การทำงานมีความแน่นอนที่อุณหภูมิคงที่ การควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์สามารถลดความไม่ติของกำลังเอาต์พุตอันเนื่องมาจากอุณหภูมิจะทำให้กำลังเอาต์พุตที่คงที่เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการทำงานของอุปกรณ์รับแสง ขณะที่กำลังเอาต์พุตที่ ตรวจวัดได้ลดลง อัตราบิตผิดพลาดเคลื่อน (bit-error rate) เพิ่มขึ้นในระบบดิจิทัลและ s/n ratio ลดลง ในระบบอนาล็อกจะทำให้การทำงานของอุปกรณ์กำเนิดแสงลดลงและขึ้นตอนนี้จะทำให้ ความยาวคลื่นของแสงคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง กระแสขีดเริ่มมีค่าคงที่ (threshold current)

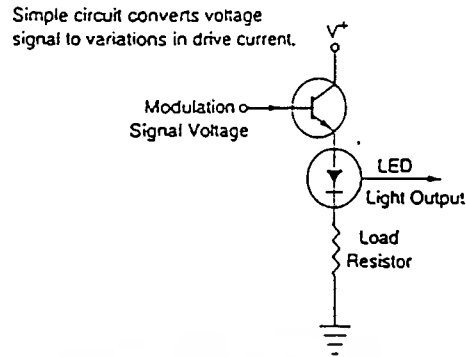
6. กระบวนการทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic processing) เป็นกระบวนการขั้นต้นที่วงจรขับ ของตัวส่งแสงจะทำการใส่สัญญาณไฟฟ้าทางอินพุตให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมสำหรับทำการขับแหล่ง กำเนิดแสง ตัวอย่างเช่นการแปลงสัญญาณจากแรงดันซึ่งจะขับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไปเป็นกระแสซึ่งจะ มอดูเลต LASER และ LED

7. ส่วนของมอนิเตอร์ทางแสง (Optical Monitoring) ตัวส่งแสงชนิดเลเซอร์ประกอบด้วยวง จรเอาต์พุตที่มีเสถียรภาพ โฟโตดีเทคเตอร์จะตรวจจับแสงที่แผ่ออกจากส่วนหน้าของเลเซอร์และขับวง จรการป้อนกลับ (Feedback circuit) ซึ่งจะปรับกระแสขับจนกำลังเอาต์พุตทั้งหมดคงที่

นอกจากนี้ตัวลดทอนสัญญาณ (Attenuator) ตัวส่งแสงจะสร้างระดับกำลังที่เป็นมาตรฐาน แต่ ในบางกรณีระดับกำลังเหล่านี้อาจจะสูงกว่าที่ต้องการเนื่องจากตัวรับแสงสามารถรับกำลังอินพุตได้ จำกัด ในบางครั้งจะใช้ตัวลดทอนสัญญาณเพื่อที่จะลดเอาต์พุตของตัวส่งแสงให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย สำหรับตัวรับแสง

#### 4.2.3 การออกแบบตัวส่งแสงโดยใช้ LED อย่างง่าย

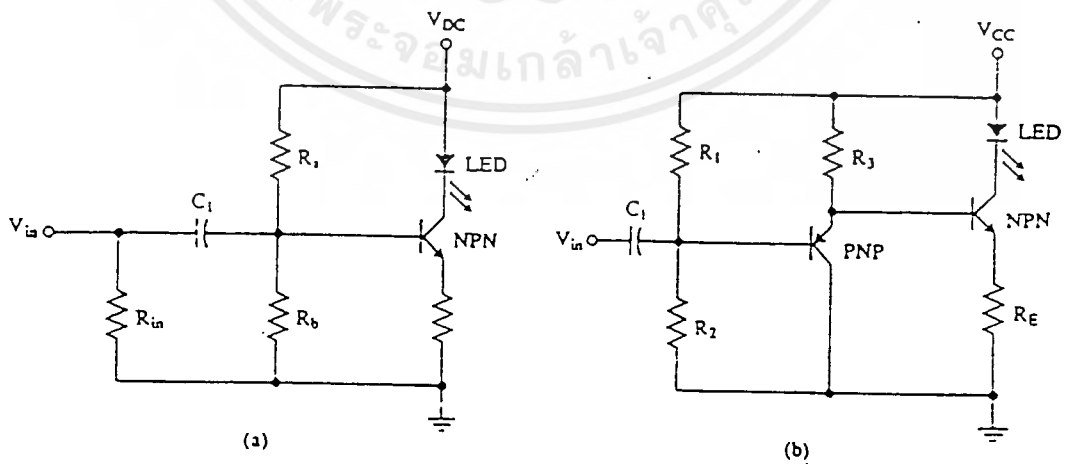
LED เป็นแหล่งกำเนิดที่จะเปล่งแสงเมื่อทำการไบอัสแรงดันซึ่งมีค่าอย่างน้อยสูงกว่าแรงดัน ในช่องว่างหรือช่วงคิฟลิทชัน โดยมีค่าประมาณ 1.5 โวลต์สำหรับ LED ที่ทำจาก GaAlAs ความยาวคลื่น 800-900 nm และประมาณ 1 โวลต์สำหรับ GaAsP ที่มีความยาวคลื่น 1300 nm วงจรขับ สำหรับแหล่งกำเนิด LED แสดงดังรูปที่ 4.14



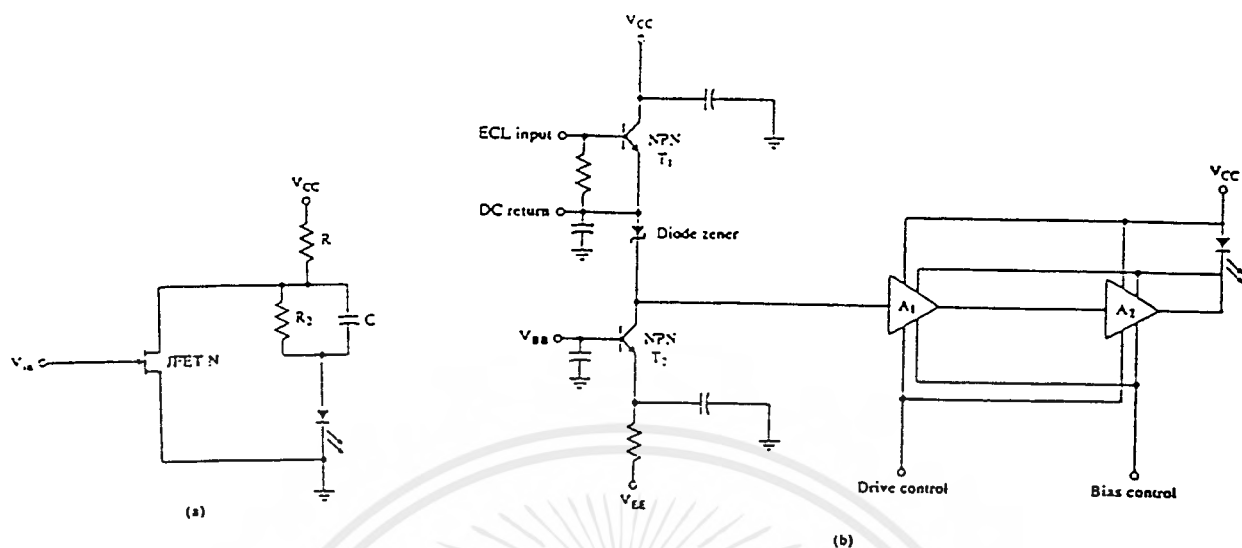
รูปที่ 4.14 วงจรขับอย่างง่ายสำหรับ LED source

#### 4.2.4 การออกแบบตัวส่งแสงโดยใช้เลเซอร์ไดโอดอย่างง่าย

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์จะเหมือนกับ LED เนื่องจากทั้งคู่เป็นแหล่งกำเนิดแบบใช้สารกึ่งตัวนำทั้งคู่ แต่เลเซอร์จะให้แสงออกมาก็ต่อเมื่อแรงขับกระแสสูงกว่าค่าแรงขับกระแสขีดเริ่ม (threshold current) เนื่องจากต้องการกระแสขับที่มากดังนั้นตัวต้านทานที่ใช้จำกัดกระแสจึงต้องมีค่าน้อย โดยค่าแรงขับกระแสอยู่ในช่วง 100-200 mA และแรงเคลื่อนไฟฟ้า 1.6-1.8 V วงจรขับของเลเซอร์ไดโอดในรูปที่ 4.15 เป็นการใช้ในทางอนาล็อกและรูปที่ 4.16 ใช้ในทางดิจิทัล ซึ่งในวงจร 4.16a ใช้วงจรขับแบบแบ่งกระแส (shunt driver) และทรานซิสเตอร์แบบฟิลด์เอฟเฟ็ค (field effect transistor) โดยค่า  $R_2$  และ  $C$  ใช้ในการไบอัสใช้กับทรานซิสเตอร์ โครงสร้างของวงจรมีสามารถที่จะมอดูเลตแสงได้มากถึงหน่วยของจิกะ ( $10^9$ )



รูปที่ 4.15 วงจรขับของเลเซอร์ไดโอดแบบอนาล็อก



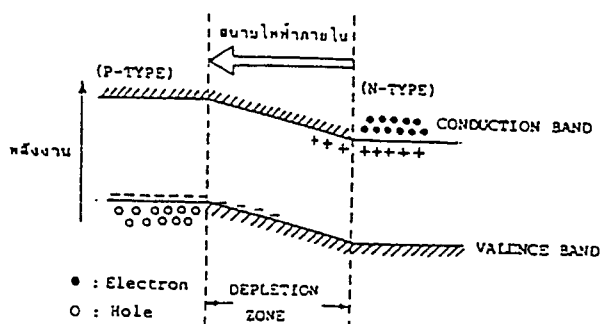
รูปที่ 4.16 วงจรขั้วเลเซอร์ไดโอดแบบคิติดอล

#### 4.3 อุปกรณ์รับแสง

การรับแสงหมายถึงการเปลี่ยนแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ในการทำงานนี้แบ่งออกได้เป็น 2 วิธี วิธีที่หนึ่งเป็นการเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นไฟฟ้าโดยตรงซึ่งเรียกวิธีนี้ว่า Photo electric effect โดยใช้กระบวนการดูดพลังงานนั้นคือ เมื่อมีแสงมาตกกระทบสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์แบนด์จะเลื่อนขึ้นไปอยู่ที่คอนดักชันแบนด์ แต่การเลื่อนขึ้นไปนี้เป็นแต่เพียงอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เท่านั้น และในที่สุดจะกลับมารวมกับโฮลอีกครั้งหนึ่งในแถบวาเลนซ์แบนด์ ทำให้ไม่ได้รับ photo electric effect ด้วยเหตุนี้เพื่อที่จะเปลี่ยนแสงให้เป็นกระแสไฟฟ้า จะต้องใช้สภาพการแยกกันของอิเล็กตรอนกับโฮลก่อนที่มันจะมารวมตัวกัน

วิธีที่สองทำโดยการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานความร้อนแล้วจึงเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า Sensitive at effect โดยทั่วไปจะมีการตอบสนองช้ามากและความไวไม่ดันทักจึงใช้กับเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) และ โบ โรมิเตอร์และอื่นๆ แต่ไม่นำมาใช้ในการสื่อสารด้วยแสง

สำหรับอุปกรณ์รับแสงสารกึ่งตัวนำเช่นเดียวกับแหล่งกำเนิดแสง นั่นคือเพื่อที่จะแยกอิเล็กตรอนกับโฮลนั้นโดยทั่วไปใช้ PN-junction ซึ่งที่รอยต่อของ P-N นั้นจะเกิดสนามไฟฟ้าในที่ว่างขึ้น โดยมันจะถูกดึงด้วยอิเล็กตรอนของ N-type ของโฮลของ P-type ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบและบวกตามลำดับ เป็นผลทำให้ไม่มีอิเล็กตรอนและโฮลขึ้นตรงบริเวณรอยต่อนี้ เรียกว่า Depletion zone ดังในรูป 4.17



รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะของ Depletion zone

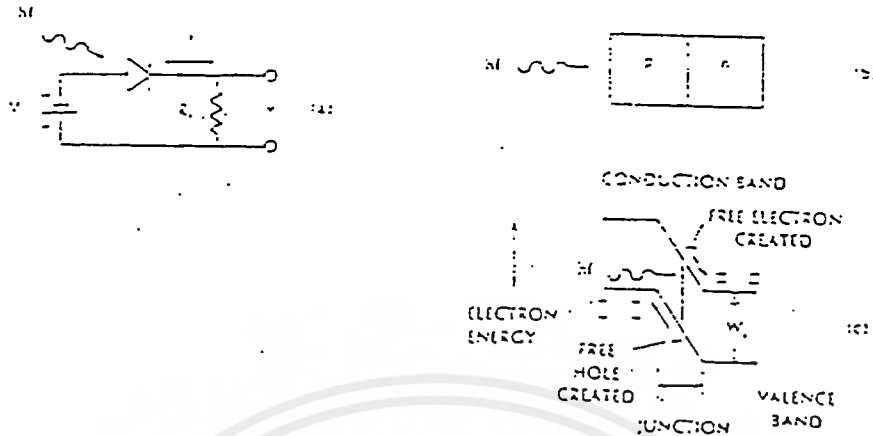
อุปกรณ์รับแสงที่ใช้ในการสื่อสารทางแสงส่วนใหญ่จะเป็นพวกโฟโตดีเทคเตอร์ (photodetector) โดยทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานทางแสงเป็นพลังงานทางไฟฟ้า โฟโตดีเทคเตอร์ในอุดมคติจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

1. จะต้องมีสามารถในการรับแสงที่เบาบางที่ตกกระทบอุปกรณ์
2. จะต้องมีประสิทธิภาพทำงานในช่วงใกล้อินฟราเรด (850, 1300, 1500 nm)
3. จะต้องมีความเร็วเพียงพอต่อการเปลี่ยนแสงเป็นอิเล็กตรอน
4. จะต้องมีขนาดเล็กเข้ากับเส้นใยนำแสงได้ดี
5. จะต้องมีราคาต่ำ
6. จะต้องมีไม่ไวต่อสิ่งแวดล้อม

โดยปกติทั่วไปจะต้องใช้ตัวรับแสงชนิดที่เรียกว่า PN Photodiode, PIN Photodiode และ APD (Avalanche Photodiode)

#### 4.3.1 พีเอ็นโฟโต้ไดโอด (PN Photodiode)

เป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่าโฟโต้ไดโอดจะทำงานเมื่อมีแรงดันไบอัสให้กับตัวโฟโต้ไดโอดแบบไบอัสกลับ (reverse bias) ตามรูปที่ 4.18 แสดงลักษณะของ PN photodiode



รูปที่ 4.18 a) เมื่อป้อนแรงดัน reverse bias

b) ลักษณะของ PN junction

c) แสดงระดับพลังงาน

เมื่อให้แรงดันไฟไปอัสกลับจะทำให้ค่าพลังงานกำแพงศักย์ (energy barrier) ระหว่างรอยต่อพีและเอ็นเพิ่มขึ้นทำให้อิเล็กตรอนอิสระทางด้านเอ็นและโฮลอิสระทางด้านพีไม่สามารถข้ามบริเวณที่เกิดกำแพงศักย์ได้จึงไม่มีกระแสไหล บริเวณรอยต่อที่ไม่มีประจุใดๆเลยนี้เรียกว่า Depletion zone ตามที่กล่าวมาแล้ว บริเวณความต้านทานสูงเป็นผลให้โวลเตจทั้งหมดที่ตกคร่อมไดโอดจะตกคร่อมบริเวณนี้เกือบทั้งหมด

พิจารณารูปที่ 4.18 c) เมื่อกลุ่มก้อนโฟตอนถูกดูดกลืนในรอยต่อหลังจากที่ผ่านด้านพีมาแล้ว การดูดกลืนพลังงานทำให้อิเล็กตรอนข้ามแถบช่องว่างพลังงาน (band gap) จากวาเลนซ์แบนด์ไปยังคอนดักชันแบนด์ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระและจะทำให้โฮลออกจากวาเลนซ์แบนด์ ดังนั้นจะมีประจุอิสระที่ถูกสร้างขึ้นจากการดูดกลืนโฟตอน ซึ่งอิเล็กตรอนจะเคลื่อนตัวลงไปยังกำแพงศักย์และโฮลก็จะเคลื่อนที่ไปยังกำแพงศักย์ซึ่งเป็นสาเหตุให้กระแสไหลผ่านวงจรรายนอกเหมือนกับการปลดปล่อยแสงของอิเล็กตรอน ซึ่งในกรณีนี้จะเกิดกระแสไหลในหลอดไฟได้ไดโอดเมื่อโฮลและอิเล็กตรอนรวมตัวกันใหม่ที่บริเวณนั้นจะเกิดสนามไฟฟ้าน้อยๆ ซึ่งจะทำให้ประจุต่างๆ หลุดเคลื่อนที่ ทำให้กระแสหยุดไหล นอกจากนี้ประจุพาหะจะถูกสร้างขึ้นใกล้ๆ Depletion zone และมันสามารถที่จะแพร่ผ่านบริเวณนี้ไปได้ ดังนั้นจะเกิดสนามไฟฟ้าจำนวนมากที่บริเวณรอยต่อทำให้มีกระแสจากภายนอกเกิดขึ้น

