

การส่งสัญญาณ FM สเตอริโอผ่านเส้นใยนำแสง



นาย ปริญญา สุขสำราญ
นาย ศิริวุฒิ เลิศวไลกุล

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 38542
วัน, เดือน, ปี..... 5 ม.ค. 2544

โครงการพิเศษที่เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FM Stereo Transmission via Fiber Optic Link



Mr. Prinya Suksumram

Mr. Sirivuth Lersvalaikul

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement

for the Degree of Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การส่งสัญญาณ FM สเตอริโอผ่านเส้นใยนำแสง
FM Stereo Transmission via Fiber Optic Link
โดย นาย ปรีญา สุขสำราญ รหัส 39054423
 นาย ศิริวุฒิ เกศวโลกกุล รหัส 39054446
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้นับ โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

(รศ. สุรพล รักรวิชัย)

คณะกรรมการ โครงการพิเศษ

.....

ประธานกรรมการ

(ผศ.ดร. ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล)

.....

กรรมการ

(อาจารย์ สุนัน อ่างประยูร)

กรรมการ

(อาจารย์ ชีรวัฒน์ ประกอบผล)

.....

กรรมการ

(อาจารย์ บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์)

ลิขิตrixของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title FM Stereo Transmission via Fiber Optic Link

Name Mr. Prinya Suksumrarn

 Mr. Sirivuth Lersvalaikul

Special project advisor Asst. Prof. Dr. Sirisak Techathawiekul

Department Applied Physics

Academic year 1999

Abstract

The purpose of this project is to build up a system for FM stereo transmission through an optical fiber. The system is composed of six major parts, namely audio signal , FM stereo transmitter , Driver , Receiver , Demodulator and Speaker. Each part has its own distinctive operation. Audio signal is modulated by frequency modulation (FM) method to become FM stereo signal and it is converted into optical signal at an LED with driver circuit and then this optical signal is transmitted via a single optical fiber to a photodiode that converts the optical signal into FM stereo signal again. After demodulation and then audio amplifying, the original audio signal is obtained at loudspeaker. It has been found that the system works well.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้จะไม่สำเร็จล่วงโดยสมบูรณ์ได้ ถ้าปราศจากความช่วยเหลือจากบุคคลดังต่อไปนี้

บิดา มารดา ผู้ให้ชีวิตและทุกสิ่งทุกอย่าง

ผศ.ดร. ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำและความช่วยเหลือต่าง ๆ ทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จล่วงไปด้วยดี

อ. สุน จ่างประยูร สำหรับอุปกรณ์ Oscilloscope และ Function generator

อ. ชวิษฐ์ ขาวประเสริฐ สำหรับห้องทำ Project

สุดท้ายขอขอบคุณ เพื่อน ๆ และ น้อง ๆ ทุกคนที่ทำให้กำลังใจเสมอมา

ปริญญา สุขสำราญ
ศิริวุฒิ เกิศวไลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์ในการทำโครงการพิเศษ	
1.2 ประโยชน์ที่ได้รับ	
บทที่ 2 ลักษณะพื้นฐานของแสง	2
2.1 บทนำ	
2.2 ประวัติความเป็นมาของเส้นใยแก้วนำแสง	
2.3 โครงสร้างของใยแก้วนำแสง	
2.4 การผลิตเส้นใยแก้วนำแสง	
2.5 ชนิดของใยแก้วนำแสง	
2.6 สายเคเบิลใยแก้วนำแสง	
2.7 การสื่อสารด้วยแสง	
2.8 สรุป	
บทที่ 3 คุณสมบัติใยแก้วนำแสง	24
3.1 การลดทอน	
3.2 การกระจายในใยแก้วนำแสง	
3.3 การเดินทางของแสงในใยแก้วนำแสง	
บทที่ 4 ระบบออปโตอิเล็กทรอนิกส์	44
4.1 แหล่งกำเนิดแสง	
4.2 วงจรขับ	
4.3 อุปกรณ์รับแสง	
4.4 คุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง	
4.5 วงจรอุปกรณ์รับแสง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง	หน้า
บทที่ 5 FM สเตอริโอ	68
5.1 บทนำ	
5.2 ระบบ FM สเตอริโอ	
บทที่ 6 หลักการและแนวคิดในโครงการ	88
6.1 สัญญาณเสียง	
6.2 ส่วนกำเนิดความถี่ FM สเตอริโอ	
6.3 ส่วนขับสัญญาณ	
6.4 ส่วนรับสัญญาณ	
6.5 ส่วนดีมอดูเลชัน	
6.6 ส่วนกระจายเสียง	
บทที่ 7 การออกแบบวงจรที่ใช้ในโครงการ	90
7.1 วงจรภาคส่ง	
7.2 วงจรภาครับ	
บทที่ 8 ผลการทดลองและสรุปผล	100
8.1 วงจรกำเนิดความถี่ FM สเตอริโอ	
8.2 วงจรขับและวงจรรับสัญญาณ	
8.3 วงจรดีมอดูเลต FM	
8.4 สรุปผลการทดลอง	
ภาคผนวก	105
บรรณานุกรม	116

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2-1 แสดงการตกกระทบของแสง	2
รูปที่ 2-2 แสดงการเดินทางของแสงภายในเส้นใยแก้วนำแสง โดยอาศัยหลักการการสะท้อนกลับหมด	4
รูปที่ 2-3 แสดงการโพลาไรเซชันของแสง	5
รูปที่ 2-4 แสดงแสงโพลาไรซ์ระนาบที่ตกกระทบทำมุม θ กับแกนโพลาไรซ์	5
รูปที่ 2-5 แสดงความสัมพันธ์ของแบนด์วิดท์และความยาวโคฮีเรนซ์	7
รูปที่ 2-6 ก) แสดงลักษณะของโหมคยาว ข) แสดงการกระจายของโหมคของแสงเลเซอร์	8
รูปที่ 2-7 แสดงลักษณะแสงที่ปลายเส้นใยนำแสง	9
รูปที่ 2-8 แสดงส่วนประกอบของเส้นใยแก้วนำแสง	11
รูปที่ 2-9 แสดงเครื่องดัดเส้นใยแก้วนำแสงและขั้นตอนต่างๆ	11
รูปที่ 2-10 แสดงลักษณะของแสงที่เดินทางภายในของเส้นใยแก้วนำแสง	14
รูปที่ 2-11 แสดงภาคตัดขวางของเส้นใยแก้วนำแสงโหมคเดี่ยว	14
รูปที่ 2-12 แสดงภาคตัดขวางของเส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมค	15
รูปที่ 2-13 แสดงชนิดของเส้นใยแก้วนำแสงตามลักษณะของดัชนีหักเหของแกน	15
รูปที่ 2-14 แสดงโหมคของแสงโพลาไรซ์สองโหมคที่ตั้งฉากกันและมีความเร็วต่างกัน	16
รูปที่ 2-15 แสดงตัวอย่างของเส้นใยแก้วนำแสงโพลีไบร์ฟรินเจนซ์บางชนิด	16
รูปที่ 2-16 แสดงตัวอย่างของเคเบิลใยแก้ว	17
รูปที่ 2-17 ผังแสดงระบบการสื่อสารใยแก้วนำแสง	19
รูปที่ 2-18 แสดงการผสมสัญญาณและการส่ง	20
รูปที่ 2-19 การมัลติเพลกซ์แบบแบ่งระยะทาง	21
รูปที่ 2-20 การมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความถี่	21
รูปที่ 2-21 การมัลติเพลกซ์แบบแบ่งเวลา	22
รูปที่ 2-22 การมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น	22
รูปที่ 2-23 ระบบสื่อสารเครือข่ายต่าง ๆ	23
รูปที่ 3-1 แสดงการลดทอนของแสงในใยแก้วนำแสงสัมพันธ์กับความยาวคลื่น	24
รูปที่ 3-2 แสดงการดูดกลืนจากไฮดรอกซิล	26
รูปที่ 3-3 แสดงทางเดินของแสงในใยแก้วนำแสงที่โค้งงอ	27
รูปที่ 3-4 แสดงการสูญเสียของเส้นใยแก้วนำแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ	28

	หน้า
รูปที่ 3-5 แสดงการสูญเสียที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ของ PCS	28
รูปที่ 3-6 แสดงสเปกตรัมของการลดทอน	29
รูปที่ 3-7 แสดงการเกิดการกระจายของพัลส์สัญญาณแบบต่าง ๆ	30
รูปที่ 3-8 แสดงสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง	30
รูปที่ 3-9 แสดงการเกิดกระจายของพัลส์	31
รูปที่ 3-10 แสดงการเกิดการกระจายเชิงวัสดุ	32
รูปที่ 3-11 แสดงลักษณะของท่อนำคลื่น	32
รูปที่ 3-12 แสดงมุมตกกระทบและทางเดินของแสง	33
รูปที่ 3-13 แสดงการแพร่ของคลื่นที่โหมดต่าง ๆ	34
รูปที่ 3-14 แสดงการกระจายของท่อนำคลื่น	35
รูปที่ 3-15 แสดงโหมดของการแพร่กระจายของแสง	37
รูปที่ 3-16 แสดงอินเดกซ์โปรไฟล์ของแกนใยแก้วนำแสง	38
รูปที่ 3-17 ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวชั้นบันได	39
รูปที่ 3-18 ใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดสเตปอินเดกซ์	39
รูปที่ 3-19 ใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดเกรดอินเดกซ์	40
รูปที่ 3-20 ไดอะแกรมของการหา NA ของใยแก้วชนิดดัชนีหักเหชั้นบันได	41
รูปที่ 3-21 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยแก้วนำแสง	42
รูปที่ 3-22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่นอร์มัลไลซ์	43
รูปที่ 4-1 แสดงชื่อเรียกและชนิดต่าง ๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	44
รูปที่ 4-2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างความกว้างของสเปกตรัมของ LED และเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์	45
รูปที่ 4-3 แสดงการส่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงสู่เส้นใยนำแสง	46
รูปที่ 4-4 แสดงลักษณะการทำงานของ LED	47
รูปที่ 4-5 แสดงระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำ	48
รูปที่ 4-6 แสดงลักษณะการส่งแสงของ LED	49
รูปที่ 4-7 แสดงการปล่อยแสงของ LED แบบ edge-emitter diode	49
รูปที่ 4-8 a) การดูดกลืนพลังงาน b) การปล่อยตามธรรมชาติ c) การปล่อยโดยการกระตุ้น	50
รูปที่ 4-9 แสดงพื้นฐานการเกิดเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์	51
รูปที่ 4-10 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสกับกำลังของแสงที่ปล่อย	52
รูปที่ 4-11 Fiber Transmission Windows	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 4-12 แสดงส่วนประกอบในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสง	55
รูปที่ 4-13 แสดงส่วนเชื่อมต่อทางแสงของตัวส่ง	56
รูปที่ 4-14 แสดงวงจรขับอย่างง่ายสำหรับ LED source	57
รูปที่ 4-15 แสดงวงจรขับของเลเซอร์ไดโอดแบบบนาลอก	58
รูปที่ 4-16 แสดงวงจรขับของเลเซอร์ไดโอดแบบดิจิทัล	58
รูปที่ 4-17 แสดงลักษณะของ Depletion zone	59
รูปที่ 4-18 a) เมื่อป้อนแรงดัน reverse bias	60
b) ลักษณะของ PN junction	60
c) แสดงระดับพลังงาน	60
รูปที่ 4-19 แสดงโครงสร้างของ PIN photodiode	61
รูปที่ 4-20 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสง	62
รูปที่ 4-21 แสดงโครงสร้างของอะวาแลนซ์โฟโอดีไดโอด	62
รูปที่ 4-22 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้และกระแสโฟโอดี	64
รูปที่ 4-23 บล็อกไดอะแกรมของวงจรรับแสง a) analog b) digital	65
รูปที่ 4-24 แสดงวงจรรับแสงของ PN และ PIN photodiode	65
รูปที่ 4-25 แสดงบล็อกไดอะแกรม PIN-FET receiver circuit	66
รูปที่ 4-26 แสดงวงจรรับแบบอะวาแลนซ์โฟโอดีไดโอดอย่างง่าย	66
รูปที่ 5-1 การผสมคลื่นเสียงเข้ากับคลื่นพาหะแบบ FM	
เมื่อสัญญาณเสียงมีความแรงต่างกัน	68
รูปที่ 5-2 การผสมคลื่นเสียงเข้ากับคลื่นพาหะแบบ FM	
เมื่อสัญญาณเสียงมีความถี่ต่างกัน	69
รูปที่ 5-3 สเปกตรัมความถี่ของวิทยุ FM ประกอบด้วยความถี่พาหะและไซด์แบนด์	70
รูปที่ 5-4 แสดงแบนด์วิธแต่ละสถานีของวิทยุกระจายเสียงย่าน FM	71
รูปที่ 5-5 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณในระบบสเตอริโอแมกนิเฟติกซ์	72
รูปที่ 5-6 สเปกตรัมของระบบสเตอริโอแมกนิเฟติกซ์ ซึ่งมีสัญญาณ SCA รวมอยู่ด้วย	73
รูปที่ 5-7 บล็อกไดอะแกรมแสดงเครื่องส่งวิทยุ FM แบบธรรมดา (Mono)	73
รูปที่ 5-8 วงจรรีแอกแทนซ์มอดูเลเตอร์	74
รูปที่ 5-9 วงจรมอดูเลเตอร์ใช้วาเรกเตอร์	75
รูปที่ 5-10 เฟสมอดูเลเตอร์ใช้ FET	76
รูปที่ 5-11 การมอดูเลตทางเฟสซึ่งเขียนแสดงด้วยเวกเตอร์	76
รูปที่ 5-12 เครื่องส่งวิทยุ FM สเตอริโอแมกนิเฟติกซ์	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5-13	บล็อกไดอะแกรมแสดงเครื่องรับวิทยุ FM แบบธรรมดา (Mono)	78
รูปที่ 5-14	วงจรถ่ายทอดดีเทกเตอร์	79
รูปที่ 5-15	เส้นโค้งผลตอบสนองต่อความถี่	79
รูปที่ 5-16	ดีเทกเตอร์ชนิดดับเบิ้ลจูน	80
รูปที่ 5-17	วงจรถ่ายทอด-ซีลี่ย์คิสคริเมเนเตอร์	81
รูปที่ 5-18	วงจรถ่ายทอดดีเทกเตอร์	83
รูปที่ 5-19	แผนผังของวงจรมอดชุนิตเฟสล็อกกลุ๊ป (PLL)	84
รูปที่ 5-20	เฟสล็อกกลุ๊ปใช้ IC	85
รูปที่ 5-21	เครื่องรับวิทยุ FM สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์	86
รูปที่ 5-22	วงจรถ่ายทอดสัญญาณสเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ ออกเป็นเสียงข้างซ้ายและข้างขวา	86
รูปที่ 6-1	แผนผังแสดงระบบของโครงการทั้งหมด	88
รูปที่ 7-1	วงจรถ่ายทอดความถี่ FM สเตอริโอ	90
รูปที่ 7-2	วงจรถ่ายทอด LED (IF-E91B) ที่ใช้ในโครงการ	92
รูปที่ 7-3	วงจรถ่ายทอดสัญญาณภาคส่ง	94
รูปที่ 7-4	วงจรถ่ายทอดก่อนขยาย (Transimpedance)	95
รูปที่ 7-5	วงจรถ่ายทอดสัญญาณ	96
รูปที่ 7-6	แผนผังของวงจรมอดชุนิต เฟสล็อกกลุ๊ป (PLL)	97
รูปที่ 7-7	วงจรถ่ายทอด FM สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ ดีโคเดเตอร์ แบบใช้ IC เฟสล็อกกลุ๊ปเบอร์ TA7343 P	97
รูปที่ 7-8	วงจรถ่ายทอดสัญญาณภาครับ	99
รูปที่ 8-1	วงจรถ่ายทอดสัญญาณของโครงการทั้งหมด	100
รูปที่ 8-2	เครื่องส่ง FM สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์	100
รูปที่ 8-3	สัญญาณเสียงช่องซ้าย (L) และขวา (R)	101
รูปที่ 8-4	สัญญาณไฟลิตอดความถี่ 19 KHz	101
รูปที่ 8-5	สัญญาณ FM สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์	101
รูปที่ 8-6	วงจรถ่ายทอดและวงจรถ่ายทอดสัญญาณ	102
รูปที่ 8-7	สัญญาณ FM สเตอริโอ ที่รับได้ที่วงจรถ่ายทอดสัญญาณ	102
รูปที่ 8-8	แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณ FM สเตอริโอ ที่ได้จากวงจรถ่ายทอดส่งและภาครับ	103
รูปที่ 8-9	วงจรถ่ายทอดสัญญาณ FM	103
รูปที่ 8-10	สัญญาณเสียงช่องซ้าย (L) และ ขวา(R) ที่ผ่านการติมอดชุนิตแล้ว	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
<u>ตารางที่ 2-1</u> ค่าดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางต่าง ๆ	3
<u>ตารางที่ 3-1</u> การสูญเสียจากการดูดกลืนของสารที่สารและความยาวคลื่นต่าง ๆ	25
<u>ตารางที่ 3-2</u> แสดงค่าจากการคำนวณ	34
<u>ตารางที่ 3-3</u> แสดงการคำนวณ	35
<u>ตารางที่ 3-4</u> แสดงเวลาที่เพิ่มขึ้นของการใช้แหล่งกำเนิดแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ	36
<u>ตารางที่ 4-1</u> แสดงธาตุหมู่ที่ 3a และ 5a ที่มีความสำคัญ	47
<u>ตารางที่ 4-2</u> แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง	64
<u>ตารางที่ 4-3</u> ตารางเปรียบเทียบตัวรับแสงชนิดต่างๆ	67



บทที่ 1

บทนำ

เนื่องจากในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีทางด้านเส้นใยนำแสงได้มีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วและกว้างขวาง โดยการพัฒนามากจะใช้ไปในด้านที่เกี่ยวกับการสื่อสารโดยผ่านเส้นใยนำแสงซึ่งเป็นเหตุให้เกิดโครงการนี้ขึ้นมา คือ การศึกษาการเชื่อมต่อสัญญาณ FM สเตริโอโดยผ่านเส้นใยนำแสงซึ่งความรู้ที่ได้จากโครงการนี้สามารถที่จะนำไปพัฒนาให้เกิดประโยชน์ได้ในอนาคต

1.1 วัตถุประสงค์ในการทำโครงการพิเศษ

1. เพื่อศึกษาหลักการและการใช้งานเส้นใยนำแสง
2. เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรที่ใช้เกี่ยวกับการสื่อสารที่ใช้สัญญาณ FM สเตริโอผ่านทางเส้นใยแก้วนำแสง
3. เป็นการศึกษาเพื่อนำโครงการนี้ไปใช้ในอนาคต