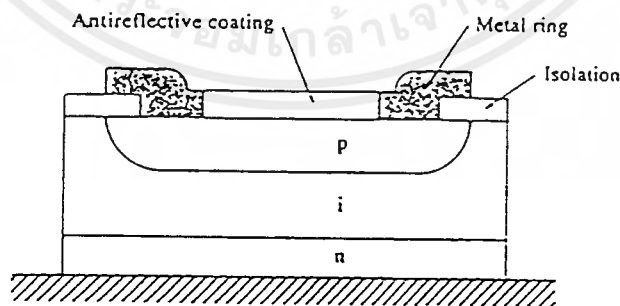
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 พีไอเอ็นโฟโตไดโอด (PIN photodiode)

พีไอเอ็นโฟโตไดโอดเป็นอีกชนิดหนึ่งที่ใช้ชั้นของ depletion-layer เข้ามาใช้ในการทำงาน เรียกเต็มๆ ว่า positive-intrinsic-negative เป็นที่นิยมใช้มากในระบบสื่อสารในการเป็นคิพคเตอร์รับแสง พีไอเอ็นจะมีชั้นอินทริเนติก (intrinsic) อยู่ระหว่างกลางของชั้นที่มีการโด๊ปเป็นพาหะบวก หรือ ด้านพี และชั้นที่มีการโด๊ปเป็นพาหะลบหรือด้านเอ็น มีโครงสร้างดังที่มีแสดงในรูปที่ 4.19 แสงจะตกกระทบบนด้านพีของโฟโตไดโอด และมีการดูดกลืนแสงโดยอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเข้าไปยังชั้นอินทริเนติกเลเยอร์ที่ไม่ประจุอยู่เลย ดังนั้นจึงมีความต้านทานสูงทำให้โวลเตจที่ตกคร่อมไดโอดจะตกคร่อมที่ชั้นนี้เกือบทั้งหมดและจะมีแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้ามาก โดยในระหว่างนั้นต้องมีการไบอัสแรงดันแบบกลับให้กับโฟโตไดโอดด้วย โดยในการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลนั้นต้องใช้พลังงานที่เพียงพอ พลังงานโฟตอนที่ใช้ทำให้เราทราบค่าของความยาวคลื่นคัทออฟ (Cutoff wavelength) ไม่อย่างนั้นโฟโตไดโอดจะไม่เปลี่ยนแสงเป็นกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งค่าของความยาวคลื่นคัทออฟสามารถหาได้จากค่าแถบพลังงานช่องว่างของสารที่นำมาทำโฟโตไดโอด ได้ดังสมการ

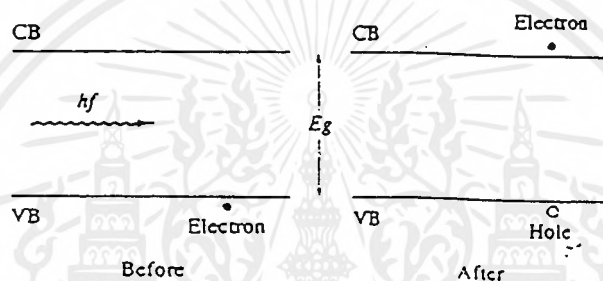
$$\begin{aligned} \lambda_c &= (h \cdot c) / E_g \\ &= 1.24 / E_g \end{aligned} \quad \text{..... (3)}$$

เมื่อ	$\lambda_c$	คือ	ความยาวคลื่นที่ทำงานในหน่วยไมโครเมตร
	$h$	คือ	ค่าคงที่ของพลังค์
	$c$	คือ	ความเร็วของแสง
	$E_g$	คือ	แถบพลังงานช่องว่างของสารที่นำมาทำโฟโตไดโอด (V)



รูปที่ 4.19 โครงสร้างของ PIN photodiode

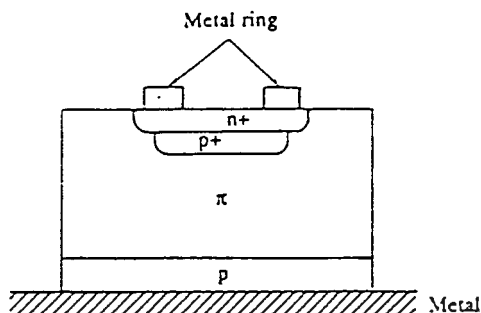
อิเล็กตรอนจะต้องอยู่ในชั้นของคอนดักชันแบนด์ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าหรือกระแสโฟตอน คู่อิเล็กตรอน-โฮลจะถูกแยกโดยค่าสนามไฟฟ้าในชั้นอินทรินสิคเลเยอร์ ความหนาของชั้นอินทรินสิคเลเยอร์ควรจะบางแต่กว้างสำหรับการดูดกลืน (บริเวณที่ทำให้เกิดประจุลบ) ตามรูปที่ 4.20 ความบางเป็นส่วนสำคัญเนื่องจากมันจะอำนวยความสะดวกในการคกกระทบของโฟตอนแล้วสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นมาบริเวณด้านอื่นควรจะแคบมากๆ อิเล็กตรอนจะได้ไม่เคลื่อนที่ออกจากอุปกรณ์ PIN photodiode จะใช้ในการสื่อสารระยะสั้นๆ และมีการมอดูเลทด้วยความถี่ต่ำเหมาะสำหรับเป็นตัวรับของ LED ซึ่งปกติจะใช้แรงดันไบอัสกลับ 7-10 โวลต์



รูปที่ 4.20 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสง

#### 4.3.3 อะวอลานซ์โฟโตไดโอด (avalanche photodiode)

อุปกรณ์รับแสงชนิดนี้จะทำงานเมื่อมีแรงดันไบอัสที่สูงมากตามปกติแล้วจะมากกว่า 300 โวลต์โดยมีภาคขยายหรือการเพิ่มขึ้นอย่างทวีคูณของกระแสโฟโต้ที่เกิดขึ้น APD หรืออะวอลานซ์โฟโตไดโอดนี้เหมาะสำหรับการสื่อสารที่ใช้ระยะทางไกลๆ และความถี่ที่มอดูเลทสูง (ประมาณ 100 MHz) ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้กับแหล่งกำเนิดที่เป็นเลเซอร์ไดโอด ซึ่งโดยปกติจะใช้โครงสร้างที่เรียกว่า reach-through construction APD (RAPD) โดยที่ reach-through avalanche photodiode จะเรียงจากด้านพี (P-type) ซึ่งมี  $p^+$  วางอยู่ และมี  $n^-$  วางอยู่ด้วยตามรูปที่ 4.21 โครงสร้างนี้เป็นโครงสร้างแบบ  $p^- \pi p n^-$  ชั้นของ  $\pi$  เลเยอร์นี้เป็นชั้นของอินทรินสิคเลเยอร์ซึ่งมีการโด๊ปเป็นชนิดพีด้วยโบรอนหรือฟอสฟอรัส ลักษณะของ APD เหมือนกับ PN-junction สนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากชั้น depletion region



รูปที่ 4.21 โครงสร้างของอะวาลานซ์โฟโตไดโอด

แสงที่เข้ามาจะต้องผ่านชั้น  $p^+$  และจะถูกดูดกลืนโดยชั้น  $\pi$  เลขอร์ โฟตอนจะสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น อิเล็กตรอนจะเคลื่อนลอยมาที่รอยต่อพีเอ็น ( $PN^+$  junction) ซึ่งมีสนามไฟฟ้าสูงซึ่งสนามนี้จะไปเร่งให้อิเล็กตรอน-โฮลเร็วขึ้นเป็นผลให้เกิดการชนกับคู่อิเล็กตรอน-โฮลคู่อื่นๆ ซึ่งการชนนี้จะเกิดขบวนการเพิ่มอย่างทวีคูณของพาหะ โดยนิยามไว้ว่า

$$M = \frac{1}{(1 - V/V_B)^n} \quad \dots\dots\dots (4)$$

เมื่อ  $V$  คือ แรงดันไบอัสกลับที่ใส่เข้าไป  
 $V_B$  คือ แรงดันพังทลาย (Breakdown voltage)  
 $n$  คือ ค่าคงที่ระหว่าง 3 กับ 6 ซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของสาร

ที่ทำอุปกรณ์รับแสง

จำนวนเฉลี่ยของการเกิดอิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดจากการสร้างโฟตอนต่อหนึ่งหน่วยความยาว เรียกว่า ไอออไนเซชันเรท (ionization rate) บอกถึงความแตกต่างสำหรับอิเล็กตรอนกับโฮล

#### 4.4 คุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง

ประสิทธิภาพของอุปกรณ์รับแสงประเมินได้จากคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ประสิทธิภาพทางควอนตัม (Quantum efficiency) ซึ่งแสดงว่าแสงที่รับมานั้นเปลี่ยนเป็นไฟฟ้าได้มากเท่าใดความไวการรับแสง (ระดับรับแสงต่ำสุดที่ต้องการสำหรับการส่งที่มีคุณภาพ) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการออกแบบระยะเวลาถ่ายทอดของระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงสัญญาณรบกวน (noise) ที่เกิดขึ้นและความเร็วของการตอบสนองการทำงาน สำหรับประสิทธิภาพทางควอนตัมกำหนดจากสารและโครงสร้างของอุปกรณ์รับแสง แต่สำหรับความไวการรับแสงนั้นจะเกี่ยวข้องกับขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก APD ใช้ปรากฏการณ์การขยายแบบอะวาลานซ์ตามที่กล่าวมาแล้วนั้น ดังนั้นจึงมีความไวสูงประมาณ 10-20 dB (10-100 เท่า) เมื่อเทียบกับโฟโตรีซิสเตอร์ธรรมดาที่สัญญาณรบกวนที่เกิดในอุปกรณ์รับแสงมีสิ่งๆที่เรียกว่า shot noise ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสโฟโต้ (photo current) ที่เกิดจากการกระตุ้นอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบทางเวลา โดย shot noise เป็นดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\text{shot noise current} = I_0 M^{2+F} \dots\dots\dots (5)$$

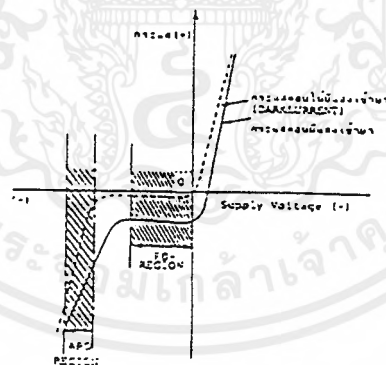
เมื่อ M คือ อัตราการขยายกระแสของอุปกรณ์รับแสง

$I_0$  คือ กระแสโฟโต้ในกรณีที่  $M = 1$

F คือ Excess noise figure มีค่ามากเมื่อเทียบกับ M

นั่นคือจากสมการจะเห็นว่าที่ระดับการรับแสงที่เท่ากันถ้าหากว่าทำให้แรงดันไบอัสแบบย้อนกลับที่ป้อนให้มีความสูงและทำให้อัตราการขยายกระแสเพิ่มขึ้นนั้นสัญญาณออก (output signal  $I_0 M^{2+F}$ ) จะเพิ่มขึ้นมากด้วย แต่ shot noise ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน

คุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสงโดยทั่วไปแสดงดังรูปที่ 4.22 จากรูปจะช่วยให้เข้าใจความแตกต่างของบริเวณการทำงานของ APD และ photodiode ได้ดี และในรูปนี้ได้แสดงการไหลของกระแสที่เรียกว่า dark current ที่เกิดในสภาพที่มีแรงดันไบอัสแบบกลับแต่ไม่มีแสงเข้ามา



รูปที่ 4.22 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้และกระแสโฟโต้

กระแส dark current นี้มีลักษณะพิเศษคือ มันจะเพิ่มขึ้นเร็วกว่าการเพิ่มขึ้นของสัญญาณออก (output signal) shot noise เป็นสิ่งที่เกิดจาก dark current c]และอื่นๆที่เป็นแหล่งต้นกำเนิด ในการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงนอกจากจะต้องคำนึงถึง shot noise นี้แล้วยังมี thermal noise

## บทที่ 5

### การออกแบบวงจรที่ใช้ในโรงงาน

ในส่วนของวงจรที่ใช้ในโรงงานนี้สามารถแบ่งเป็นส่วนสำคัญได้ 2 ส่วนใหญ่ๆ ดังนี้ คือ วงจรทางภาครับ (Transmitter circuit) วงจรทางภาครับ (Receiver circuit) โดยวงจรและหลักการของทั้งสองส่วนนั้นสามารถอธิบายได้โดยง่ายในรูปแบบของบล็อกไดอะแกรม ซึ่งจะกล่าวประกอบไปกับหลักการการทำงานของวงจรต่างๆ ในหัวข้อต่อไปนี้

#### 5.1 วงจรทางภาคส่ง

##### 5.1.1 วงจรปริแอมพลิไฟร์

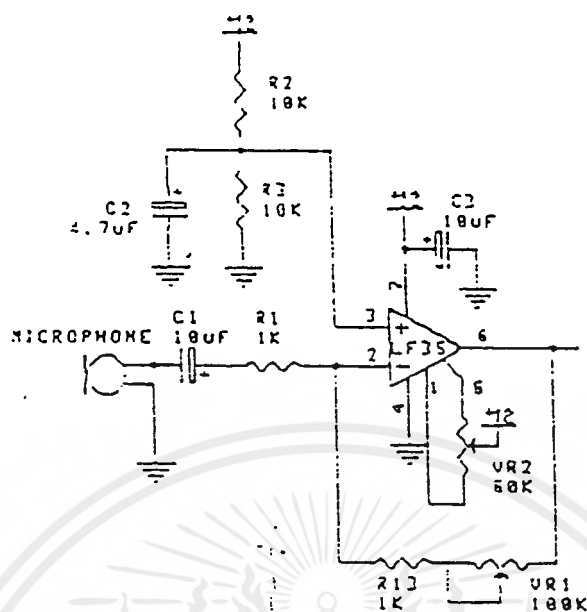
โดยทั่วไป ไมโครโฟนจะแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบอิมพีแดนซ์สูง (20 กิโลโอห์ม) เอาท์พุทสูง (20 mv) และแบบอิมพีแดนซ์ต่ำ (200 โอห์ม) เอาท์พุทต่ำ (2mv) ในแบบแรกนั้นไม่ค่อยนิยมใช้แม้จะมีเอาท์พุทสูงซึ่งจะทำให้สร้างวงจรขยายได้ง่าย แต่เพราะมีปัญหาในเรื่องไวต่อสเตรย์แมกเนติกฟิลด์ (Stray magnetic field) เนื่องจากมีอิมพีแดนซ์ที่สูง ส่วนแบบที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำจะแบ่งออกเป็นแบบไมสมดุลซึ่งจะมี 2 สาย โดยสายหนึ่งจะต่อลงกราวด์ อีกสายหนึ่งเป็นสายนำสัญญาณและแบบสมดุลซึ่งจะมี 3 สาย โดยเป็นกราวด์หนึ่งสาย ส่วนอีก 2 สายเป็นสายสัญญาณซึ่งจะนำไปต่อลักษณะคิฟเฟอเรนเชียลอินพุท ทำให้สามารถลดสัญญาณรบกวนที่รับมาระหว่างผ่านสายนำสัญญาณได้ แบบที่ในวงจรจะเป็นแบบอิมพีแดนซ์ไมสมดุลโดยวงจรปริแอมป์จะใช้ LF 357 ต่อในระบบอินเวอร์ตติ้ง (Inverting) และใช้ไฟเลี้ยงเดี่ยว (Single supply) สามารถปรับอัตราขยายได้ตั้งแต่ 1-100 เท่า ซึ่งมีลักษณะของวงจรวงจรดังรูปที่ 5.1

ตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะเป็นตัวกำหนดจุดคัทออฟ ที่ความถี่ต่ำของสัญญาณของออปโต ไอ (ที่ -3 dB) ถ้าเลือกใช้  $C_1$  เท่ากับ 10 ไมโครฟารัด จากสมการจะได้ว่า

$$\begin{aligned} f_1 &= 1 / (2\pi * R_1 * C_1) && \text{.....(1)} \\ &= 1 / (2\pi * 1000 * 10^{-6}) \\ &= 15.9 \text{ Hz} \end{aligned}$$

ค่าของตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะเป็นตัวผ่านสัญญาณเอซีไปสู่ภาคต่อไป จะมีค่าขึ้นกับจุดคัทออฟที่มีความถี่ต่ำและค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรภาคตัดไป เราสามารถประมาณค่าตัวเก็บประจุได้โดยให้มีค่าใหญ่ๆ ในที่นี้ให้ค่า  $C_1$  เท่ากับ 10 ไมโครฟารัด

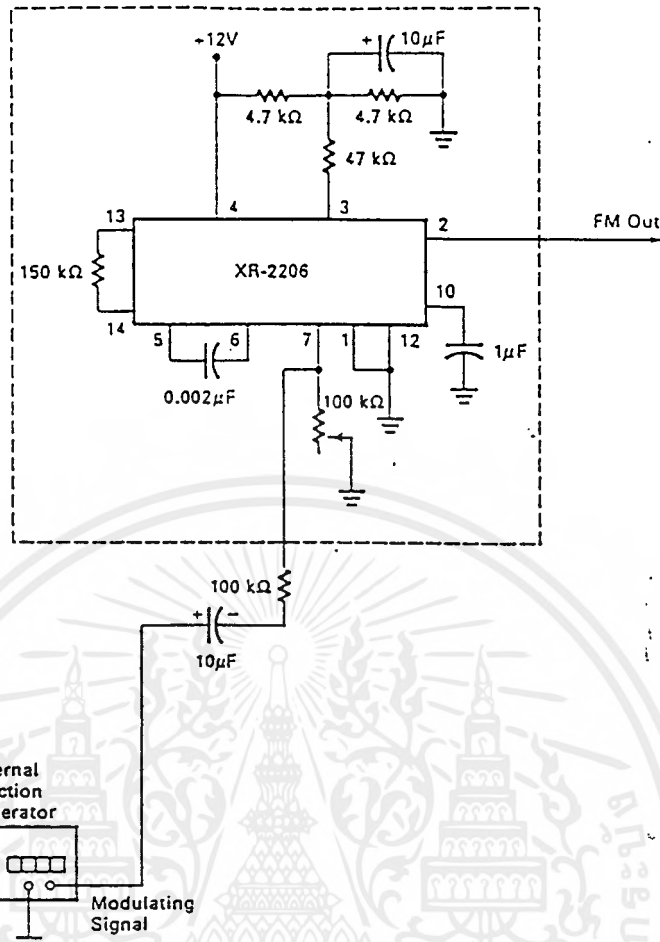
ค่าตัวต้านทาน  $R_2$  และ  $R_3$  ทำหน้าที่เป็นตัวแบ่งแรงดันเพื่อไบอัสตัวโอซีให้สามารถใช้ไฟเลี้ยงเดี่ยวได้



รูปที่ 5.1 แสดงวงจรปรับแอมป์ลิไฟร์

### 5.1.2 วงจรมอดดูเลทแบบ FM

วงจรที่ใช้ในโครงการนี้จะใช้ XR-2206 ไอซีกำเนิดความถี่โดยอาศัยแรงดันไฟตรงเป็นส่วนควบคุมความถี่ตามที่กล่าวมาแล้วนั้น วงจรมอดดูเลทแบบ FM ดังแสดงในรูปที่ 5.2 สังเกตว่า จะมีความต้านทาน 100 กิโลโอห์มและตัวเก็บประจุ 10 ไมโครฟารัด ต่ออยู่ที่ขา 7 ของไอซีเพื่อเป็นตัวปรับแอมป์ลิจูดของสัญญาณข้อมูลก่อนเข้าไอซี ซึ่งในส่วนของคลื่นพาห์สามารถทำได้เหมือนกับวิธี AM ซึ่งจะแตกต่างกันตรงที่ที่ขา 1 ต่อลงกราวน์ และขา 7 เป็นส่วนที่รับความถี่จากภายนอก

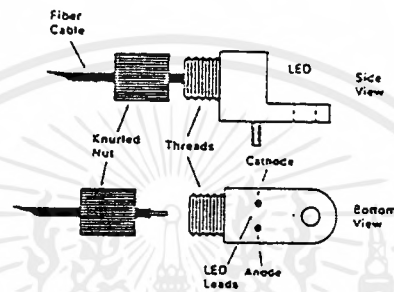
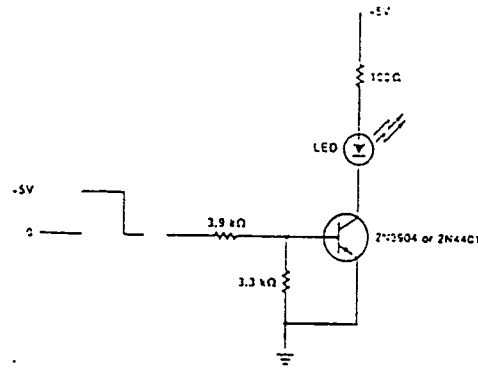


รูปที่ 5.2 แสดงวงจรมอดูเลตแบบ FM

### 5.1.3 วงจรขับ

วงจรขับในส่วนนี้จะทำหน้าที่รับสัญญาณที่ทำการมอดูเลตทั้งแบบ AM และ FM มา แล้วมาทำการมอดูเลตแบบอินเทนซิติ (Intensity modulate) คือ การเปลี่ยนแปลงสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสงที่มีขนาดความเข้มของแสงเปลี่ยนแปลงไปตามค่าแอมพลิจูด และความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า

พิจารณาวงจรขับสัญญาณอนาล็อก เราจะประมาณกระแสในวงจรที่ต้องใช้ขับตัว LED ให้อยู่ในช่วง 20-50 mA เพราะในช่วงความสัมพันธ์นี้ระหว่างกระแสที่ขับ LED กับกำลังที่แสงที่ออกมาจาก LED เองมีลักษณะเป็นเชิงเส้น และทำให้ได้กำลังแสงออกมาได้มากลักษณะวงจรขับที่ใช้เป็นรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงวงจรขับ LED ที่ใช้ในโรงงาน

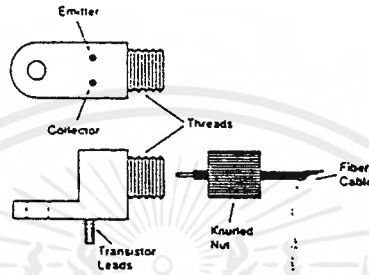
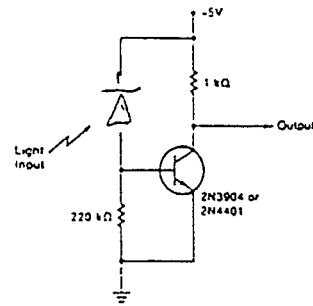
โดยวงจรจะประกอบด้วยอินฟารเรด LED ทำหน้าที่เป็นตัวปล่อยแสงสำหรับเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก มีความสามารถในการส่งด้วยควมถี่ที่ค่อนข้างดี ให้ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 950 nm มีกระแสไบอัสตรง (Forward current) สูงสุดได้ 100 mA มี power dissipation ที่อุณหภูมิห้อง 100 mW กำลังงานเอาต์พุตที่ส่งในเส้นใยนำแสง 100 ไมโครวัตต์ ซึ่งต่อเป็นวงจรขยายโดยใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904 หรือ 2N4401 ตัวต้านทาน 100 กิโลโอห์มใช้จำกัดค่ากระแสไม่ให้ไหลผ่านตัว LED มากเกินไป

## 5.2 วงจรภาครับ

### 5.2.1 ภาครับก่อนขยาย

พิจารณาการออกแบบทางภาครับ สิ่งแรกที่ต้องคำนึงถึง คือ ระดับพลังงานต่ำสุดที่ภาครับสามารถรับได้ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น คุณสมบัติของโฟโตนิกไดโอด แบบตัววัดของระดับพลังงาน ในการออกแบบวงจรที่ใช้ในโรงงานนี้จะใช้โฟโตนิกไดโอดซึ่งทำงานอยู่ในโหมดโฟโตนิกคอนดักทีฟ (Photoconductive) คือ การให้การไบอัสแบบกลับ (Reverse bias) โวลเตจกับไดโอดซึ่งต้องเป็นคู่ของตัวส่งจะทำให้สามารถรับแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ วงจรที่ใช้ในโรงงานนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

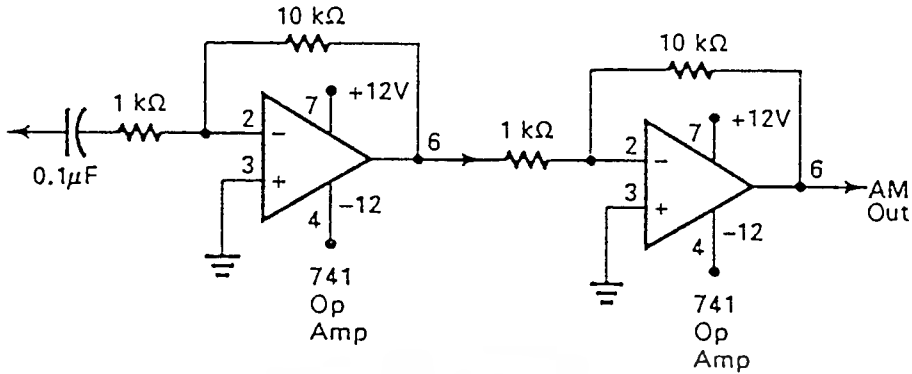


รูปที่ 5.4 แสดงวงจรก่อนภาคขยาย

โฟโตไดโอดที่ใช้จะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสัญญาณความเข้มของแสงที่รับได้ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งอยู่ในรูปกระแสไมกิโลแอมป์ ขาของขั้วเอาโนดของโฟโตไดโอดต่อเข้ากับขาเบสของทรานซิสเตอร์ 2N3904 หรือ 2N4401 ซึ่งเป็นวงจรขยายแบบอิมิตเตอร์ร่วมให้เอาต์พุตเป็นแบบกลับเฟส เอาต์พุตจะออกจากวงจรทางขาคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน 220 กิโลโอห์มทำหน้าที่เป็นวงจรแบ่งแรงดัน โดยอาศัยความต้านจากโฟโตไดโอดด้วย

## 5.2.2 วงจรขยาย

ในวงจรภาคก่อนขยายนั่น เราไม่สามารถทำให้อัตราขยายของวงจรสูงมากเนื่องจากวงจรส่วนแรกต้องคำนึงถึงสัญญาณรบกวน เพราะกระแสที่รับจากโฟโตไดโอดธรรมดาแล้วมีค่าต่ำมาก จึงต้องออกแบบวงจรขยายภาคหลังให้มีอัตราขยายสูงอยู่ในระดับที่ต้องการเพื่อจะให้วงจรในภาคถัดไป คือ ภาคคิมอดูลเท สามารถที่จะทำการถอดความถี่หรือโวลเตจที่เข้ามาทางขาอินพุตได้ ในการออกแบบและการสร้างวงจรขยายส่วนหลัง จะประกอบด้วยมัลติสเตทซึ่งแสดงรูปที่ 5.5

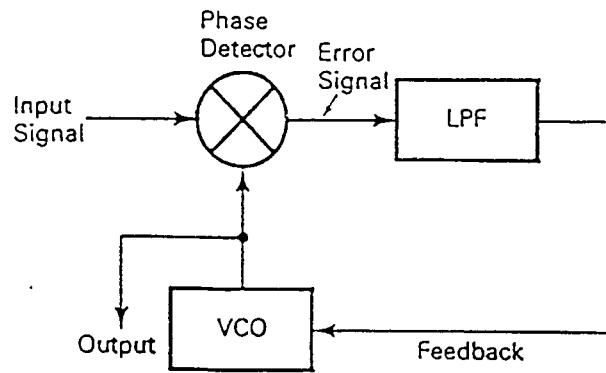


รูปที่ 5.5 วงจรขยายสัญญาณ

ภาคขยายส่วนแรกใช้ออปแอมป์เบอร์ 741 ซึ่งสามารถทำงานได้ในย่านความถี่ที่สูง ใช้ขยายได้ในช่วงกว้างๆ ลักษณะของวงจรจะถือเป็นแบบอินเวอร์สคิง (Inverting) มีอัตราขยายประมาณ 10 เท่า ส่วนภาคที่สองจะเหมือนภาคแรกคั้งนั้นอัตราขยายที่ได้จากวงจรทำให้สัญญาณถูกขยายจากเดิม 100 เท่า

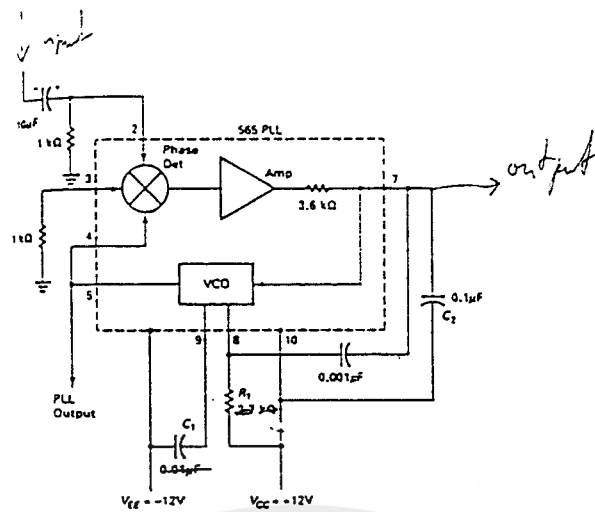
### 5.2.3 วงจรคิมอดคูเลทของสัญญาณ FM แบบ PLL

ในวงจรส่วนนี้จะทำหน้าที่คิมอดคูเลทสัญญาณ FM (Frequency Modulation) ที่ถูกขยายมาแล้วจากภาคขยาย สัญญาณที่ผ่านการคิมอดคูเลทเรียบร้อยแล้วจะได้สัญญาณออกมาในรูปแบบของสัญญาณอนาล็อกที่มีความถี่รูปร่างเหมือนในภาคส่ง ในวงจรนี้จะใช้ไอซีเฟสล็อกคูลูป LM 565 ไอซีสำเร็จรูปเป็นตัวมอดคูเลทสัญญาณ ซึ่งหลักการเบื้องต้นและส่วนประกอบของเฟสล็อกคูลูปได้กล่าวแล้วในบทที่ 2 ในเรื่องการคิมอดคูเลทสัญญาณ อย่างไรก็ตามการทำงานของเบื้องต้นสามารถอธิบายได้ดังนี้โดยดูจากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมของเฟสล็อกคูลูป

ขณะที่ยังไม่มีสัญญาณเข้ามาในระบบแรงดันควบคุม  $V_d(t)$  จะเท่ากับศูนย์ VCO จะทำงานโดยการตั้งความถี่ไว้ที่  $f_0$  ซึ่งเรียกว่า Free-running frequency ถ้ามีสัญญาณเข้าไปในระบบ Phase detector จะทำการเปรียบเทียบเฟสและสัญญาณความถี่ของอินพุตกับ VCO และผลิตแรงดันคลาดเคลื่อน  $V_e(t)$  ซึ่งสัมพันธ์กับความแตกต่างของเฟสและความถี่ของสัญญาณทั้งสอง แรงดันคลาดเคลื่อนนี้จะถูกรองและขยายส่งไปควบคุม VCO ในกรณีนี้แรงดันควบคุม  $V_d(t)$  จะไปบังคับความถี่ VCO ให้เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ลดความถี่ที่แตกต่างกันระหว่าง  $f_0$  กับสัญญาณที่เข้ามา ถ้าความถี่สัญญาณที่เข้ามาใกล้เคียงกับ  $f_0$  จากการป้อนกลับของ PLL ทำให้ PLL จิงโครไนซ์ หรือ ล็อกกับสัญญาณที่เข้ามา ขณะที่ทำการล็อกความถี่นั้น VCO จะเท่ากับสัญญาณอินพุตแต่เฟสยังต่างกันอยู่ ความแตกต่างของเฟสมีความจำเป็นต่อการผลิตแรงดันคลาดเคลื่อนที่จะคอยไปปรับความถี่ VCO จาก Free-running ให้เท่ากับความถี่ที่เข้ามา  $f_s$  ดังนั้น PLL จะยังคงรักษาสภาพการล็อก การที่ระบบสามารถที่จะปรับตัวเองได้ทำให้ PLL สามารถติดตามความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปของสัญญาณที่เข้ามาให้อยู่ในสภาพล็อกเช่นเดิม ช่วงความถี่ซึ่ง PLL สามารถติดตามการล็อกกับสัญญาณที่เข้ามาเรียกว่า Lock range ค่าของมันจะขึ้นอยู่กับแรงดันคลาดเคลื่อน โดยจะไม่ขึ้นกับทางฟิลเตอร์ ช่วงความถี่จะมากกว่าช่วงความถี่ที่ PLL สามารถทำการล็อกอย่างแท้จริงกับสัญญาณอินพุต ช่วงความถี่หลังนี้เรียกว่า "Capture range" ของระบบ ช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับฟิลเตอร์และแกนของระบบ (Closed loop gain) โดยมีผลเกี่ยวข้องกับ Selectivity ของวงจร PLL และยังช่วยเพิ่มความปลอดภัยเกี่ยวกับสัญญาณทางด้าน Outband single ที่จะมารบกวนได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 5.7 แสดงวงจรดีมอดคูเลทสัญญาณ FM

โดยที่ในรูปที่ 5.7 เป็นวงจรที่ใช้ในโครงการนี้ สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรขยายจะถูกนำมาป้อนเข้ามาทางขา 2 ของ LM 565 สัญญาณที่ถูกดีมอดคูเลทออกมาแล้วจะออกมาทางขา 7 ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ ที่มีความถี่คutoff 50 กิโลเฮิรท์ สัญญาณที่ได้มาจะเป็นสัญญาณเคิมที่ยังไม่ได้ถูกมอดคูเลท วงจรเฟสล็อกคูลิปที่ใช้ เราสามารถกำหนดความถี่กลางที่ใช้ (center frequency) ที่ใช้ในวงจรได้ซึ่งได้จากสมการที่กำกับมาให้ในแผ่นรายละเอียดข้อมูล

$$f_0 = 1.2 / (4 * R_1 * C_1) \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อ  $f_0$  คือ ความถี่ของ VCO โดยไม่สัญญาณเข้ามา

$C_1$  คือ ตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่กับขา 9 และไฟลบ

$R_1$  คือ ตัวต้านทานที่ต่ออยู่กับขา 7 กับขาลบ

เลือกใช้  $C_1$  เท่ากับ 0.001 ไมโครฟารัด และ ความต้านทาน  $R_1$  เท่ากับ 10 กิโลโอห์ม