1.2 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้เข้าใจหลักการทำงานและทฤษฎีของเส้นใยนำแสง
2. ทำให้เข้าใจวงจรส่วนต่างๆ ที่ใช้ในการเชื่อมต่อสัญญาณ FM สเตริโอผ่านเส้นใยแก้วนำแสง
3. ทำให้เข้าใจหลักการทำงานของการเชื่อมต่อสัญญาณ FM สเตริโอโดยผ่านเส้นใยแก้วนำแสง
4. สามารถนำเอาหลักการและวงจรบางส่วนไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในงานด้านอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

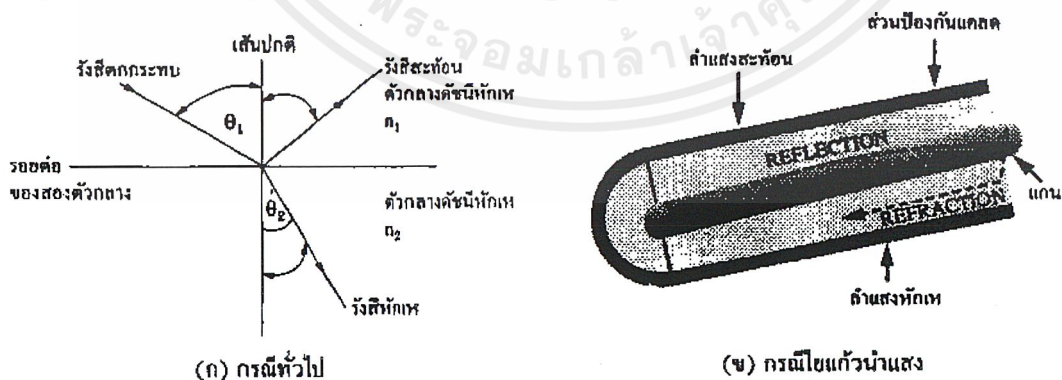
ลักษณะพื้นฐานของแสง

2.1 บทนำ

ปรากฏการณ์ทางแสงในบทนี้นั้นจะกล่าวถึงเฉพาะปรากฏการณ์พื้นฐานที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับการใช้งานใยแก้วนำแสง เช่น การหักเห (Refraction) และการสะท้อนกลับหมด (Total Internal Reflection) ของแสง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้แสงสามารถเดินทางอยู่ในใยแก้วนำแสงได้ และยังจะกล่าวต่อไปในเรื่องการหักเหสองแนว (Birefringence) และการโพลาไรเซชัน (Polarization) อันเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของแสงในใยแก้วนำแสงที่มีโครงสร้างภายในที่มีลักษณะเป็นผลึกหักเหสองแนว นอกจากนี้กล่าวถึงเรื่องของการแทรกสอด (Interference) และการเลี้ยวเบน (Diffraction) ของแสงด้วย เป็นต้น

2.1.1 ฟิสิกส์ของแสง (Physics of light)

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางด้วยความเร็วประมาณ 3×10^8 เมตร/วินาทีในสุญญากาศ ซึ่งความเร็วของแสงในสุญญากาศสำหรับทุก ๆ ความยาวคลื่นหรือความถี่นั้นมีค่าเท่ากัน อย่างไรก็ตาม ความเร็วของแสงจะมีค่าเปลี่ยนไปเมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งที่มีความหนาแน่นไม่เท่าเดิม จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้แสงเกิดการหักเห คุณสมบัติการหักเหของแสงนี้เองที่ทำให้แสงมีพฤติกรรมต่าง ๆ ขณะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง การเคลื่อนที่ของแสงในใยแก้วนำแสงก็อาศัยหลักการทางฟิสิกส์นี้เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เมื่อกำหนดให้ θ_1 และ θ_2 คือ มุมตกกระทบและมุมหักเหที่ลำแสงกระทำกับเส้นปกติ



รูปที่ 2-1 แสดงการตกกระทบของแสง

พฤติกรรมของแสงในใยแก้วนำแสงนั้นสามารถวิเคราะห์ได้อย่างสมบูรณ์ด้วยสมการของคลื่นที่ค่อนข้างซับซ้อน อย่างไรก็ตามในการใช้งานนั้นมักใช้วิธีทางเรขาคณิตเพราะง่ายกว่าและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถอธิบายได้ ในส่วนของรายละเอียดในการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์นั้นจะกล่าวถึงบ้างในโอกาสต่อไป

2.1.2 ปรัชญาการหักเหของแสงเบื้องต้น

ดัชนีหักเหของแสง

การหักเหของแสงเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของแสงในตัวกลางซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความเร็วแสงในสุญญากาศกับความเร็วของแสงในตัวกลางที่แสงผ่าน ค่าของอัตราส่วนของความเร็วนี้ เรียกว่า ดัชนีหักเห (n) ซึ่งแทนด้วยความสัมพันธ์

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

เมื่อ c และ v คือ ความเร็วของแสงในสุญญากาศ และในตัวกลางใด ๆ ตามลำดับ ดัชนีหักเหของแสงนั้นขึ้นอยู่กับความถี่ของแสงด้วยทั้งนี้เพราะความเร็วของแสงมีความสัมพันธ์กับความถี่และความยาวคลื่น คือ $\lambda = c / v$ เมื่อ v และ λ คือ ความถี่และความยาวคลื่นของแสง ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 2.1 ข้างล่างเป็นตัวอย่างของค่าดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 2-1 ค่าดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางต่าง ๆ

ตัวกลาง	ค่าดัชนีหักเห
สุญญากาศ (Vacuum)	1.00
อากาศ (Air)	1.0003
น้ำ (Water)	1.33
เอทิล แอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol)	1.36
ควอर्टซ์ (Fused Quarts)	1.46
แก้ว (Glass Fiber)	1.50-1.90
เพชร (Diamond)	2.00-2.42
ซิลิคอน (Silicon)	3.40
แกเลียม อาร์เซไนด์ (Gallium-Arsenide)	3.6

การสะท้อนกลับหมด

เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางสองชนิดที่มีดัชนีการหักเหต่างกันจะทำให้มีการหักเหของแสงเป็นไปตามกฎของสเนลล์ (Snell's Law) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

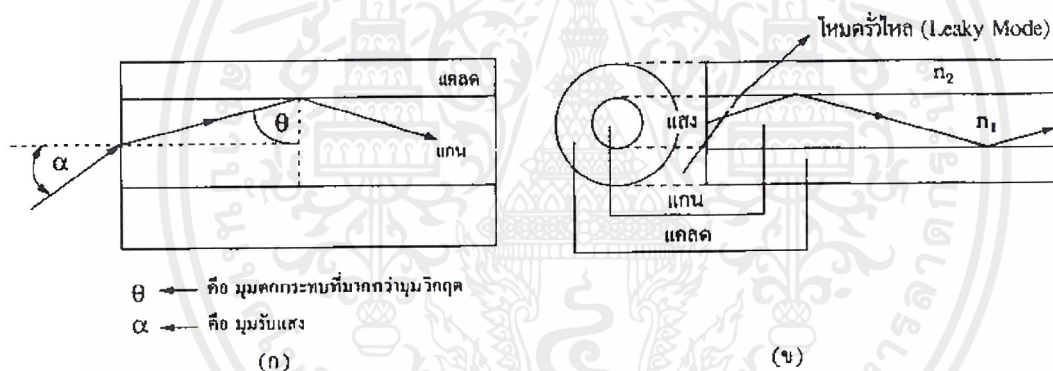
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad 2.2$$

ในที่นี้ θ_1 และ θ_2 คือ มุมตกกระทบและมุมหักเหที่ลำแสงกระทำกับเส้นปกติ (Normal Line) บนพื้นผิวรอยต่อของตัวกลางทั้งสองนั้น ส่วน n_1 และ n_2 คือ ดัชนีหักเหแสงของตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 1.1

พิจารณากรณีที่แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหมากกว่าไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเหน้อย กล่าวคือ เมื่อมุมตกกระทบ θ_1 มีค่ามากขึ้นก็จะทำให้มุมหักเห θ_2 มีค่าเข้าใกล้ 90° เรียกมุมตกกระทบที่ทำให้มุมหักเหเท่ากับ 90° นี้ว่ามุมวิกฤต (Critical Angle, θ_c) ดังสมการ (1.3) และหากเพิ่มมุมตกกระทบอีกจน ($\theta > \theta_c$) ก็จะทำให้แสงไม่สามารถที่จะเดินทางเข้าไปในตัวกลางที่สองได้เลย นั่นคือเกิดการสะท้อนกลับหมดภายในนั่นเอง

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_{clad}}{n_{core}} \right) \quad 2.3$$

เมื่อ n_{core} และ n_{clad} คือค่าดัชนีหักเหของแกน (Core) และส่วนห่อหุ้ม หรือ แคลด (Cladding) ของใยแก้วนำแสงตามลำดับ



รูปที่ 2.2 แสดงการเดินทางของแสงภายในเส้นใยแก้วนำแสงโดยอาศัยหลักการการสะท้อนกลับหมด

ในการนำแสงเข้าสู่เส้นใยแก้วนำแสงดังรูปที่ 2.2 ทำได้โดยทำให้ดัชนีหักเหของแกนมีค่ามากกว่าดัชนีหักเหของแคลดซึ่งหุ้มส่วนของแกนไว้ โดยอาศัยหลักการสะท้อนกลับหมดภายในของแสงดังกล่าวข้างต้นก็สามารถจะทำให้แสงที่ป้อนเข้าไปในแกนเดินทางไปมาภายในแกนอยู่ได้