ค่าช่วงการล็อก (Lock range) สามารถคำนวณได้จาก สมการ

$$f_L = \pm 8f_0 / (V_{CC} + V_{EE}) \dots\dots\dots(3)$$

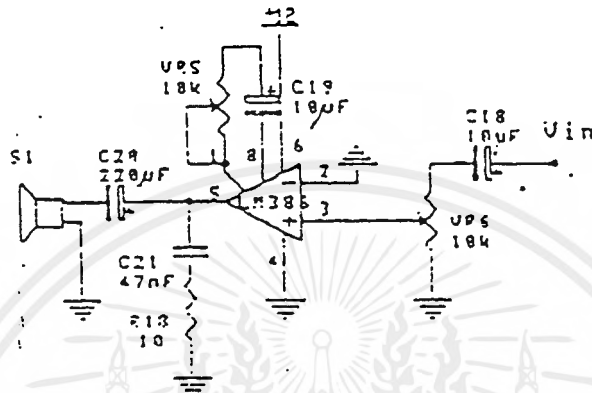
และช่วงความถี่ที่เริ่มจะล็อกหรือแคปเจอร์เรนจ์ Capture range โดยก่อนหน้านั้นยังไม่เกิดการล็อก จะคำนวณได้จาก

$$f_0 = (1/2) * [(2 f_L) / T] \dots\dots\dots(4)$$

โดยที่  $T$  ค่าคงที่ทางเวลาที่ขา 7

### 5.2.4 วงจรทางภาคขยายเสียง

ในที่นี้ใช้ ไอซี เบอร์ LM 386 ลักษณะการต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 5.8 วงจรขยายเสียงนี้สามารถปรับอัตราขยายได้ตั้งแต่ 20-200 เท่า



รูปที่ 5.8 แสดงวงจรภาคขยายเสียง

## บทที่ 6

### การดำเนินการและผลการดำเนินการ

ในบทที่ 6 นี้จะกล่าวถึงการทดสอบการทำงานของวงจรทางภาคส่งและวงจรทางภาครับ ซึ่งประกอบด้วยวงจรดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 5 โดยทำการทดลองต่ออุปกรณ์ทั้งภาคส่งและภาครับเข้ากันกับเส้นใยนำแสง



รูปที่ 6.1 แสดงการจัดอุปกรณ์ทั้งหมด

#### 6.1 วงจรทางภาคส่ง

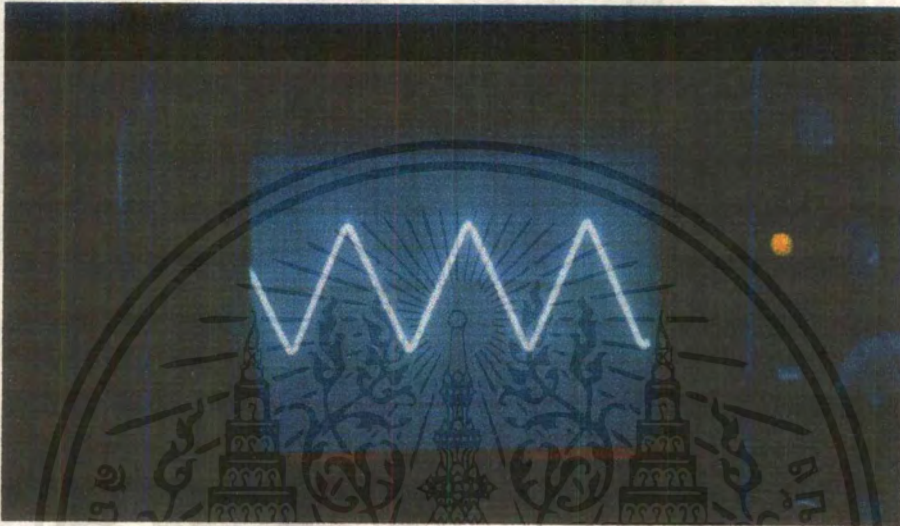
ต่ออุปกรณ์ทั้งหมดเข้าด้วยกัน ทำการทดสอบส่วนของวงจรมอดูเลต ทั้งแบบ FM และ PM โดยใช้สัญญาณ input จากภายนอก (Function Generator) โดยที่ปรับความถี่กลางเป็น 10 KHz โดยปรับจากขา 2 จากที่ตัวต้านทานปรับค่าได้ 100 K $\Omega$  (โดยที่ยังไม่ได้ input เข้าไป)

#### 6.2 ผลการดำเนินงาน

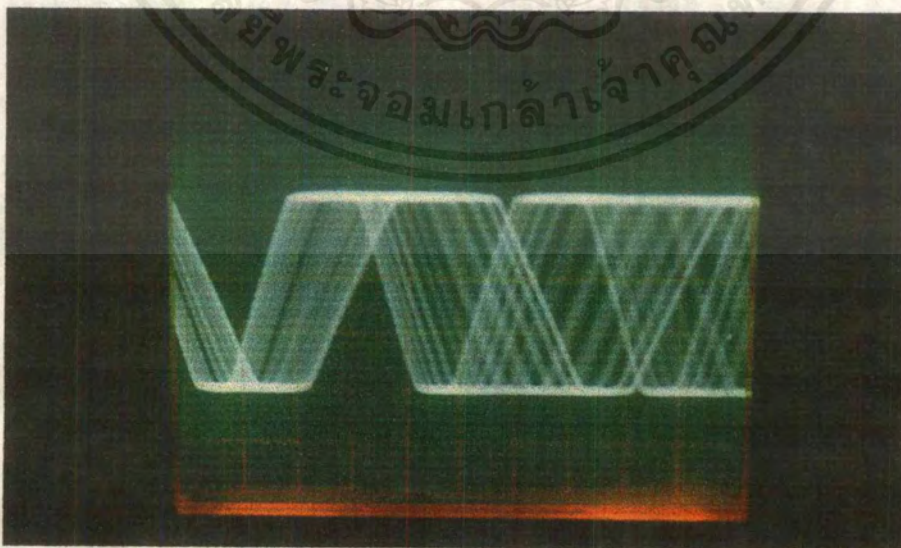
ทำการวัดผลสัญญาณ input จากแหล่งกำเนิดเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคิมอดูเลตที่ความถี่ต่างๆ ในขั้นแรกจะใช้สวิตทงแดงเป็นตัวนำทำการวัดสัญญาณข้อมูลที่ค่าความถี่ต่างๆ ต่อมาเก็บข้อมูลสัญญาณจากการใช้เส้นใยนำแสงที่ความถี่ต่างๆจากสัญญาณทั้ง 2 เช่นกันโดยใช้ความถี่สัญญาณ input ในช่วง 100 Hz – 1000 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ในการหาค่าผิดพลาดหาได้จากสูตร  $\frac{|ค่ามาตรฐาน - ค่าที่ได้|}{ค่ามาตรฐาน} \times 100 = \text{ค่าผิดพลาด}$
- ค่าผิดพลาดเฉลี่ย =  $(\sum xi/n)\%$

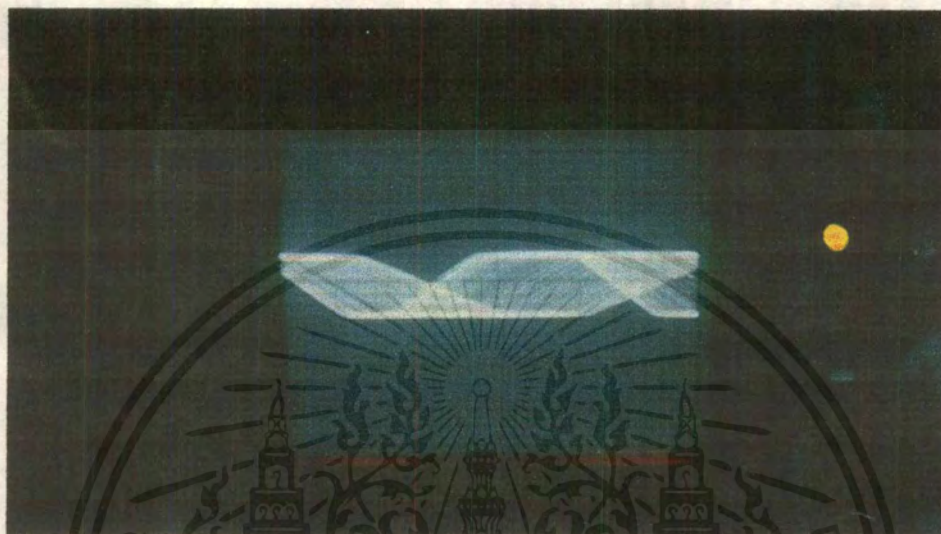


รูปที่ 6.2 แสดงลักษณะรูปคลื่นพาหะที่ 30 kHz ที่ยังไม่มีสัญญาณอินพุท

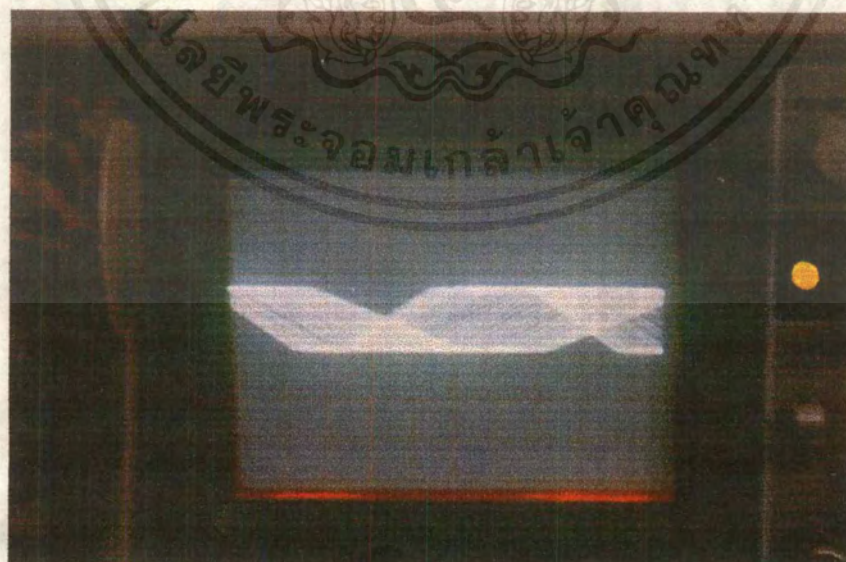


รูปที่ 6.3 แสดงลักษณะสัญญาณ FM ที่ความถี่อินพุท 500 Hz แอมพลิจูด 7.0 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ห้ามนำไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใด และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

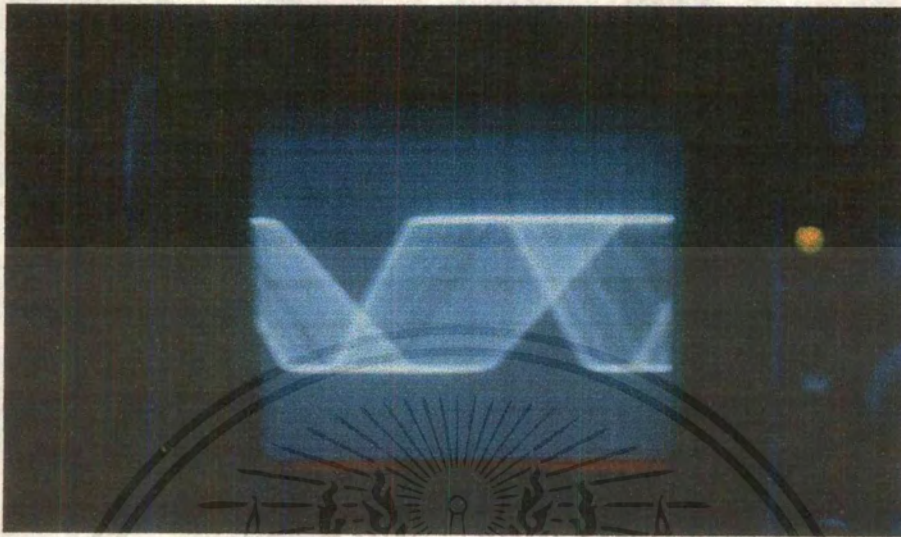


รูปที่ 6.4 แสดงสัญญาณ FM ที่ออกจาก LED ก่อนเข้าเส้นโยนนำแสง

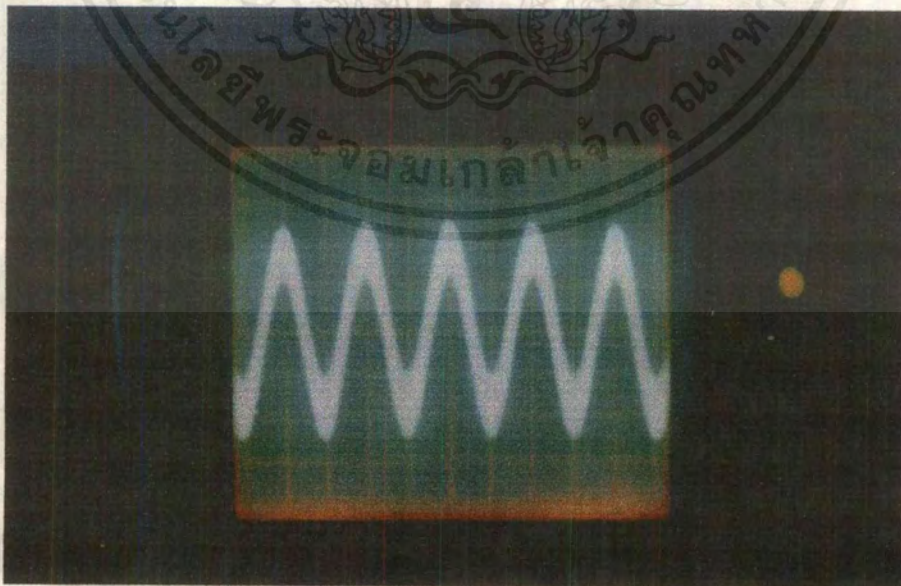


รูปที่ 6.5 แสดงสัญญาณ FM ที่รับจากวงจรรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

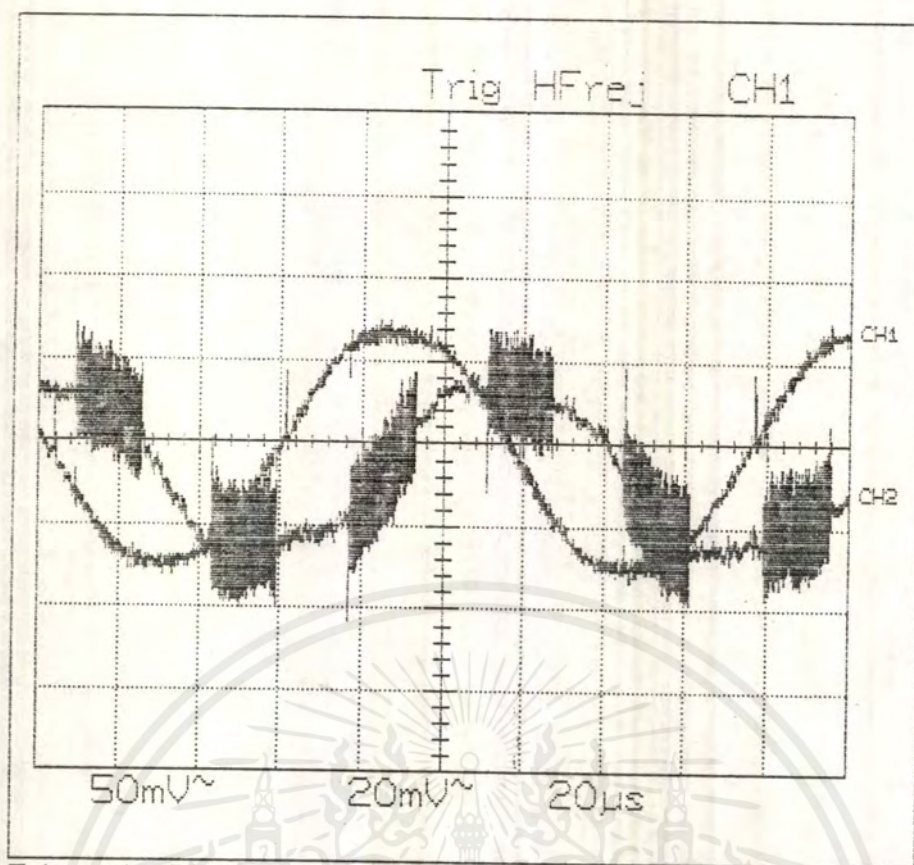


รูปที่ 6.6 แสดงลักษณะสัญญาณ FM ที่ถูกขยายขึ้น



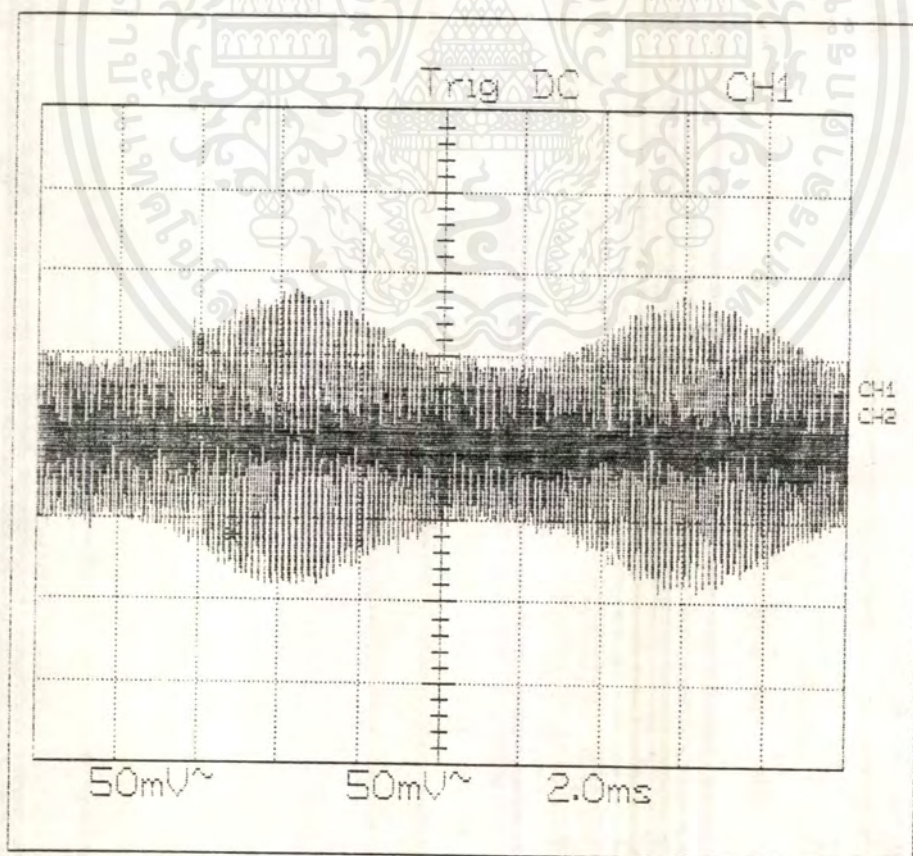
รูปที่ 6.7 แสดงลักษณะสัญญาณข้อมูลที่ได้จากการใช้เฟสล็อกคูปติมอดูเลตสัญญาณ FM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Tektronix 2212

#3

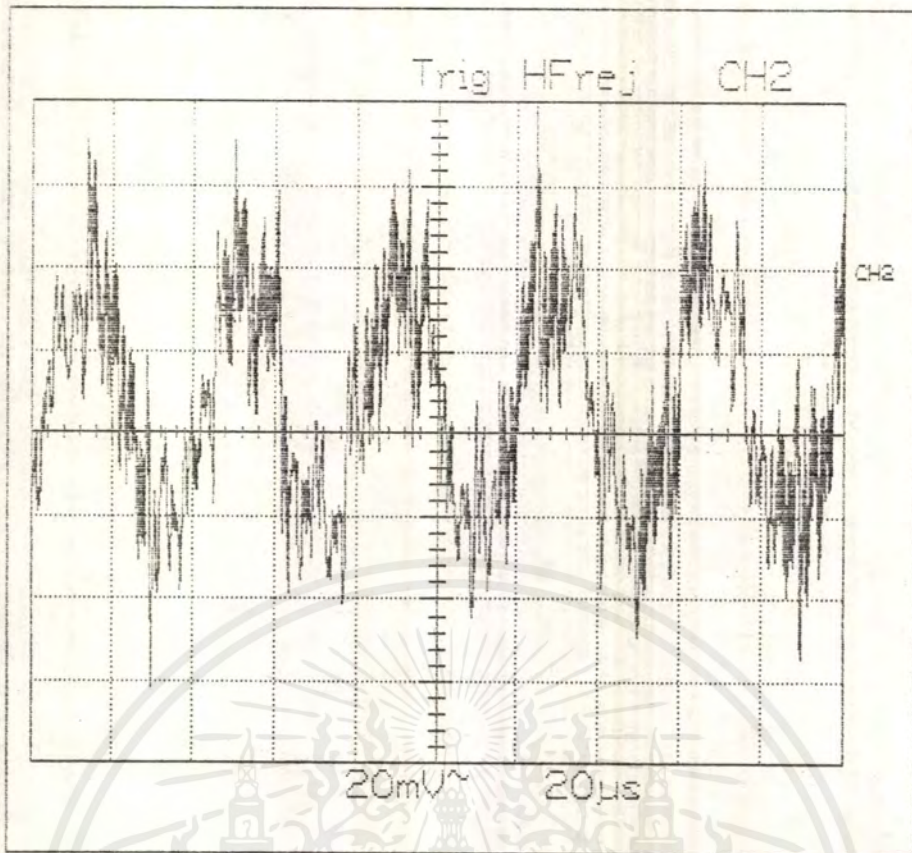


Tektronix 2212

#4

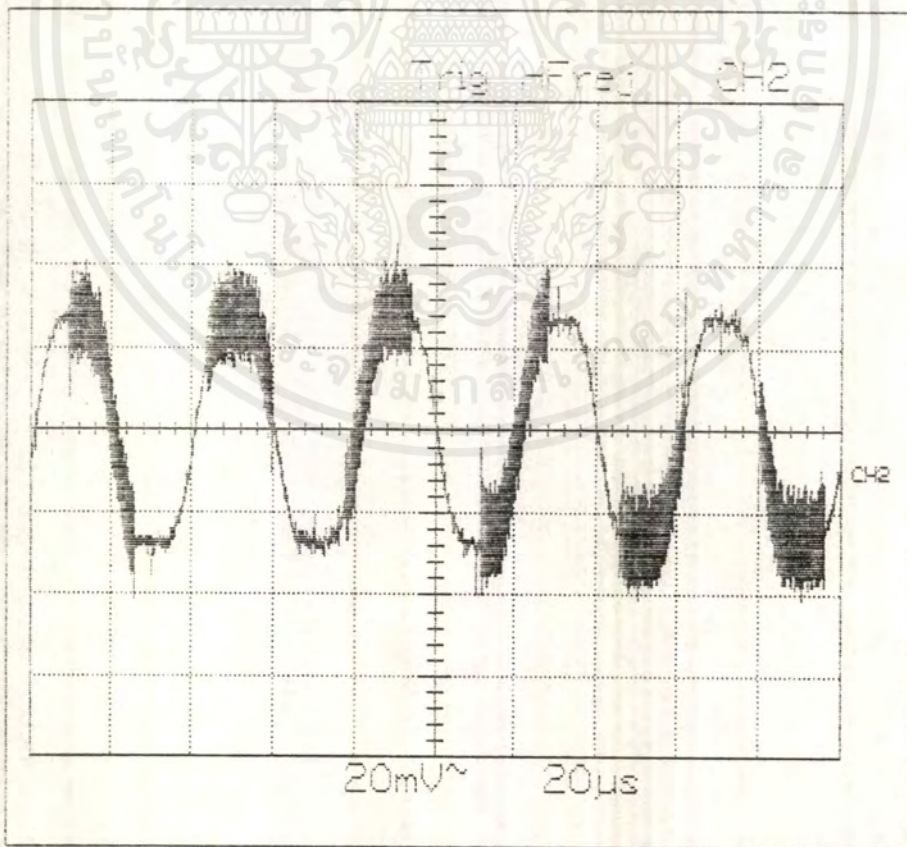
### รูปที่ 6.8 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณ PM และ FM ในแบบหยาบและละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Tektronix 2212

#1



Tektronix 2212

#2

### รูปที่ 6.9 แสดงการมอดูเลตสัญญาณในแบบ PM Mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

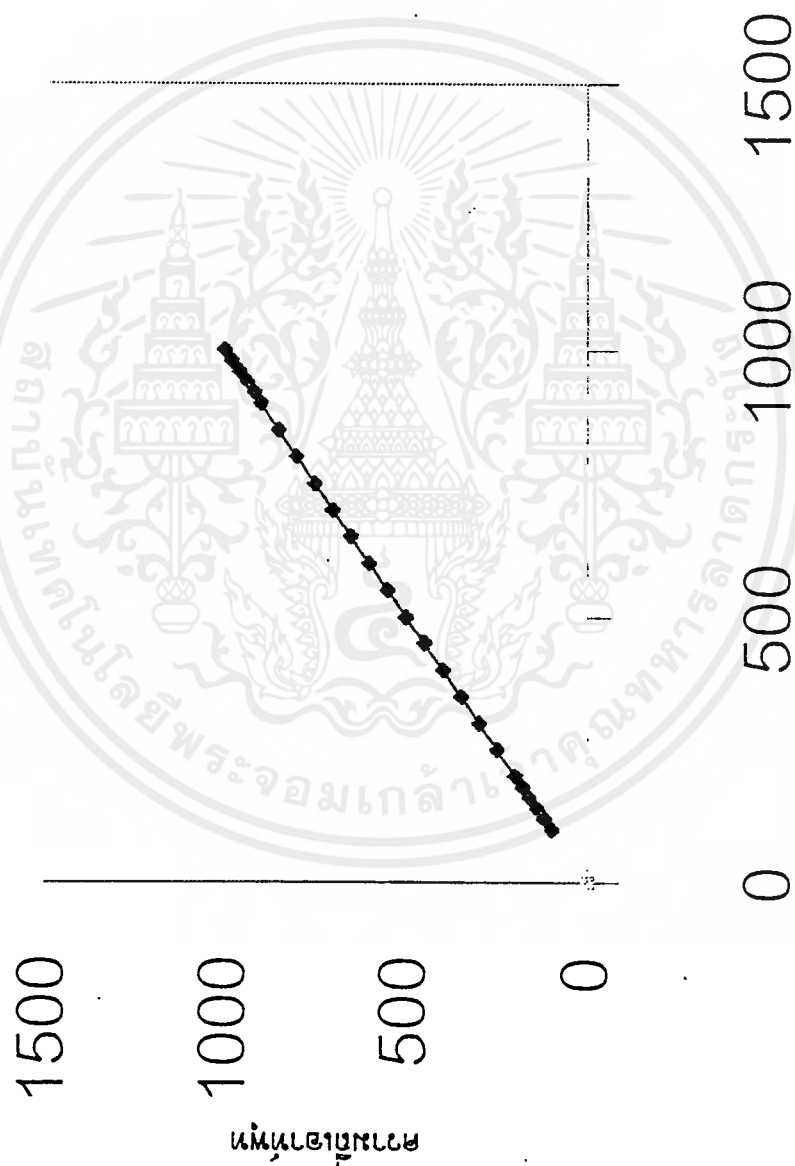
ตาราง 6.1 แสดงค่า output ที่ได้จากการส่งสัญญาณโดยผ่านหลอดทองแดง

ก) สัญญาณ FM โดยความถี่คลื่นพาหะคงที่ ( $f_c$ )

ความถี่input(Hz)	ผลการทดลอง(Hz)	ค่าคลาดเคลื่อน ( % )
100	99	1.000
120	120	0.000
140	138	1.400
160	161	0.620
180	180	0.000
200	200	0.000
250	251	0.400
300	299	0.330
350	348	0.570
400	400	0.000
450	450	0.000
500	500	0.000
550	551	0.180
600	600	0.000
650	651	0.150
700	701	0.140
750	751	0.130
800	800	0.000
850	848	0.240
900	902	0.220
920	921	0.100
940	941	0.100
960	958	0.200
980	980	0.000
1000	1000	0.000
เฉลี่ย		0.23%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างความถี่อินพุตกับความถี่เอาท์พุตของเครื่องส่งสัญญาณ FM ผ่านหลอดทงแดง



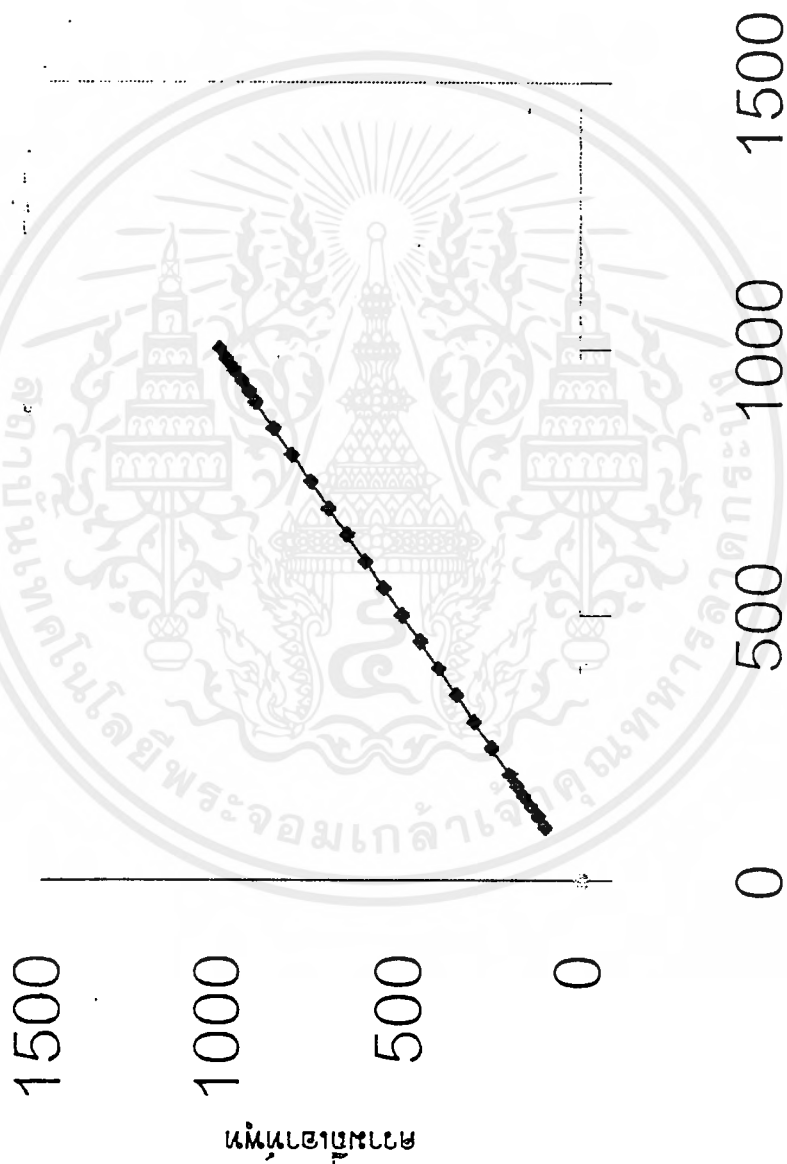
ความถี่อินพุต

ข)สัญญาณ PM โดยที่คลื่นพาหะที่คงที่ สัญญาณข้อมูลเปลี่ยนแปลง

ความถี่input(Hz)	ผลการทดลอง(Hz)	ค่าคลาดเคลื่อน ( % )
100	99	1.000
120	121	0.800
140	140	0.000
160	160	0.000
180	181	0.550
200	200	0.000
250	250	0.000
300	300	0.000
350	349	0.280
400	401	0.250
450	450	0.000
500	500	0.000
550	551	0.180
600	601	0.160
650	650	0.000
700	699	0.140
750	751	0.130
800	800	0.000
850	850	0.000
900	899	0.125
920	921	0.108
940	940	0.000
960	961	0.104
980	981	0.102
1000	1000	0.000
เฉลี่ย		0.117%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างความถี่สัมพัทธ์กับความถี่ของการส่งสัญญาณ PM ผ่านลวดทองแดง



ความถี่สัมพัทธ์

ตาราง 6.2 แสดงค่า output ที่ได้จากการส่งสัญญาณโดยผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

ก) สัญญาณ FM โดยความถี่คลื่นพาหะคงที่ ( $f_c$ )

ความถี่input(Hz)	ผลการทดลอง(Hz)	ค่าคลาดเคลื่อน ( % )
100	100	0.000
120	120	0.000
140	141	0.700
160	161	0.625
180	180	0.000
200	200	0.000
250	250	0.000
300	299	0.330
350	348	0.570
400	400	0.000
450	451	0.220
500	500	0.000
550	551	0.180
600	600	0.000
650	649	0.150
700	701	0.140
750	750	0.000
800	800	0.000
850	850	0.000
900	901	0.110
920	921	0.108
940	939	0.100
960	960	0.000
980	982	0.200
1000	1000	0.000
<b>เฉลี่ย</b>		<b>0.137%</b>

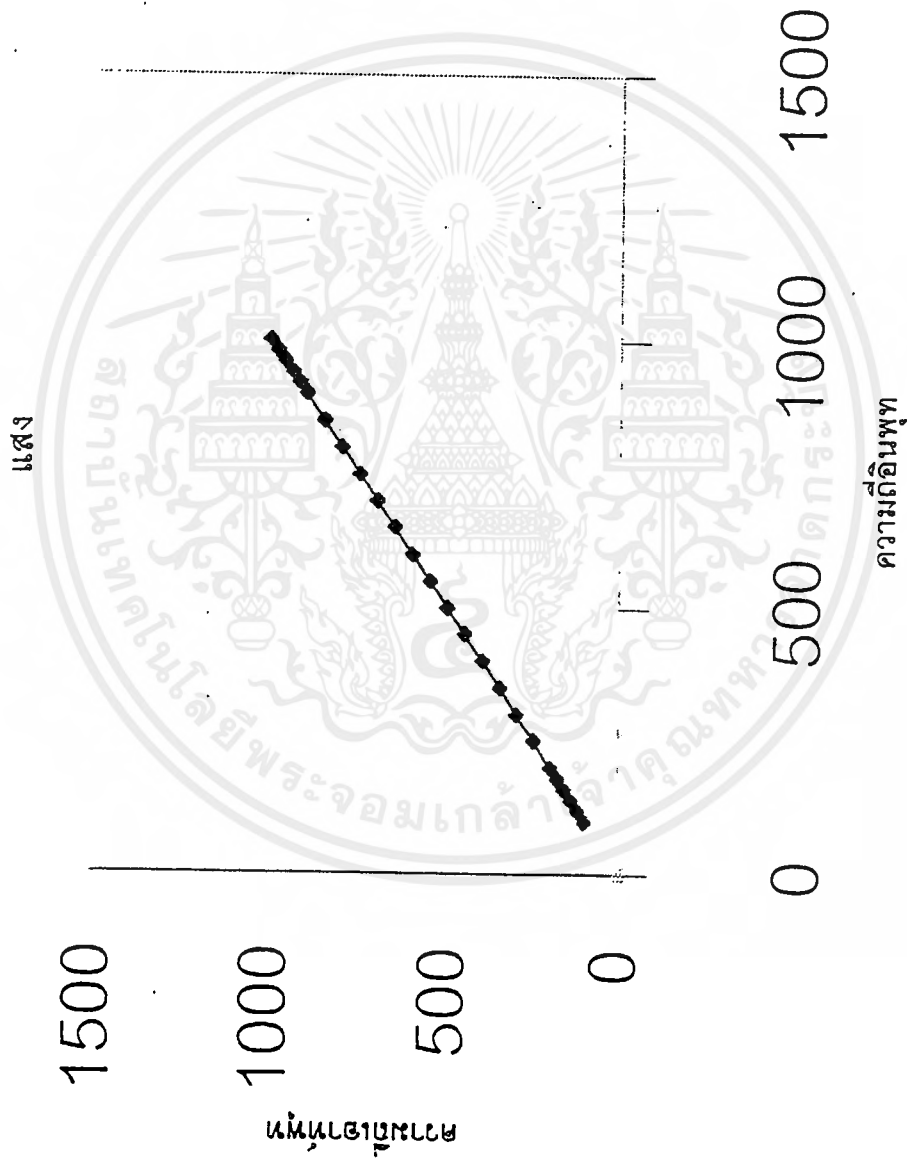
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข) สัญญาณ PM โดยที่คลื่นพาหะที่คงที่ สัญญาณข้อมูลเปลี่ยนแปลง