การแทรกสอดและการเลี้ยวเบน

การแทรกสอด (Interference) เกิดขึ้นเมื่อคลื่นสองขบวนหรือมากกว่าคลื่นที่มาซ้อนกันที่ตำแหน่งเดียวกัน ผลที่ได้จากการแทรกสอดนี้สามารถอธิบายในทอมมแอมพริจูดของคลื่นได้ โทมัส ยัง (Thomas Young) ได้ทำการทดลองการเกิดการแทรกสอดของแสงโดยใช้ช่องเล็กยาว (Slit) คู่ กล่าวคือเมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่นเดียวเคลื่อนที่ผ่านช่องเล็กคู่ดังกล่าวก็ จะปรากฏริ้วสว่างสลับกับริ้วมืดบนฉากที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนเฟสและแอมพลิจูดของคลื่น โดยที่

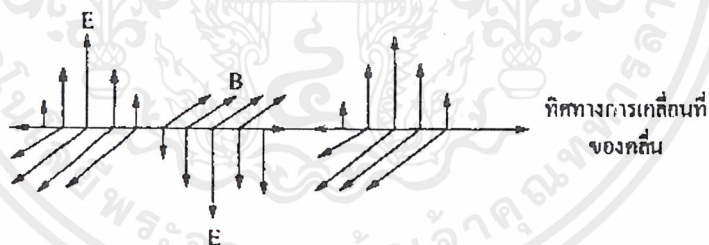
ริ้วสว่างนั้นความเข้มของแสงจะมีแอมพลิจูดที่มากที่สุด หรือเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน (Constructive Interference) ส่วนริ้วมืดนั้นความเข้มของแสงจะมีแอมพลิจูดเป็นศูนย์ หรือ เกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกัน (Destructive Interference)

โพลาไรเซชัน

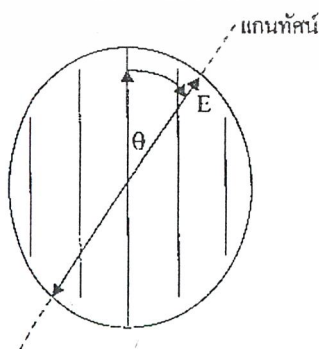
การแทรกสอดและการเลี้ยวเบนเกิดขึ้นได้กับคลื่นทุกชนิดทั้งคลื่นตามขวาง เช่น คลื่นแสง และคลื่นตามยาวเช่นคลื่นเสียง แต่ในกรณีของโพลาไรเซชัน (Polarization) จะเกิดขึ้นเฉพาะคลื่นตามขวางเท่านั้น เป็นที่ทราบกันดีว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้า (E) ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก (B) และตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น โดยทั่วไปแสงจะไม่โพลาไรซ์ซึ่งก็คือสนามไฟฟ้ามีการสั่นในหลายๆ ระนาบ ณ เวลาเดียวกัน ถ้าแสงไม่โพลาไรซ์เคลื่อนที่ผ่านแผ่นโพลาไรซ์ (Polaroid) โดยทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าขนานกับแกนของแผ่นโพลาไรซ์ก็จะมีลักษณะพิเศษคือ ยอมให้แสงโพลาไรซ์ในทิศทางที่ขนานกับแกนผ่านไปได้ เมื่อแสงโพลาไรซ์ระนาบตกกระทบบนมุม θ กับแกนของโพลาไรซ์ ดังรูปที่ 2.3 และ 2.4 สนามไฟฟ้าส่วนที่ขนานกับแกนของแผ่นโพลาไรซ์คือ $E \cos \theta$ จะสามารถผ่านแผ่นโพลาไรซ์ออกมาได้ เนื่องจากความเข้มของแสงเป็นปริมาณโดยตรงกับแอมพลิจูดยกกำลังสอง ซึ่งจะได้ความเข้มแสงโพลาไรซ์ระนาบ (I) ที่ผ่านออกมาจากแผ่นโพลาไรซ์ดังสมการ (2.4) หรือที่เรียกว่า กฎของมาลุส (Malus's Law) คือ

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad 2.4$$

เมื่อ I_0 เป็นความเข้มแสงที่ตกกระทบบมากที่สุดเข้ามายังแผ่นโพลาไรซ์



รูปที่ 2-3 แสดงการโพลาไรเซชันของแสง



รูปที่ 2-4 แสดงแสงโพลาไรซ์ระนาบที่ตกกระทบบนมุม θ กับแกนโพลาไรซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่นี้แผ่นโพลารอยด์ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์โพลาไรซ์ (Polarizer) หรือตัวทำแสงโพลาไรซ์ โดยทำให้แสงที่ผ่านแผ่นโพลารอยด์ให้เป็นแสงโพลาไรซ์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้แผ่นโพลารอยด์อีกแผ่นหนึ่งวางในแนวเดียวกันซึ่งทำหน้าที่เป็นตัววิเคราะห์ (Analyzer) โดยทำหน้าที่จัดมุมของการโพลาไรซ์ของแสงที่ผ่าน กล่าวคือ เมื่อวางแกนของอุปกรณ์โพลาไรซ์สองแผ่นตั้งฉากกัน (90°) ก็จะไม่มีความเข้มแสงส่งผ่านออกมา แต่ถ้าหมุนตัววิเคราะห์ให้ทำมุมกัน 0° กับอุปกรณ์ทำแสงโพลาไรซ์ เมื่อให้ความเข้มแสงโพลาไรซ์ระนาบที่ออกจากอุปกรณ์ทำแสงโพลาไรซ์ไปยังตัววิเคราะห์เป็น I_0 ความเข้มแสงที่ออกจากตัววิเคราะห์ก็จะเป็นไปตามกฎของมาลุส เมื่อหมุนตัววิเคราะห์ไปเป็นมุมต่างๆ เพื่อหาความเข้มแสงสูงสุด (I_{\max}) และความเข้มแสงต่ำสุด (I_{\min}) ก็จะสามารถหาอัตราส่วนระหว่างความเข้มแสงสูงสุดและความเข้มแสงต่ำสุดที่ผ่านออกมาหรือเป็นการวัดคุณภาพของลำแสงโพลาไรซ์ (Extinction Ratio, ER)

$$ER = \left(\frac{I_{\max}}{I_{\min}} \right) \quad 2.5$$

ถ้าความแตกต่างระหว่าง I_{\max} และ I_{\min} มีค่ามาก ก็จะทำให้ค่า ER มาก นั่นคือ คุณภาพของลำแสงโพลาไรซ์มีคุณภาพดี

การหักเหสองแนว

แสงเคลื่อนที่ในตัวกลางสมมาตร (Isotropic) ความเร็วของแสงจะเท่ากันในทุกทิศทาง แต่ในตัวกลางอสมมาตร (Anisotropic) ถึงแม้จะเป็นตัวกลางเนื้อเดียวกันความเร็วของแสงในทิศทางที่ต่างกันจะไม่เท่ากัน ซึ่งตัวกลางชนิดนี้จะมีดัชนีหักเหแสงในสองทิศทางซึ่งหมายถึงแสงในแนวขนานและตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ ความแตกต่างกันของความเร็วเพียงเล็กน้อยนี้ทำให้เกิดการหักเหสองแนว หรือ ไบรฟ์รินเจนซ์ (Birefringence) ซึ่งแทนด้วยความสัมพันธ์คือ $B = (n_x - n_y)$ เมื่อ n_x และ n_y คือองค์ประกอบของค่าดัชนีหักเหแสงในแนวแกน x และ y ตามลำดับ

ความยาวโคฮีเรนซ์

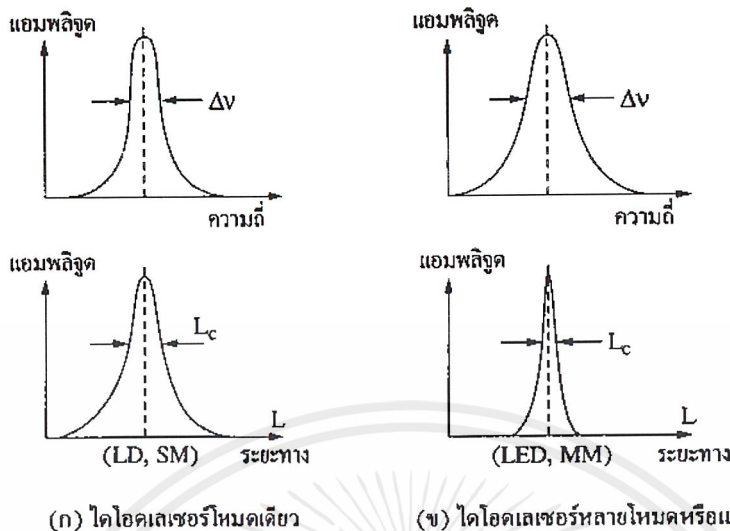
ความยาวโคฮีเรนซ์ (Coherence Length) เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดแสง โดยความยาวโคฮีเรนซ์นั้นจะแปรผกผันกับแบนด์วิดท์ของแหล่งกำเนิดแสง ดังตัวอย่างเช่น ไดโอดเลเซอร์ชนิดหลายโหมด จะมีแบนด์วิดท์กว้างกว่าชนิดโหมดเดียวแต่จะมีความยาวโคฮีเรนซ์สั้นกว่า รูปที่ 2.5 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างไดโอดเลเซอร์ (Laser Diode, LD) และ แอลอีดี (Light Emitting Diode, LED) ไดโอดเลเซอร์ชนิดโหมดเดียว (Single Mode, SM) และชนิดหลายโหมด (Multimode, MM)