ความถี่input(Hz)	ผลการทดลอง(Hz)	ค่าคลาดเคลื่อน (%)
100	100	0.000
120	120	0.000
140	140	0.000
160	161	0.600
180	180	0.000
200	200	0.000
250	250	0.000
300	300	0.000
350	349	0.280
400	400	0.000
450	451	0.220
500	500	0.000
550	549	0.180
600	600	0.000
650	650	0.000
700	699	0.140
750	748	0.267
800	800	0.000
850	851	0.117
900	900	0.000
920	920	0.000
940	938	0.204
960	960	0.000
980	981	0.102
1000	1000	0.000
เฉลี่ย		0.084%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างความถี่อินพุตกับความถี่เอาต์พุตของการส่งสัญญาณ PM ผ่านเส้นใยแก้วนำ





ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 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

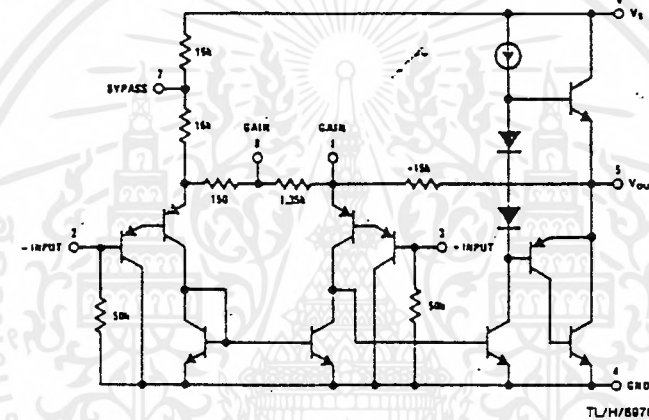
- Battery operation
- Minimum external parts
- Wide supply voltage range 4V–12V or 5V–18V
- Low quiescent current drain 4 mA

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

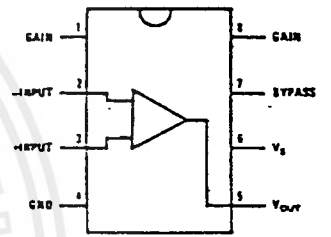
### Applications

- 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



Dual-In-Line and Small Outline Packages



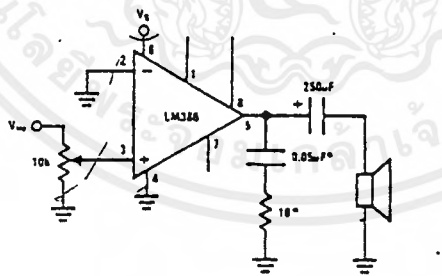
Top View

Order Number LM386M-1,  
LM386N-1, LM386N-3 or LM386N-4  
See NS Package Number  
M08A or N08E

### Typical Applications

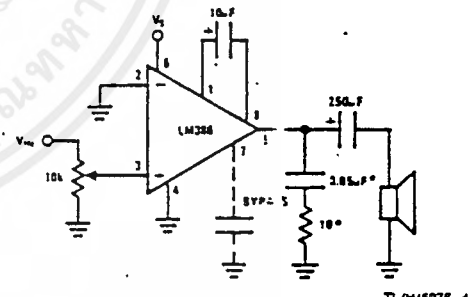
All of  
the c

Amplifier with Gain = 20  
Minimum Parts



\*Required for LM386N-4 only.

Amplifier with Gain = 200



\*Required for LM386N-4 only.

### Absolute Maximum Ratings

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

Supply Voltage (LM386N-1, -3, LM386M-1)	15V
Supply Voltage (LM386N-4)	22V
Package Dissipation (Note 1) (LM386N-4)	1.25W
Input Voltage	±0.4V
Storage Temperature	-65°C to +150°C
Operating Temperature	0°C to +70°C

Junction Temperature	+150°C
Soldering Information	
Dual-In-Line Package	
Soldering (10 sec)	+260°C
Small Outline Package	
Vapor Phase (60 sec)	+215°C
Infrared (15 sec)	+220°C

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

### Electrical Characteristics $T_A = 25^\circ\text{C}$

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
Operating Supply Voltage ( $V_S$ ) LM386N-1, -3, LM386M-1 LM386N-4		4 5		12 18	V V
Quiescent Current ( $I_Q$ )	$V_S = 6V, V_{IN} = 0$		4	8	mA
Output Power ( $P_{OUT}$ ) LM386N-1, LM386M-1 LM386N-3 LM386N-4	$V_S = 6V, R_L = 8\Omega, THD = 10\%$ $V_S = 9V, R_L = 8\Omega, THD = 10\%$ $V_S = 16V, R_L = 32\Omega, THD = 10\%$	250 500 700	325 700 1000		mW 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)	$V_S = 6V$ , 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 ( $R_{IN}$ ) Input Bias Current ( $I_{BIAS}$ )	$V_S = 6V$ , Pins 2 and 3 Open		50 250		k $\Omega$ nA

Note 1: For operation in ambient temperatures above 25°C, the device must be derated based on a 150°C maximum junction temperature and 1) a thermal resistance of 80°C/W junction to ambient for the dual-in-line package and 2) a thermal resistance of 170°C/W for the small outline package.

### 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  $R = 15\text{ k}\Omega$ , 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.



# 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.

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

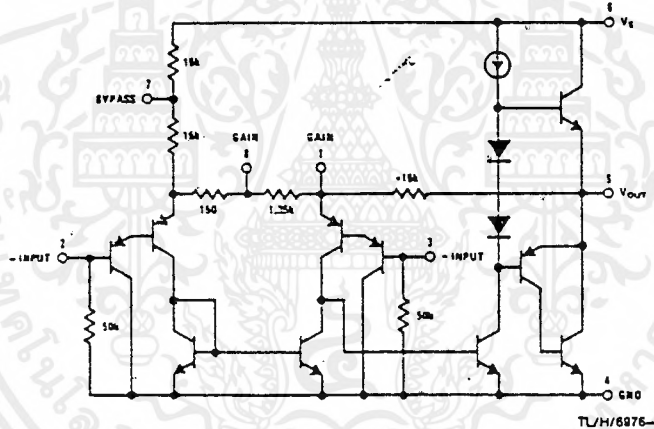
## Features

- Battery operation
- Minimum external parts
- Wide supply voltage range 4V-12V or 5V-18V
- Low quiescent current drain 4 mA

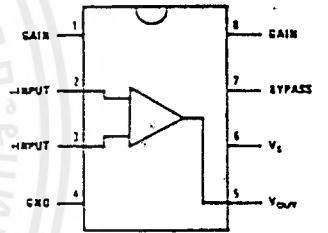
## Applications

- 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



Dual-In-Line and Small Outline Packages

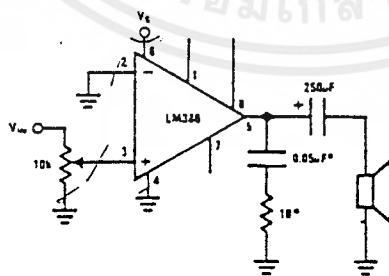


Top View

Order Number LM386M-1,  
LM386N-1, LM386N-3 or LM386N-4  
See NS Package Number  
M08A or N08E

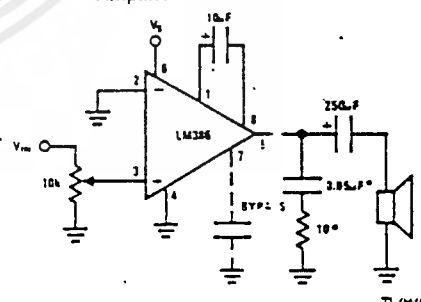
## Typical Applications

Amplifier with Gain = 20  
Minimum Parts



\*Required for LM386N-4 only.

Amplifier with Gain = 200



\*Required for LM386P-4 only.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Absolute Maximum Ratings

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

Supply Voltage (LM386N-1, -3, LM386M-1)	15V
Supply Voltage (LM386N-4)	22V
Package Dissipation (Note 1) (LM386N-4)	1.25W
Input Voltage	±0.4V
Storage Temperature	-65°C to +150°C
Operating Temperature	0°C to +70°C

Junction Temperature	+150°C
Soldering Information	
Dual-In-Line Package	
Soldering (10 sec)	+260°C
Small Outline Package	
Vapor Phase (60 sec)	+215°C
Infrared (15 sec)	+220°C

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

### Electrical Characteristics $T_A = 25^\circ\text{C}$

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
Operating Supply Voltage ( $V_S$ ) LM386N-1, -3, LM386M-1 LM386N-4		4 5		12 18	V V
Quiescent Current ( $I_Q$ )	$V_S = 6V, V_{IN} = 0$		4	8	mA
Output Power ( $P_{OUT}$ ) LM386N-1, LM386M-1 LM386N-3 LM386N-4	$V_S = 6V, R_L = 8\Omega, THD = 10\%$ $V_S = 9V, R_L = 8\Omega, THD = 10\%$ $V_S = 16V, R_L = 32\Omega, THD = 10\%$	250 500 700	325 700 1000		mW 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)	$V_S = 6V$ , 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 ( $R_{IN}$ ) Input Bias Current ( $I_{BIAS}$ )	$V_S = 6V$ , Pins 2 and 3 Open		50 250		k $\Omega$ nA

Note 1: For operation in ambient temperatures above 25°C, the device must be derated based on a 150°C maximum junction temperature and 1) a thermal resistance of 80°C/W junction to ambient for the dual-in-line package and 2) a thermal resistance of 170°C/W for the small outline package.

### 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  $R = 15\text{ k}\Omega$ , 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.

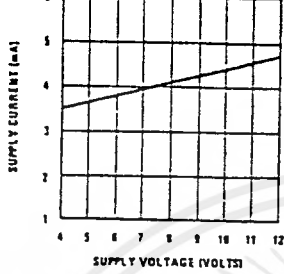
#### INPUT BIASING

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 its 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.

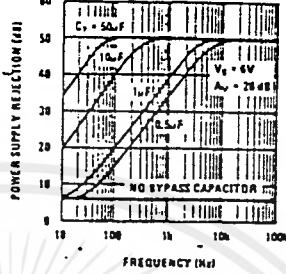
When using the LM386 with higher gains (bypassing the 1.35 k $\Omega$  resistor between pins 1 and 8) it is necessary to bypass the unused input, preventing degradation of gain and possible instabilities. This is done with a 0.1  $\mu\text{F}$  capacitor or a short to ground depending on the dc source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

Typical Performance Characteristics

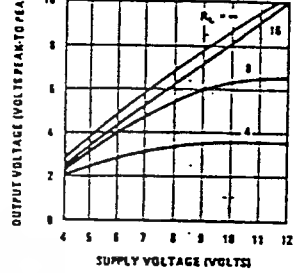
Quiescent Supply Current vs Supply Voltage



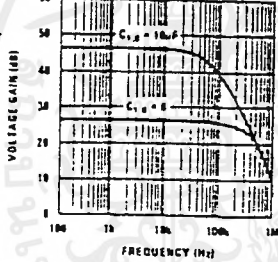
Power Supply Rejection Ratio (Referred to the Output) vs Frequency



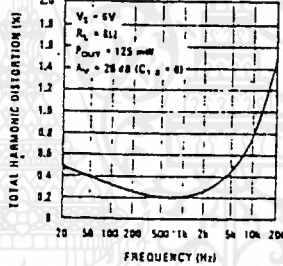
Peak-to-Peak Output Voltage Swing vs Supply Voltage



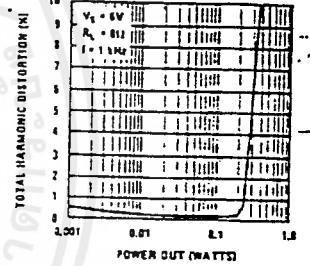
Voltage Gain vs Frequency



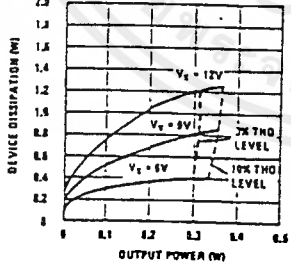
Distortion vs Frequency



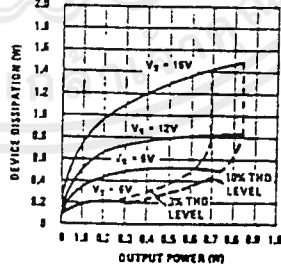
Distortion vs Output Power



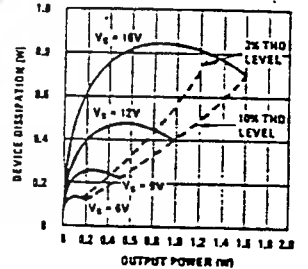
Device Dissipation vs Output Power—4Ω Load



Device Dissipation vs Output Power—8Ω Load



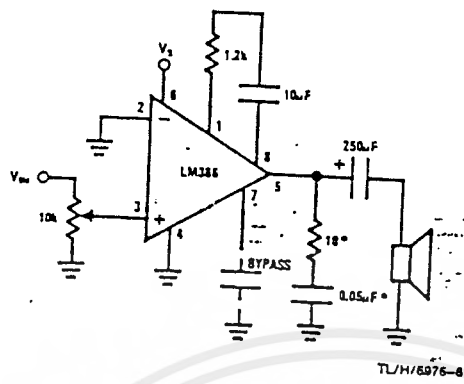
Device Dissipation vs Output Power—16Ω Load



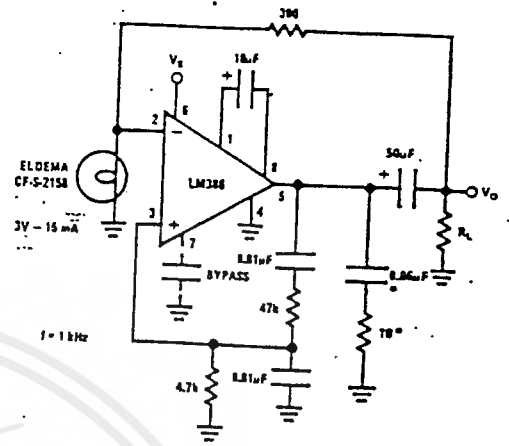
TL/M/6978-5

# Typical Applications (Continued)

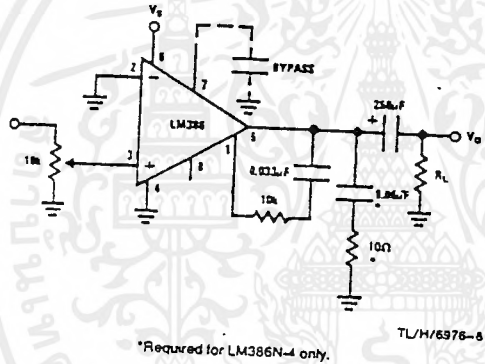
Amplifier with Gain = 50



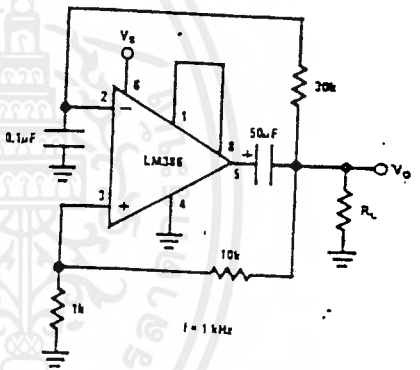
Low Distortion Power Wienbridge Oscillator



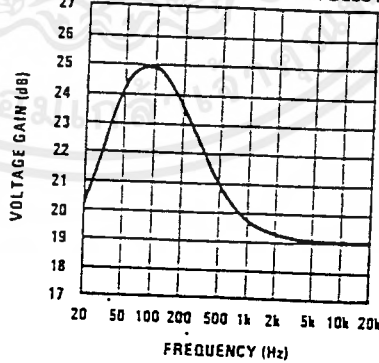
Amplifier with Bass Boost



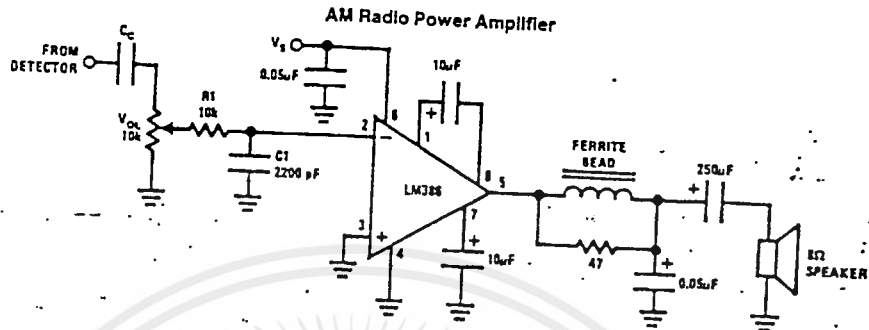
Square Wave Oscillator



Frequency Response with Bass Boost



Typical Applications (Continued)



Note 1: Twist supply lead and supply ground very tightly.

Note 2: Twist speaker lead and ground very tightly.

Note 3: Ferrite bead is Ferroxcube KS-001-001/3B with 3 turns of wire.

Note 4: R1C1 band limits input signals.

Note 5: All components must be spaced very close to IC.

TL/H/6378-11

# Monolithic Function Generator

## GENERAL DESCRIPTION

The XR-2206 is a monolithic function generator integrated circuit capable of producing high quality sine, square, triangle, ramp, and pulse waveforms of high stability and accuracy. The output waveforms can be both amplitude and frequency modulated by an external voltage. Frequency of operation can be selected externally over a range of 0.01 Hz to more than 1 MHz.

The circuit is ideally suited for communications, instrumentation, and function generator applications requiring a sinusoidal tone, AM, FM, or FSK generation. It has a typical drift specification of 20 ppm/°C. The oscillator frequency can be linearly swept over a 2000:1 frequency range, with an external control voltage, having a very small affect on distortion.

## FEATURES

Low-Sine Wave Distortion	0.5%, Typical
Excellent Temperature Stability	20 ppm/°C, Typical
Wide Sweep Range	2000:1, Typical
Low-Supply Sensitivity	0.01% V, Typical
Linear Amplitude Modulation	
TTL Compatible FSK Controls	
Wide Supply Range	10V to 26V
Adjustable Duty Cycle	1% to 99%

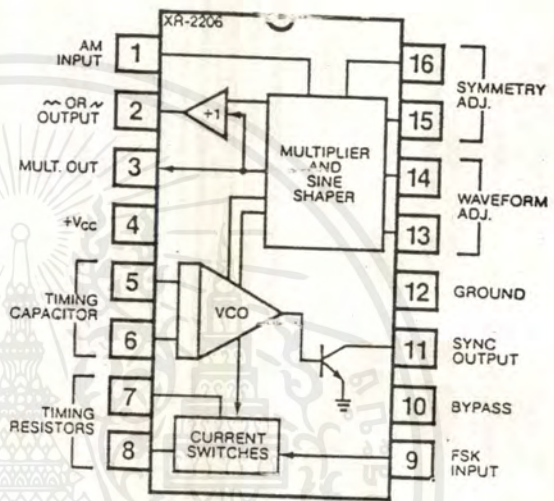
## APPLICATIONS

- Waveform Generation
- Sweep Generation
- AM/FM Generation
- V/F Conversion
- FSK Generation
- Phase-Locked Loops (VCO)

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Power Supply	26V
Power Dissipation	750 mW
Derate Above 25°C	5 mW/°C
Total Timing Current	6 mA
Storage Temperature	-65°C to +150°C

## FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



## ORDERING INFORMATION

Part Number	Package	Operating Temperature
XR-2206M	Ceramic	-55°C to +125°C
XR-2206N	Ceramic	0°C to +70°C
XR-2206P	Plastic	0°C to +70°C
XR-2206CN	Ceramic	0°C to +70°C
XR-2206CP	Plastic	0°C to +70°C

## SYSTEM DESCRIPTION

The XR-2206 is comprised of four functional blocks: a voltage-controlled oscillator (VCO), an analog multiplier and sine-shaper; a unity gain buffer amplifier; and a set of current switches.

The VCO actually produces an output frequency proportional to an input current, which is produced by a resistor from the timing terminals to ground. The current switches route one of the timing pins current to the VCO controlled by an FSK input pin, to produce an output frequency. With two timing pins, two discrete output frequencies can be independently produced for FSK Generation Applications.

# XR-2206

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Test Conditions: Test Circuit of Figure 1,  $V^+ = 12V$ ,  $T_A = 25^\circ$ ,  $C = 0.01 \mu F$ ,  $R_1 = 100 k\Omega$ ,  $R_2 = 10 k\Omega$ ,  $R_3 = 25 k\Omega$  unless otherwise specified.  $S_1$  open for triangle, closed for sine wave.

PARAMETERS	XR-2206M			XR-2206C			UNITS	CONDITIONS
	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX		
<b>GENERAL CHARACTERISTICS</b>								
Single Supply Voltage	10		26	10		26	V	
Split-Supply Voltage	$\pm 5$		$\pm 13$	$\pm 5$		$\pm 13$	V	
Supply Current		12	17		14	20	mA	$R_1 \geq 10 k\Omega$
<b>OSCILLATOR SECTION</b>								
Max. Operating Frequency	0.5	1		0.5	1		MHz	$C = 1000 pF$ , $R_1 = 1 k\Omega$
Lowest Practical Frequency		0.01			0.01		Hz	$C = 50 \mu F$ , $R_1 = 2 M\Omega$
Frequency Accuracy		$\pm 1$	$\pm 4$		$\pm 2$		% of $f_0$	$f_0 = 1/R_1 C$
Temperature Stability		$\pm 10$	$\pm 50$		$\pm 20$		ppm/ $^\circ C$	$0^\circ C \leq T_A \leq 70^\circ C$ , $R_1 = R_2 = 20 k\Omega$ $V_{LOW} = 10V$ , $V_{HIGH} = 20V$ .
Supply Sensitivity		0.01	0.1		0.01		%/V	$R_1 = R_2 = 20 k\Omega$ $V_{LOW} = 10V$ , $V_{HIGH} = 20V$ .
Sweep Range	1000:1	2000:1			2000:1		$f_H = f_L$	$R_1 = R_2 = 20 k\Omega$ $f_H @ R_1 = 1 k\Omega$ $f_L @ R_1 = 2 M\Omega$
Sweep Linearity							%	$f_L = 1 kHz$ , $f_H = 10 kHz$
10:1 Sweep		2			2		%	$f_L = 100 kHz$ , $f_H = 100 kHz$
1000:1 Sweep		8			8		%	$\pm 10\%$ Deviation
FM Distortion		0.1			0.1		%	
Recommended Timing Components								
Timing Capacitor: C	0.001		100	0.001		100	$\mu F$	See Figure 4.
Timing Resistors: $R_1$ & $R_2$	1		2000	1		2000	k $\Omega$	
Triangle Sine Wave Output								See Note 1, Figure 2.
Triangle Amplitude		160			160		mV/k $\Omega$	Figure 1, $S_1$ Open
Sine Wave Amplitude	40	60	80		60		mV/k $\Omega$	Figure 1, $S_1$ Closed
Max. Output Swing		6			6		V p-p	
Output Impedance		600			600		$\Omega$	
Triangle Linearity		1			1		%	
Amplitude Stability		0.5			0.5		dB	
Sine Wave Amplitude Stability		4800			4800		ppm/ $^\circ C$	For 1000:1 Sweep See Note 2.
Sine Wave Distortion								
Without Adjustment		2.5			2.5		%	$R_1 = 30 k\Omega$
With Adjustment		0.4	1.0		0.5	1.5	%	See Figures 6 and 7.
Amplitude Modulation								
Input Impedance	50	100		50	100		k $\Omega$	
Modulation Range		100			100		%	
Carrier Suppression		55			55		dB	
Linearity		2			2		%	For 95% modulation
Square-Wave Output								
Amplitude		12			12		V p-p	Measured at Pin 11.
Rise Time		250			250		nsec	$C_L = 10 pF$
Fall Time		50			50		nsec	$C_L = 10 pF$
Saturation Voltage		0.2	0.4		0.2	0.6	V	$I_L = 2 mA$
Leakage Current		0.1	20		0.1	100	$\mu A$	$V_{11} = 26V$
FSK Keying Level (Pin 9)	0.8	1.4	2.4	0.8	1.4	2.4	V	See section on circuit controls
Reference Bypass Voltage	2.9	3.1	3.3	2.5	3.	3.5	V	Measured at Pin 10.

Note 1: Output amplitude is directly proportional to the resistance,  $R_3$ , on Pin 3. See Figure 2.

Note 2: For maximum amplitude stability,  $R_3$  should be a positive temperature coefficient resistor.

# XR-2206

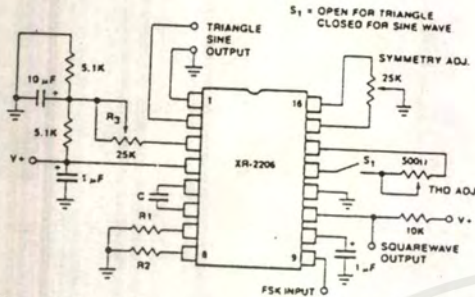


Figure 1. Basic Test Circuit.

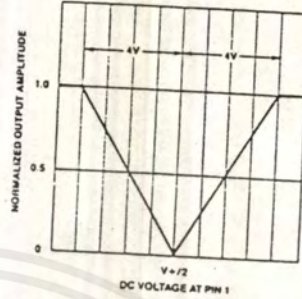


Figure 5. Normalized Output Amplitude versus DC Bias at AM Input (Pin 1).

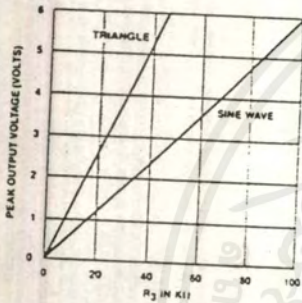


Figure 2. Output Amplitude as a Function of the Resistor,  $R_3$ , at Pin 3.

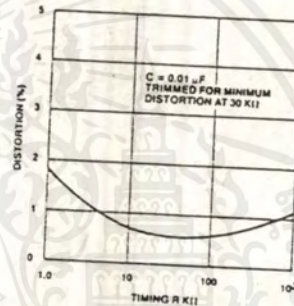


Figure 6. Trimmed Distortion versus Timing Resistor.

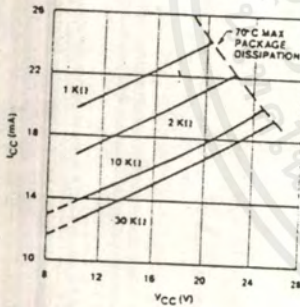


Figure 3. Supply Current versus Supply Voltage, Timing,  $R$ .

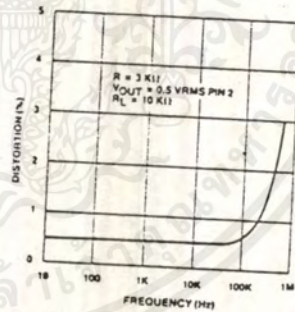


Figure 7. Sine Wave Distortion versus Operating Frequency with Timing Capacitors Varied.

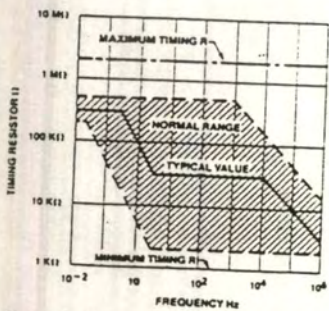


Figure 4.  $R$  versus Oscillation Frequency.

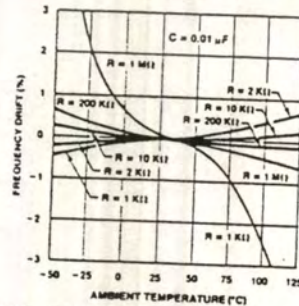


Figure 8. Frequency Drift versus Temperature.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# XR-2206

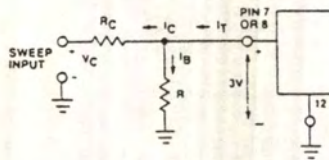


Figure 9. Circuit Connection for Frequency Sweep.

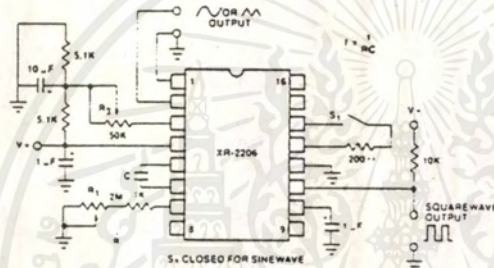


Figure 10. Circuit for Sine Wave Generation without External Adjustment. (See Figure 2 for Choice of  $R_3$ .)

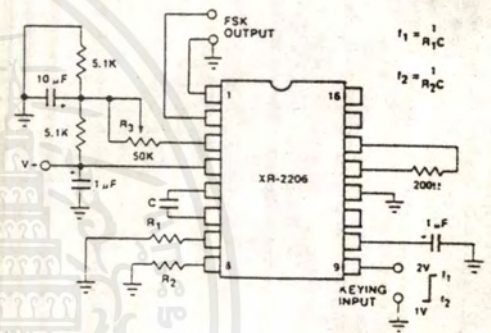


Figure 12. Sinusoidal FSK Generator.

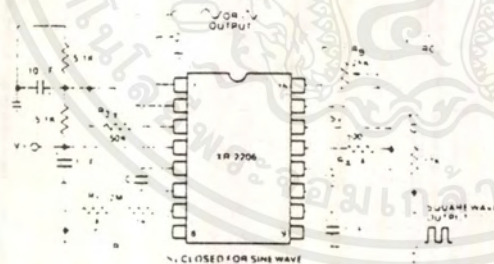


Figure 11. Circuit for Sine Wave Generation with Minimum Harmonic Distortion. ( $R_3$  Determines Output Swing—See Figure 2.)

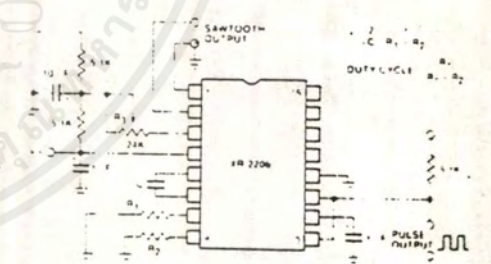


Figure 13. Circuit for Pulse and Ramp Generation.

# XR-2206

## Frequency-Shift Keying:

The XR-2206 can be operated with two separate timing resistors,  $R_1$  and  $R_2$ , connected to the timing Pin 7 and 8, respectively, as shown in Figure 12. Depending on the polarity of the logic signal at Pin 9, either one or the other of these timing resistors is activated. If Pin 9 is open-circuited or connected to a bias voltage  $\geq 2V$ , only  $R_1$  is activated. Similarly, if the voltage level at Pin 9 is  $\leq 1V$ , only  $R_2$  is activated. Thus, the output frequency can be keyed between two levels,  $f_1$  and  $f_2$ , as:

$$f_1 = 1/R_1C \text{ and } f_2 = 1/R_2C$$

For split-supply operation, the keying voltage at Pin 9 is referenced to  $V^-$ .

## Output DC Level Control:

The dc level at the output (Pin 2) is approximately the same as the dc bias at Pin 3. In Figures 10, 11 and 12, Pin 3 is biased midway between  $V^+$  and ground, to give an output dc level of  $\approx V^+/2$ .

## APPLICATIONS INFORMATION

### Sine Wave Generation

#### Without External Adjustment:

Figure 10 shows the circuit connection for generating a sinusoidal output from the XR-2206. The potentiometer,  $R_1$  at Pin 7, provides the desired frequency tuning. The maximum output swing is greater than  $V^+/2$ , and the typical distortion (THD) is  $< 2.5\%$ . If lower sine wave distortion is desired, additional adjustments can be provided as described in the following section.

The circuit of Figure 10 can be converted to split-supply operation, simply by replacing all ground connections with  $V^-$ . For split-supply operation,  $R_3$  can be directly connected to ground.

#### With External Adjustment:

The harmonic content of sinusoidal output can be reduced to  $\approx 0.5\%$  by additional adjustments as shown in Figure 11. The potentiometer,  $R_A$ , adjusts the sine-shaping resistor, and  $R_B$  provides the fine adjustment for the waveform symmetry. The adjustment procedure is as follows:

1. Set  $R_B$  at midpoint, and adjust  $R_A$  for minimum distortion.
2. With  $R_A$  set as above, adjust  $R_B$  to further reduce distortion.

### Triangle Wave Generation

The circuits of Figures 10 and 11 can be converted to triangle wave generation, by simply open-circuiting Pin 13 and 14 (i.e.,  $S_1$  open). Amplitude of the triangle is approximately twice the sine wave output.

## FSK Generation

Figure 12 shows the circuit connection for sinusoidal FSK signal operation. Mark and space frequencies can be independently adjusted, by the choice of timing resistors,  $R_1$  and  $R_2$ ; the output is phase-continuous during transitions. The keying signal is applied to Pin 9. The circuit can be converted to split-supply operation by simply replacing ground with  $V^-$ .

## Pulse and Ramp Generation

Figure 13 shows the circuit for pulse and ramp waveform generation. In this mode of operation, the FSK keying terminal (Pin 9) is shorted to the square-wave output (Pin 11), and the circuit automatically frequency-shift keys itself between two separate frequencies during the positive-going and negative-going output waveforms. The pulse width and duty cycle can be adjusted from 1% to 99%, by the choice of  $R_1$  and  $R_2$ . The values of  $R_1$  and  $R_2$  should be in the range of 1 k $\Omega$  to 2 M $\Omega$ .