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวโคฮีเรนซ์ และแบนด์วิดท์ของแหล่งกำเนิดแสงซึ่งเป็นสมการดังนี้ คือ

$$L_c = \frac{c}{\Delta\nu} = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad 2.6$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ L_c คือความยาวโคฮีเรนซ์ $\Delta\nu$ คือแบนด์วิดท์ λ คือความยาวคลื่น และ $\Delta\lambda$ คือไลน์วิดท์ (Line Width) ของแหล่งกำเนิดแสง ส่วน c คือความเร็วแสงในสุญญากาศ



รูปที่ 2-5 แสดงความสัมพันธ์ของแบนด์วิดท์และความยาวโคฮีเรนซ์

ความยาวบิตของเส้นใยนำแสง

ความยาวบิต (Beat Length, L_B) ของใยแก้วนำแสง คือค่าที่ใช้บอกถึงความสามารถในการรักษาสภาวะของโพลาไรเซชันของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสภาวะดพราไรเซชัน (Polarization Maintaining Fiber) แต่ละชนิด นั่นคือถ้าเส้นใยแก้วนำแสงใดมีค่าความยาวบิตที่สั้นก็จะมีคุณสมบัติของการรักษาสภาวะโพลาไรเซชันได้ดี ความยาวบิตของเส้นใยแก้วนำแสงสามารถหาได้จากสมการ

$$L_B = \frac{\lambda}{B} \quad 2.7$$

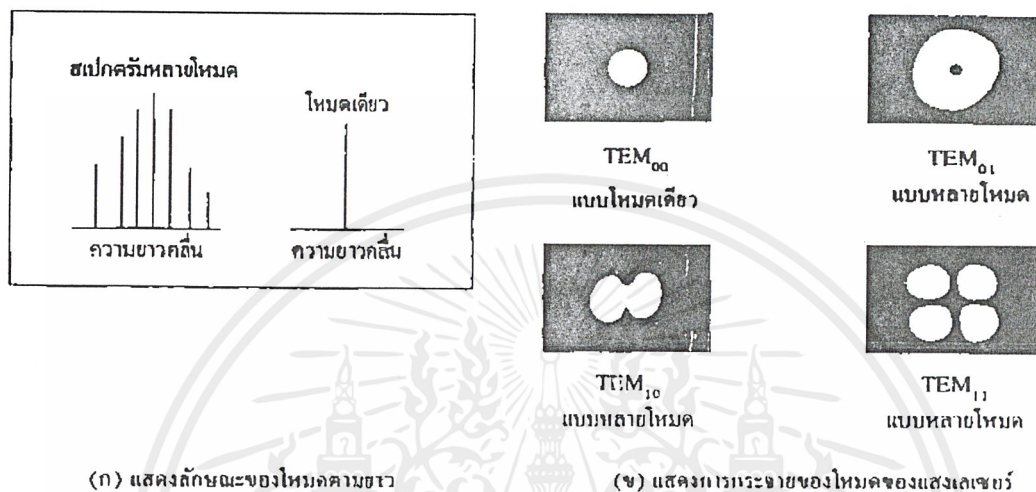
เมื่อ λ คือความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงที่ส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง B คือออร์มัลไลซ์ไบร์พริเนชัน ดังนั้นเส้นใยแก้วนำแสงเส้นใดมีการกระจายค่าดัชนีหักเหในส่วนของแกนมากก็จะมีค่าออร์มัลไลซ์ไบร์พริเนชันมากซึ่งทำให้มีค่าความยาวบิตสั้น

โหมดของแสงเลเซอร์

เนื่องจากออปติคัลเรโซเนเตอร์ (Optical Resonator) ในระบบเลเซอร์นั้นเป็นโพรงแบบฟาบรีเพอร์โรต์ (Fabry-Perot Cavity) ทำให้แสงเลเซอร์ที่ผ่านออกมามีความถี่ต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับคุณสมบัติของเรโซเนเตอร์ที่กำหนด ในกรณีนี้พบว่าแสงเลเซอร์นั้นจะประกอบไปด้วยโหมด (Modes) ต่างๆ ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) โดยแบบของการกระจายอาจจะพิจารณาได้เป็น 2 แบบ คือ โหมดตามยาว (Longitudinal Modes หรือ Axial Modes) ซึ่งเป็นแบบการเปล่งแสงเป็นสเปกตรัมของความยาวคลื่น รูปที่ 2.6 (ข) แสดงการกระจายพลังงานของแสง ด้วยจุดของแสงที่เกิดขึ้นนั้นเป็นการแสดงโหมดตามขวาง (Transverse Modes) ที่แทนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Transverse Electromagnetic Wave, TEM) ประกอบด้วย (ก) แบบโหนดเดียวหรือ TEM_{00} ส่วน (ข) TEM_{01} (ค) TEM_{10} และ (ง) TEM_{11} เป็นแบบหลายโหนด เมื่อแสงเลเซอร์ถูกนำไปในใยแก้วนำแสงก็จะพิจารณาให้เป็นกรณีของวิกกีโกดิง (Weaky Guiding) ซึ่งโหนดตามขวางของแสงเลเซอร์ที่เกิดขึ้นเรียกว่าโหนดโพลาไรซ์เชิงเส้น (Linear Polarized, LP) รูปที่ 2.7 แสดงโหนดของแสงที่ปลายเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหนดเดียวคือ LP_{01} และชนิดหลายโหนด LP_{21} และ LP_{33} ตามลำดับ



รูปที่ 2-6

ความเข้มแสงเปรียบเทียบ

อัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่างความเข้มแสงอินพุตและเอาต์พุต หรือความเข้มแสงนอร์มัลไรซ์ (Normalized Intensity) กล่าวคือการตรวจวัดความเข้มแสงจากการเริ่มต้นด้วยความเข้มแสงอินพุตค่าหนึ่ง (I_0) ก่อนที่ทำการตรวจวัดในระบบแสงแต่ละครั้งจะทำการนอร์มัลไรซ์ความเข้มแสงในระบบ เพื่อเป็นการหาอัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่างความเข้มแสงอินพุตกับความเข้มแสงในระบบการวัดที่มีค่าไม่เกินหนึ่ง เนื่องจากการทดลองในแต่ละครั้งนั้นความสามารถในการจัดเรียงอุปกรณ์ทางแสงรวมไปถึงค่าที่ทำการตรวจวัดนั้นอาจไม่เท่าเดิม แต่เมื่อจัดให้อยู่ในรูปอัตราส่วนซึ่งเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้นค่าหนึ่งก่อนการตรวจวัดในแต่ละครั้งก็จะจัดให้มีอัตราส่วนเดียวกันเสมอ

คุณภาพของลำแสงโพลาไรซ์

การวัดคุณภาพของลำแสง โพลาไรซ์นั้นทำได้คือ เมื่อหมุนคู่ของแผ่นโพลาไรซ์ที่จัดเป็นอุปกรณ์วิเคราะห์แสงจนกระทั่งไปอยู่ตำแหน่งที่สามารถที่จะวัดความเข้มของแสงได้มากที่สุดแล้วจากนั้นก็หมุนแผ่นโพลาไรซ์ที่ทำหน้าที่เป็นตัววิเคราะห์ตั้งฉากหรือทำมุม 90° จากระนาบเดิมก็จะได้ความเข้มแสงที่น้อยที่สุด (โดยวัดในรูปของความเข้มแสงหรือกำลังของแสง) แล้วเขียนความสัมพันธ์ของอัตราส่วนได้ดังสมการ

$$ER = \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \quad 2.8$$

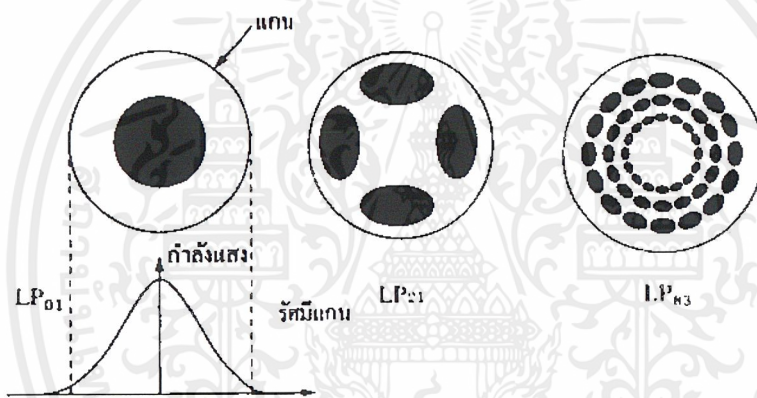
เมื่อ P_{\max} คือ กำลังแสงที่มากที่สุดที่วัดได้

P_{\min} คือ กำลังแสงที่น้อยที่สุดที่วัดได้

ดังนั้นคุณภาพของลำแสงโพลาไรซ์สามารถที่จะบอกได้จากพารามิเตอร์ ER หรืออัตราส่วนของความแตกต่างของกำลังแสงมากที่สุดและน้อยที่สุดอย่างชัดเจน ถ้าความแตกต่างระหว่าง P_{\max} กับ P_{\min} มีค่ามากจะทำให้ ER มาก นั่นคือคุณภาพลำแสงโพลาไรซ์มีการจำแนกที่ดี ความชัดเจนของรีวิการแทรกสอด

ความชัดเจนของรีวิการแทรกสอด (Visibility, Q) มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$Q = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad 2.9$$