## PRINCIPLES OF OPERATION

### Description of Controls

#### Frequency of Operation:

The frequency of oscillation,  $f_o$ , is determined by the external timing capacitor,  $C$ , across Pin 5 and 6, and by the timing resistor,  $R$ , connected to either Pin 7 or 8. The frequency is given as:

$$f_o = \frac{1}{RC} \text{ Hz}$$

and can be adjusted by varying either  $R$  or  $C$ . The recommended values of  $R$ , for a given frequency range, as shown in Figure 4. Temperature stability is optimum for 4 k $\Omega < R < 200$  k $\Omega$ . Recommended values of  $C$  are from 1000 pF to 100  $\mu$ F.

#### Frequency Sweep and Modulation:

Frequency of oscillation is proportional to the total timing current,  $I_T$ , drawn from Pin 7 or 8:

$$f = \frac{320 I_T \text{ (mA)}}{C \text{ (\mu F)}} \text{ Hz}$$

Timing terminals (Pin 7 or 8) are low-impedance points, and are internally biased at +3V, with respect to Pin 12. Frequency varies linearly with  $I_T$ , over a wide range of current values, from 1  $\mu$ A to 3 mA. The frequency can be controlled by applying a control voltage,  $V_C$ , to the activated timing pin as shown in Figure 9. The frequency of oscillation is related to  $V_C$  as:

$$f = \frac{1}{RC} \left( 1 + \frac{R}{R_C} \left( 1 - \frac{V_C}{3} \right) \right) \text{ Hz}$$

# XR-2206

where  $V_C$  is in volts. The voltage-to-frequency conversion gain,  $K$ , is given as:

$$K = \partial f / \partial V_C = - \frac{0.32}{R_C C} \text{ Hz/V}$$

**CAUTION:** For safety operation of the circuit,  $I_T$  should be limited to  $\leq 3$  mA.

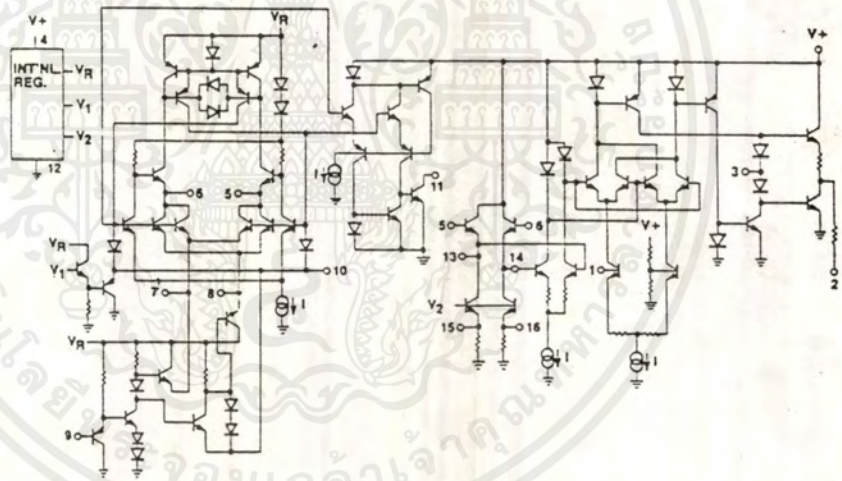
### Output Amplitude:

Maximum output amplitude is inversely proportional to the external resistor,  $R_3$ , connected to Pin 3 (see Figure 2). For sine wave output, amplitude is approximately 60 mV peak per  $k\Omega$  of  $R_3$ ; for triangle, the peak amplitude is approximately 160 mV peak per  $k\Omega$  of  $R_3$ . Thus, for example,  $R_3 = 50 k\Omega$  would produce approximately  $\pm 3V$  sinusoidal output amplitude.

### Amplitude Modulation:

Output amplitude can be modulated by applying a dc bias and a modulating signal to Pin 1. The internal impedance at Pin 1 is approximately 100  $k\Omega$ . Output amplitude varies linearly with the applied voltage at Pin 1, for values of dc bias at this pin, within  $\pm 4$  volts of  $V^+ / 2$ , as shown in Figure 5. As this bias level approaches  $V^+ / 2$ , the phase of the output signal is reversed, and the amplitude goes through zero. This property is suitable for phase-shift keying and suppressed-carrier AM generation. Total dynamic range of amplitude modulation is approximately 55 dB.

**CAUTION:** AM control must be used in conjunction with a well-regulated supply, since the output amplitude now becomes a function of  $V^+$ .



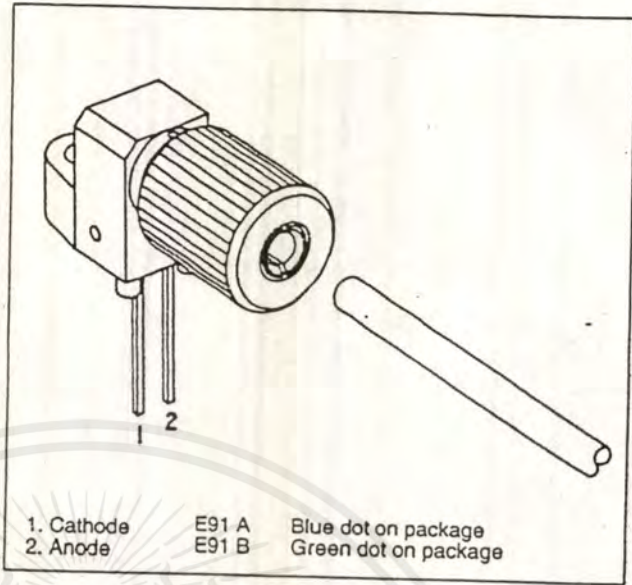
EQUIVALENT SCHEMATIC DIAGRAM

## 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

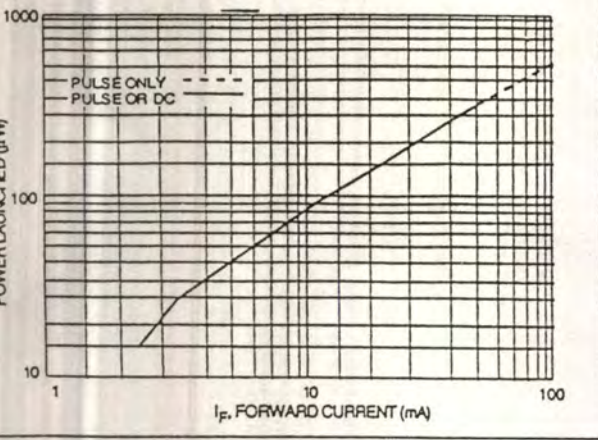


Figure 1. Normalized power launched versus forward current.

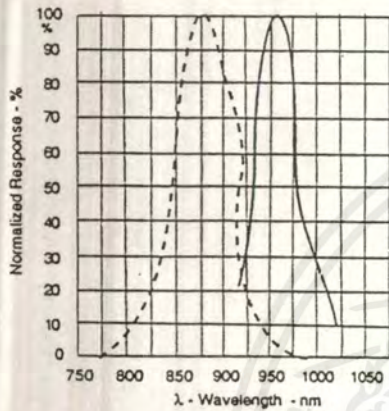
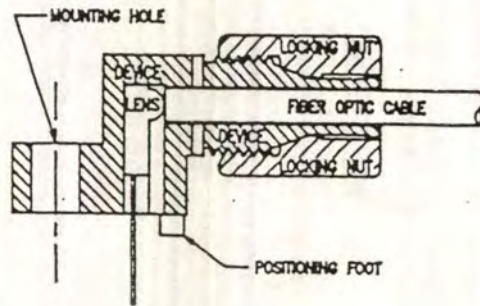


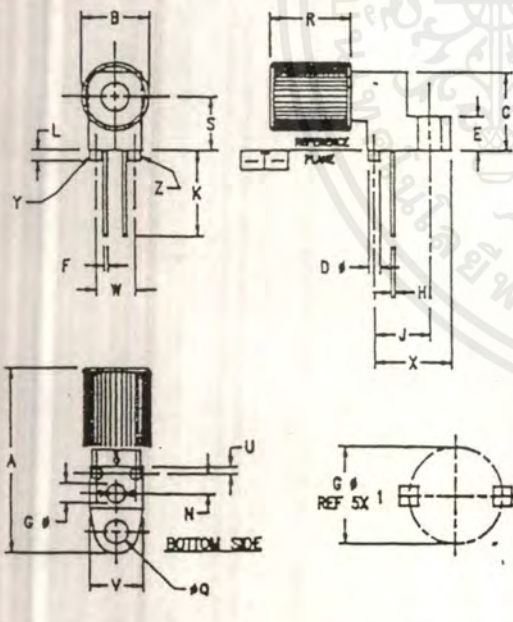
Figure 2. Typical spectral output versus wavelength.



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.



- NOTES:
1. Y AND Z ARE DATUM DIMENSIONS AND T IS A DATUM SURFACE.
  2. POSITIONAL TOLERANCE FOR D  $\phi$  (2 PL):  $\pm 0.25(0.010) \text{ T } | \text{ Y } | \text{ Z } |$
  3. POSITIONAL TOLERANCE FOR F DIM (2 PL):  $\pm 0.25(0.010) \text{ T } | \text{ Y } | \text{ Z } |$
  4. POSITIONAL TOLERANCE FOR H DIM (2 PL):  $\pm 0.25(0.010) \text{ T } | \text{ Y } | \text{ Z } |$
  5. POSITIONAL TOLERANCE FOR Q  $\phi$ :  $\pm 0.25(0.010) \text{ T } | \text{ Y } | \text{ Z } |$
  6. POSITIONAL TOLERANCE FOR B:  $\pm 0.25(0.010) \text{ T } |$
  7. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
  8. CONTROLLING DIMENSION: INCH

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	23.24	25.27	.915	.995
B	8.84	9.14	.340	.360
C	9.91	10.41	.390	.410
D	1.52	1.63	.060	.064
E	4.19	4.70	.165	.185
F	0.43	0.58	.017	.023
G	2.54 BSC		.100 BSC	
H	0.43	0.58	.017	.023
J	7.62 BSC		.300 BSC	
K	10.35	11.87	.408	.468
L	1.14	1.65	.045	.065
N	2.54 BSC		.100 BSC	
Q	.305	3.30	.120	.130
R	10.48	10.99	.413	.433
S	6.98 BSC		.275 BSC	
U	0.83	1.06	.032	.042
Y	6.86	7.11	.270	.280
W	5.08 BSC		.200 BSC	
X	10.10	10.68	.397	.427

STYLE 1:  
PIN 1. ANODE  
PIN 2. CATHODE

Figure 4. Case outline.

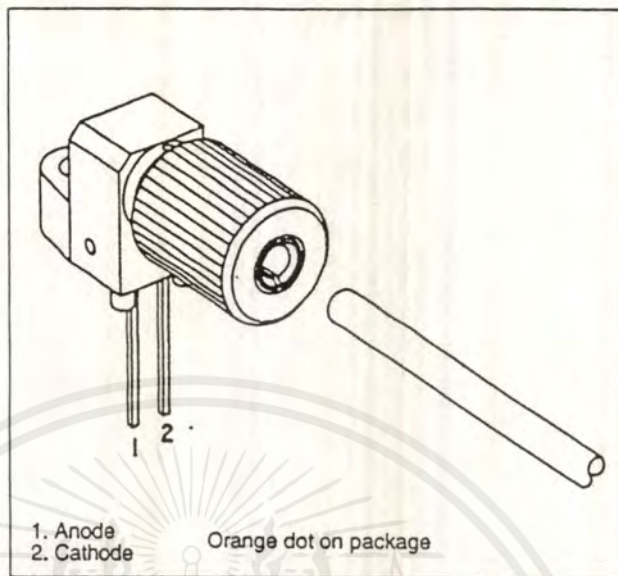
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**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-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 $S_{MAX}$ )	$\Delta\lambda$	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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

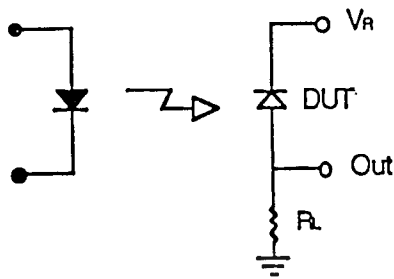


Figure 1. Circuit diagram for measuring rise and fall times.

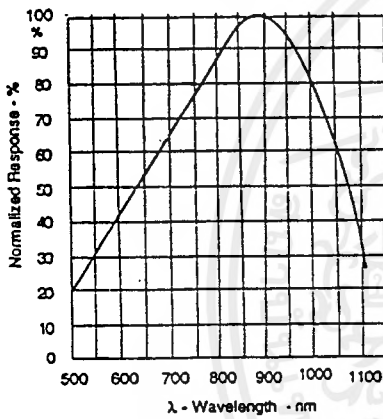
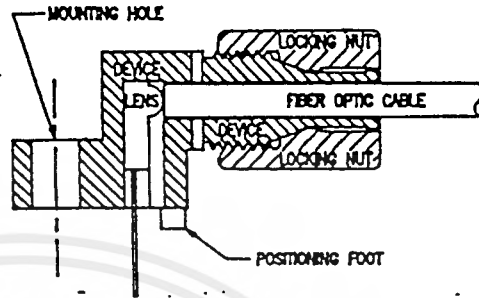


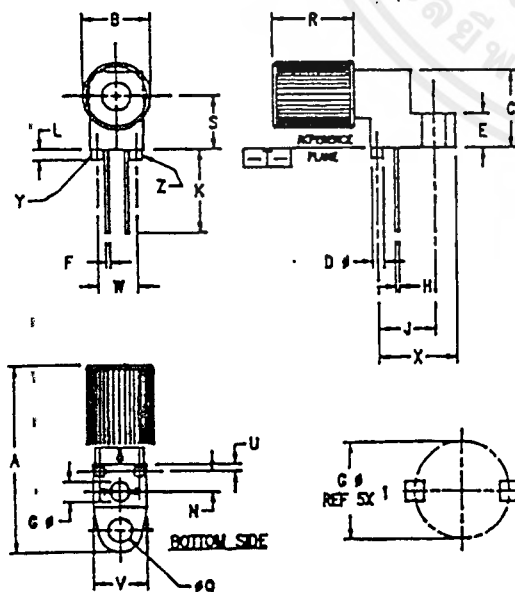
Figure 2. Typical detector response versus wavelength.



**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.



**NOTES:**

1. Y AND Z ARE DATUM DIMENSIONS AND T IS A DATUM SURFACE.
2. POSITIONAL TOLERANCE FOR D  $\phi$  (Z PL):  
 $\pm 0.25(0.010) \text{ T | Y } \oplus \text{ Z } \oplus$
3. POSITIONAL TOLERANCE FOR F  $\phi$  (Z PL):  
 $\pm 0.25(0.010) \text{ T | Y } \oplus \text{ Z } \oplus$
4. POSITIONAL TOLERANCE FOR H  $\phi$  (Z PL):  
 $\pm 0.25(0.010) \text{ T | Y } \oplus \text{ Z } \oplus$
5. POSITIONAL TOLERANCE FOR Q  $\phi$ :  
 $\pm 0.25(0.010) \text{ T | Y } \oplus \text{ Z } \oplus$
6. POSITIONAL TOLERANCE FOR E:  
 $\pm 0.25(0.010) \text{ T}$
7. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
8. CONTROLLING DIMENSION: INCH

STYLE 1:  
 PIN 1. ANODE  
 PIN 2. CATHODE

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	23.24	25.27	.915	.995
B	8.64	9.14	.340	.360
C	9.91	10.41	.390	.410
D	1.52	1.63	.060	.064
E	4.19	4.70	.163	.185
F	0.43	0.58	.017	.023
G	2.54 BSC		.100 BSC	
H	0.43	0.58	.017	.023
J	7.62 BSC		.300 BSC	
K	10.35	11.87	.408	.468
L	1.14	1.63	.045	.063
N	2.54 BSC		.100 BSC	
Q	3.05	3.30	.120	.130
R	10.48	10.99	.413	.433
S	6.98 BSC		.273 BSC	
U	0.83	1.04	.032	.042
V	6.86	7.11	.270	.280
W	5.08 BSC		.200 BSC	
X	10.10	10.68	.397	.427

Figure 4. Case outline.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

## เอกสารอ้างอิง

1. Jeff Hecht, "Light Sources", "Transmitter" & "Receiver" Understanding Fiber Optics, 1993 by Sams Publishing Second Edition pp.100-159
2. S.L. Wymer Meardon, "Introduction to Fiber Opticals", "Optical Sources" & "Photodetectors" The Element of Fiber Optics, 1993 by Regent Prentice Hall, pp. 1-10, 99-134
3. Waldo T. Boyd, "Basic Principles of Fiber Opticals", Fiber Optics Communication Experiments and Projects, 1986 by Howard W. Sams & Co., USA, pp 22-27
4. Louis E. Frenzel, "Amplitude Modulation" & "Frequency Modulation", Communication Electronics, 1994 McGraw-Hill Book Co., Second Edition. pp 18-59, 69-94.
5. Paul B. Zbar, Albert P. Malvino, Michael A. Miller, "Phase-Locked loop" Basic Electronics A Text-lab Manual, 1990 by McGraw-Hill Book Co., Sixth Edition. pp 267-272
6. Louis E. Frenzel, Jr. "Amplitude Modulation Circuits" & "Frequency Modulation Circuits", Activities Manual for Communication Electronics, 1990 by McGraw-Hill Co., USA, pp 11-25, 36-44
7. รศ.ดร. วิวัฒน์ กิรานนท์, "การสื่อสารด้วยแสง", พื้นฐานการสื่อสาร, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2538 พิมพ์ครั้งที่ 3 หน้า 131-144
8. ญัฐฉา สมบูรณ์, ญัฐฉา สุปถุสศักดิ์, วัชรพงษ์ ทวีสุข "การสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงทางเดียวแบบมัลติเพล็กซ์" วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาตรี ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2537

\*\*\*\*\*