รูปที่ 2-7 แสดงลักษณะแสงที่ปลายเส้นใยนำแสง

เมื่อ I_{\max} และ I_{\min} คือ ค่าความเข้มสูงสุดและต่ำสุดของแสง โดยพิจารณา Q มีค่าระหว่าง $0 \leq Q \leq 1$ กล่าวคือ ถ้าหาก $Q = 1$ จะแสดงความชัดเจนของรีวิได้ชัดเจนที่สุดโดยแยกความสว่างและมีได้ชัดเจน แต่ถ้า $Q = 0$ แสดงว่าไม่สามารถที่จะแยกความชัดเจนของรีวิได้

ค่าการลดทอนของแสงภายในเส้นใยแก้วนำแสง

เมื่อทำการส่งสัญญาณผ่านสายส่งออกไปก็ย่อมเกิดการลดทอน (Attenuation) ของสัญญาณขึ้นเป็นธรรมดา การคิดว่าการลดทอนของแสงภายในใยแก้วนำแสงจะบอกเป็นอัตราส่วนของกำลังสัญญาณในหน่วยเดซิเบล (dB) หรือในหน่วย dBm (dBm เป็นการเปรียบเทียบกำลังของสัญญาณกับระดับกำลังของสัญญาณอ้างอิง เมื่อกำลังอินพุต $P_i = 1 \text{ mW}$) โดยพิจารณาสมการ (2.10)

$$L_{dB} = -10 \log\left(\frac{P_o}{P_i}\right) \quad 2.10$$

เมื่อ P_o คือ กำลังของแสงเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P_1 คือ กำลังของแสงอินพุตที่ป้อนเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง

ดังนั้น กำลังการสูญเสียต่ำที่สุดของเส้นใยแก้วนำแสงขึ้นอยู่กับความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงและค่าความยาวของคลื่นแสงที่ใช้

2.2 ประวัติความเป็นมาของเส้นใยแก้วนำแสง

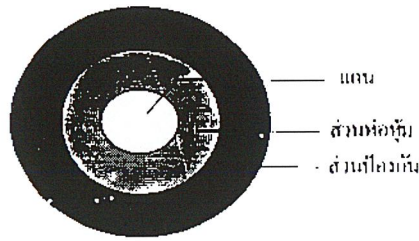
การใช้แสงเป็นสื่อในการนำสัญญาณแล้วส่งไปในตัวกลางต่างๆ นั้น ได้เริ่มขึ้นจากที่นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษชื่อ จอห์น ไทด์ล (John Tydall) ได้พบว่าแสงสามารถส่งผ่านไปตามลำน้ำได้ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2413 จากจุดเริ่มต้นนี้ก็ได้มีความพยายามกันเป็นเวลานานที่จะทำให้ปรากฏการณ์นี้มีประโยชน์ในทางปฏิบัติได้ จนกระทั่งในปี พ.ศ. 2503 ก้าวสำคัญของการเปลี่ยนแปลงก็มาถึงเมื่อมีการทดลองใช้เลเซอร์เป็นครั้งแรก ต่อมาในปี พ.ศ. 2509 ก็มีนักวิทยาศาสตร์สองคนของสหราชอาณาจักร ชื่อ ฮอลแคม (G.A. Hockham) และเกา (C.C. Kao) ได้ทำการศึกษาวิจัยว่าตัวกลางที่ทำด้วยใยแก้วนำแสงสามารถส่งผ่านแสงได้ 1% ของแสงอินพุตด้วยระยะทาง 1 กิโลเมตร และตัวกลางนี้จะเป็นคู่แข่งสำคัญกับสายทองแดงหรือสายหุ้มฉนวน (Coaxial Cable) จากนั้นด้วยความก้าวหน้าทางวัสดุศาสตร์เรื่อยมา จนปัจจุบันทำให้สามารถมีใยแก้วนำแสงที่มีการส่งผ่านแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ หรือมีการสูญเสียต่ำได้ ใยแก้วนำแสงบางชนิดซึ่งอาจมีการสูญเสียต่ำมาก คือ มีการสูญเสียเพียง 0.1 เดซิเบลต่อกิโลเมตร (dB/km) เท่านั้น

2.3 โครงสร้างของใยแก้วนำแสง

ส่วนประกอบของใยแก้วนำแสงประกอบด้วยส่วนสำคัญ คือส่วนที่เป็นแกนอยู่ตรงกลางหรือชั้นในแล้วหุ้มด้วยส่วนที่เป็นเคลด แล้วถูกหุ้มด้วยส่วนป้องกัน (Coating) โดยที่แต่ละส่วนนั้นทำด้วยวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงที่มีค่าแตกต่างกัน ทั้งนี้เพราะต้องคำนึงถึงหลักการหักเหและสะท้อนกลับหมดของแสง ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว

แกน : เป็นส่วนตรงกลางของเส้นใยแก้วนำแสง และเป็นส่วนนำแสง โดยดัชนีหักเหของแสงส่วนนี้ต้องมากกว่าของส่วนเคลดแล้วลำแสงที่ผ่านไปภายในแกนจะถูกขังหรือเคลื่อนที่ไปตามเส้นใยแก้วนำแสงด้วยขบวนการสะท้อนกลับหมดภายใน (ดูรูปที่ 2.8)

ส่วนป้องกัน : เป็นชั้นที่ต่อจากเคลดเป็นที่กันแสงจากภายนอกเข้าเส้นใยแก้วนำแสง และกันแสงจากเส้นใยแก้วนำแสงออกข้างนอก และยังใช้ประโยชน์เมื่อมีการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง โครงสร้างอาจจะประกอบไปด้วยชั้นของพลาสติกหลายๆ ชั้น นอกจากนั้นส่วนป้องกันยังทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันการกระทำจากแรงภายนอกอีกด้วย ตัวอย่างของค่าดัชนีหักเหเช่น แกนมีค่าดัชนีหักเหประมาณ 1.48 ส่วนของเคลดและส่วนป้องกันซึ่งทำหน้าที่ป้องกันแสงจากแกนออกภายนอกและป้องกันแสงภายนอกกระทบจะมึค่าดัชนีหักเหเป็น 1.46 และ 1.52 ตามลำดับ



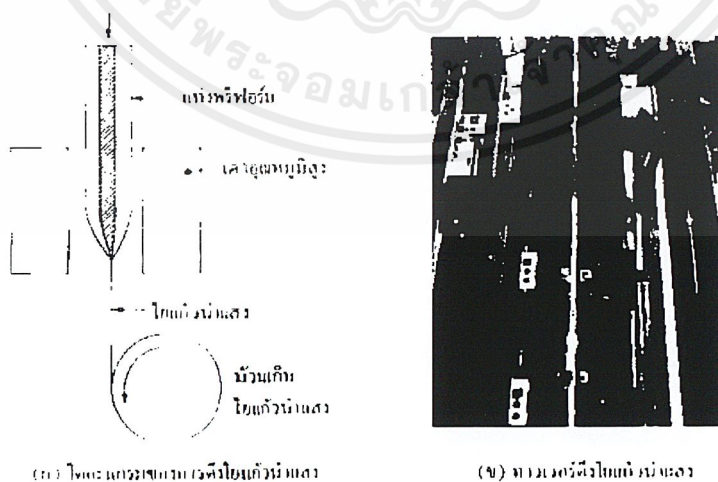
รูปที่ 2-8 แสดงส่วนประกอบของเส้นใยแก้วนำแสง

2.4 การผลิตเส้นใยแก้วนำแสง

วิธีการผลิตเส้นใยแก้วนำแสงสามารถที่จะแบ่งออกได้เป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภทคือ วิธีการโดยตรง หรือ ดี เอ็ม เอ็ม (Direct Melt Method, DMM) และวิธีการระเหยสาร วี พี โอ พี (Vapour Phase Oxidation Process, VPOP) โดยวิธีการทั้งสองแบบนี้มีลักษณะการทำเส้นใยแก้วนำแสงที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง และยังสามารถแบ่งเป็นวิธีย่อย ๆ ที่แตกต่างกันในกระบวนการทางเคมีด้วย ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดดังต่อไปนี้คือ

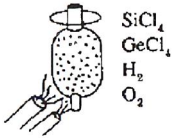
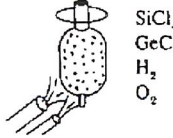

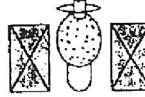
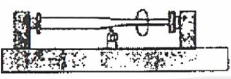
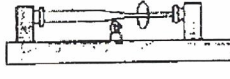
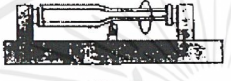

2.4.1 วิธีการ ดี เอ็ม เอ็ม

ในการทำแท่งแก้วพรีฟอร์ม (Preform) จะทำเป็นสองชั้น (Double Crucible) โดยวิธีการอัดซิลิกา (Silica) เข้าไปในท่อ โดยให้ส่วนที่จะทำแกนเป็นส่วนใน (Inner Crucible) ส่วนเคลดไว้ส่วนนอก (Outside Crucible) ในการทำเส้นใยแก้วนำแสงจะทำได้โดยการให้ความร้อนกับแท่งพรีฟอร์มแล้วดึงด้วยเครื่องดึงรูปที่ 2.9 ที่มีขั้นตอนต่างกัันดังรายละเอียด โดยเริ่มจากการนำแท่งพรีฟอร์มมาให้ความร้อนแล้วดึงและใส่ส่วนป้องกันตามลำดับ ซึ่งวิธีนี้จะสะดวกดีแต่เส้นใยแก้วนำแสงที่ทำด้วยวิธีนี้จะไม่บริสุทธิ์



รูปที่ 2-9 แสดงเครื่องดึงเส้นใยแก้วนำแสงและขั้นตอนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	วิธีปกติ (Usual Vad)	วิธีสังเคราะห์ (Synthetic Vad)
1st Deposition	 <p>SiCl₄ GeCl₄ H₂ O₂</p> <p>Deposition Rate : 2 g/min</p>	 <p>SiCl₄ GeCl₄ H₂ O₂</p> <p>Deposition Rate : 2 g/min</p>
Dehydration Consolidation	 <p>Cl₂, He</p>	 <p>Cl₂, He</p>
Elongation	 <p>H₂, O₂</p>	 <p>H₂, O₂</p>
Jacketing	 <p>H₂, O₂ Collapse (Core + Silica Tube)</p>	 <p>SiCl₄ GeCl₄ H₂, O₂</p> <p>2nd Deposition Deposition Rate : 10 g/min</p>
Length of Fiber / Prefonn	30 km	100 km

(ก) วิธีการทำแท่งพรีฟอร์ม

รูปที่ 2.9 (ต่อ)

2.4.2 วิธีการ วี พี โอ พี

การผลิตใยแก้วนำแสงด้วยวิธีนี้เป็นการผลิตที่มีขั้นตอน 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกเป็นการทำแท่งแก้วพรีฟอร์มและอีกขั้นตอนเป็นการดึงแท่งพรีฟอร์มเพื่อทำเป็นใยแก้วนำแสง ในการทำแท่งแก้วพรีฟอร์มนั้นต้องมีการผสมโลหะ (Metal Halide) ซึ่งเป็นเคมีภัณฑ์เหลวที่ต้องควบคุมอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเป็นไอจากการทำปฏิกิริยากับก๊าซพาหะ (Carrier Gas) ไปเกาะเกิดเป็นเนื้อสารที่มีค่าดัชนีหักเหต่างๆ กันซึ่งมีวิธีต่างๆ ดังนี้คือ

1. **Modified Chemical Vapour Deposition (MCVD)** วิธีทำคือใส่โลหะผสมชนิด SiCl₄ เข้าไปในท่อซิลิกาที่หมุนอยู่ตลอดเวลาแล้วให้ความร้อนด้วยหัวเผาที่เคลื่อนที่ตลอดแนวยาวของท่อซิลิกา เมื่อโลหะทำปฏิกิริยากับก๊าซพาหะก็จะเกาะอยู่ที่ผนังของท่อซิลิกาเกิดเป็นส่วนของเคลดและถ้าการเคลื่อนที่ของหัวเผามีอัตราเร็วขึ้นก็จะเป็นส่วนของแกน แล้วจึงนำไปยุบตัวเพื่อทำการดึงต่อไป

2. **Plasma Activated Chemical Vapour Deposition (PCVD)** จะคล้ายกับ MCVD แต่เปลี่ยนการให้ความร้อนด้วยหัวเผา เป็นการใส่ไว้ในเตาอบแทน ซึ่งจะดีกว่า MCVD ตรงที่ท่อซิลิกาจะไม่เสียรูปทรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. **Outside Vapour Phase Oxidation (OVPO)** วิธีนี้ทำให้เกิดการเกาะตัวที่ผนังด้านนอกของแท่งแกรไฟต์ทำให้น้ำสารมีค่าดัชนีหักเหต่างๆ ตามที่เราต้องการแล้วนำไปแยกออกจากแท่งแกรไฟต์จะได้แท่งแก้วใสจึงนำไปทำการชุบตัวต่อไป

4. **Vapour Phase Axial Deposition (VPAD)** เป็นวิธีที่คล้ายกับ OVPO แต่ทำในแกนตั้ง โดยการพ่น $\text{SiCl}_4 + \text{BO}_3$ และ $\text{SiCl}_4 + \text{GeCl}_4$ สำหรับแคลดและแกนตามลำดับให้กับแท่งแก้วซิลิกา พอเริ่มเกิดแท่งแก้วที่ปลายของแท่งซิลิกาก็จะถูกดึงขึ้นไปสู่แท่งคาร์บอนร้อนแล้วได้แท่งฟริฟอร์มออกมาโดยไม่ต้องทำการชุบตัวอีก

2.4.3 การดึง

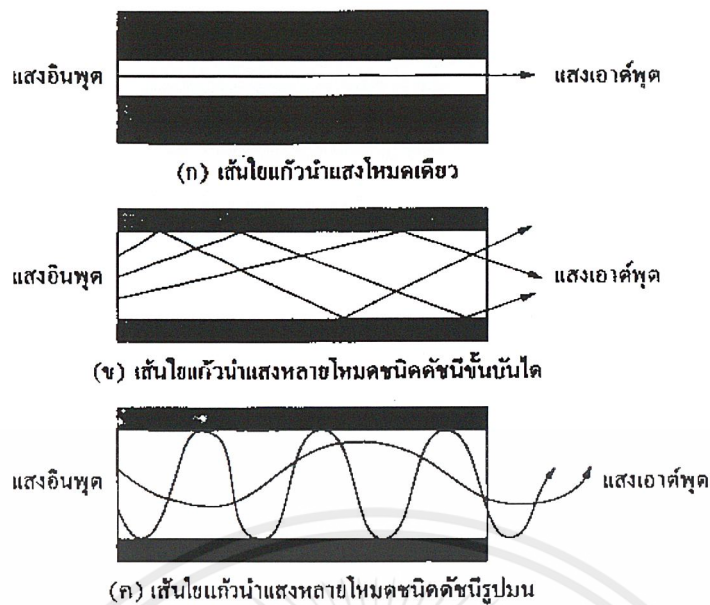
การดึง (Drawing) เป็นการนำแท่งแก้วฟริฟอร์มออกมาเพื่อทำเป็นเส้นใยแก้วนำแสงที่สามารถกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางได้นั้นคือนำแท่งแก้วฟริฟอร์มซึ่งได้มาจากกระบวนการดังที่กล่าวมาแล้ว มาให้ความร้อนที่ปลายพอเริ่มหลวก็จะถูกดึงลงข้างล่างไปสู่บริเวณที่จำกัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแก้วนำแสง แล้วจึงจะถูกหุ้มด้วยส่วนป้องกันเพื่อเสริมความแข็งแรงแล้วจะถูกนำไปทดสอบแรงดึงและคุณสมบัติของเส้นใยแก้วนำแสงอื่นๆ เช่น คุณสมบัติการกระจาย (Dispersion) คุณสมบัติการส่งผ่านและการสูญเสียหรือการลดทอน (Transmission and Loss) หรือ (Attenuation) และทางโครงสร้างต่อไป เป็นต้น

2.5 ชนิดของใยแก้วนำแสง

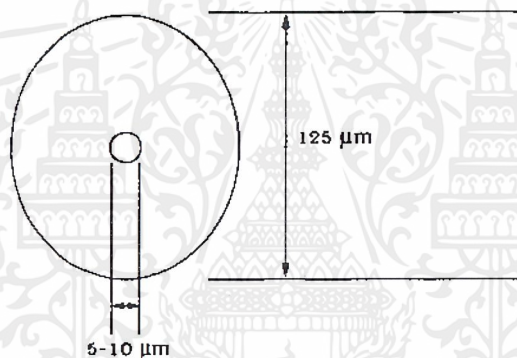
ภายในเส้นใยแก้วนำแสงนั้นจำนวนลำแสงที่เดินทางหรือเกิดขึ้นจะเป็นตัวบอกโหมดของแสงที่เดินทางภายในเส้นใยแก้วนำแสงนั้น กล่าวคือถ้ามีแนวลำแสงอยู่แนวเดียวเรียกว่าเส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียว (Single Mode Fiber) แต่ถ้าภายในเส้นใยแก้วนำแสงนั้นมีแนวลำแสงอยู่เป็นจำนวนมาก เรียกว่าเส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมด (Multimode Fiber) จากรูปที่ 2.10 นอกจากการแบ่งชนิดใยแก้วนำแสงตามลักษณะของโหมดแล้วยังมีวิธีอื่นที่แบ่งโดยดูจากวัสดุที่ทำเช่น เส้นใยที่ทำจากแก้ว พลาสติก หรือโพลิเมอร์ และก็ยังสามารถแบ่งได้ตามลักษณะของรูปร่าง ลักษณะของดัชนีการหักเห เช่น ใยแก้วชนิดดัชนีชั้นบันได (Step Index) หรือดัชนีรูปมน (Graded Index) เป็นต้น

2.5.1 เส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียว

เส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนและแคลดประมาณ 5-10 และ 125 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งส่วนของแกนมีขนาดเล็กกว่าเส้นใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดมาก และให้แสงออกมาเพียงโหมดเดียว ลักษณะหน้าตัดของเส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียวแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2-10 แสดงลักษณะของแสงที่เดินทางภายในของเส้นใยแก้วนำแสง

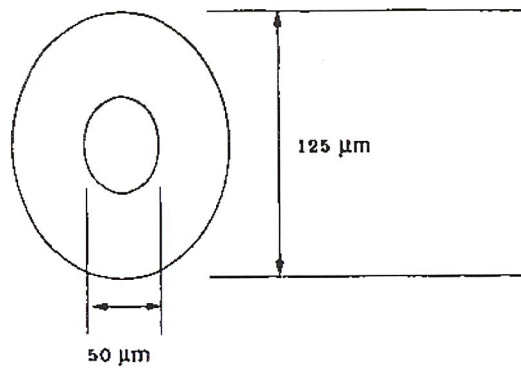


รูปที่ 2-11 แสดงภาคตัดขวางของเส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียว

พิจารณาจากรูปจะเห็นว่าขนาดของแกนที่ใช้ส่งสัญญาณนั้นเล็กมากซึ่งทำให้การนำแสงเข้าสู่เส้นใยแก้วยากกว่าใยแก้วนำแสงหลายโหมดแสง เนื่องจากข้อดีของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวคือ การแตกกระจายของสัญญาณเกิดขึ้นน้อยกว่าใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดทำให้มีแบนด์วิดท์ที่ใช้ประโยชน์ได้กว้างกว่า

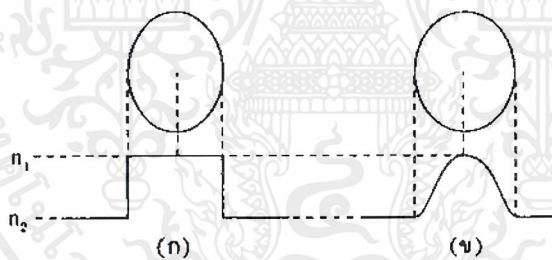
2.5.2 เส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมด

โครงสร้างภายในของเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งประกอบด้วยแกนและแคลดดิ้งได้กล่าวมาแล้วข้างต้น สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมดส่วนใหญ่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนและแคลดดิ้งโดยประมาณ 50 และ 125 ไมครอน ตามลำดับซึ่งมีลักษณะหน้าตัดดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2-12 แสดงภาคตัดขวางของเส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมด

เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนของเส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมดนั้นมีขนาดใหญ่ ดังนั้นแสงที่ตกกระทบบที่ปลายอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสงจะมีมุมตกกระทบบที่แตกต่างกันหลายค่า จากหลักการสะท้อนกลับหมดของแสงที่เกิดขึ้นภายในส่วนของแกนทำให้มีแนวลำแสงเกิดขึ้นหลายโหมด และแสงแต่ละโหมดเดินทางโดยใช้ระยะเวลาที่แตกต่างกันอันเป็นสาเหตุให้เกิดการแตกกระจายของโหมดแสง (Mode Dispersion) หรือของสัญญาณที่รับได้เนื่องจากความแตกต่างของเวลา จึงได้มีการพัฒนาที่จะลดการแตกกระจายของสัญญาณซึ่งเกิดขึ้นจากเส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมดด้วยการปรับปรุงลักษณะดัชนีหักเหของแกน (ดูรูปที่ 2.13)



(ก) ลักษณะดัชนีหักเหแสงของแกนเมื่อมีลักษณะเป็นขั้นบันได

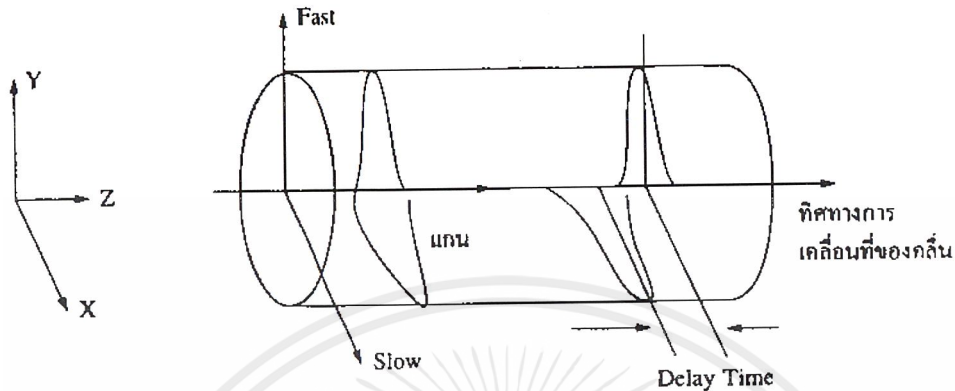
(ข) การกระจายของสัญญาณเมื่อดัชนีหักเหภายในแกนมีค่าค่อย ๆ เปลี่ยนแปลง

รูปที่ 2-13 แสดงชนิดของเส้นใยแก้วนำแสงตามลักษณะของดัชนีหักเหของแกน

2.5.3 ใยแก้วนำแสงชนิดอนุรักษ์สภาวะทางโพลาไรเซชัน

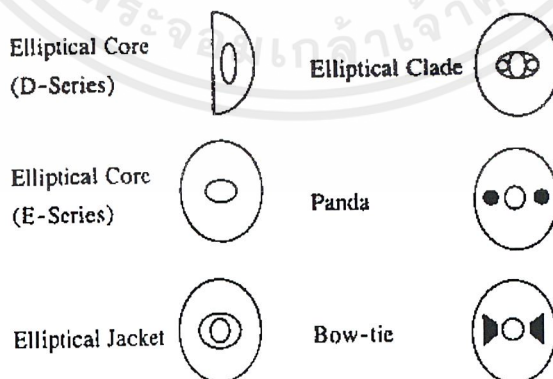
สำหรับใยแก้วนำแสงโหมดเดียวแบบธรรมดาในทางทฤษฎีถือว่า องค์ประกอบของความเร็วแสงที่เดินทางในเส้นใยแก้วนำแสงจะเท่ากัน แต่ในทางปฏิบัติเส้นใยแก้วนำแสงจะไม่สมมาตรสมบูรณ์ ซึ่งการมีรูปร่างและดัชนีหักเหที่ไม่สมมาตรจะทำให้โหมดทั้งสองของแสงมีความเร็วที่แตกต่างกันเล็กน้อย องค์ประกอบของความเร็วจะประกอบด้วยองค์ประกอบตามแกนที่เร็วกว่า (Fast Axis) และอีกแกนหนึ่งที่ตั้งฉากกันที่มีความเร็วน้อยกว่า (Slow Axis) จากความแตกต่างของความเร็วนี้ทำให้เกิดการหักเหสองแนว ปรัชญาการณีนี้อาจเกิดจากรายละเอียดที่กล่าว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาแล้วข้างต้นที่เกิดจากคุณสมบัติภายในของเส้นใยแก้วนำแสงเอง หรือในกระบวนการผลิตที่มีโครงสร้างของส่วนแกนภายในซึ่งอาจทำให้เกิดความเค้นบริเวณรอบๆ แกน (Geometrical Effect, GE) หรือเกิดการรบกวน เนื่องจากผลของการให้ความเค้นภายนอก (Stress Effect, SE) จากรูปที่ 2.14 และ 2.15 ประกอบ



รูปที่ 2-14 แสดงโหมดของแสงโพลาริซชันสองโหมดที่ตั้งฉากกันและมีความเร็วต่างกัน

เส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียวที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ มีความสามารถในการอนุรักษ์สถานะทางโพลาริซชัน (Polarization Maintaining, PM) ซึ่งจะแบ่งเป็นชนิดไฮลิไบร์พริเนนซ์ (Highly Birefringence, HB) และชนิดโลว์ไบร์พริเนนซ์ (Low Birefringence, LB) โดยพิจารณาจากผลต่างของค่าดัชนีหักเหแสงหรือ ไบร์พริเนนซ์ กล่าวคือถ้าค่าไบร์พริเนนซ์ $B > 10^{-5}$ จัดเป็นไฮลิไบร์พริเนนซ์ แต่ถ้าไบร์พริเนนซ์ $B < 10^{-5}$ จัดเป็นชนิดโลว์ไบร์พริเนนซ์ เส้นใยแก้วนำแสงไฮลิไบร์พริเนนซ์ยังแยกพิจารณาเป็นแบบโพลาริซชันโหมดเดียว (Single Polarization Mode, SP) และสองโหมด (Two Polarization Modes, TP) เป็นต้น

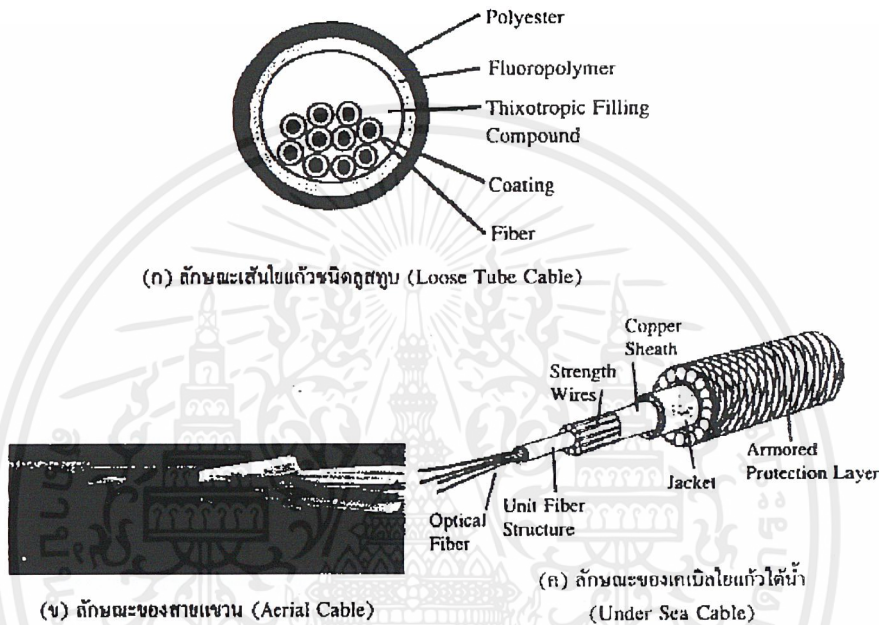


รูปที่ 2-15 แสดงตัวอย่างของเส้นใยแก้วนำแสงไฮลิไบร์พริเนนซ์บางชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 สายเคเบิลใยแก้วนำแสง

ใยแก้วนำแสงนั้นมีกระบวนการผลิตหลายวิธีดังที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งจะแตกต่างกันที่วิธีการทำแท่งพรีฟอร์มหลังจากได้แท่งพรีฟอร์มแล้วก็จะนำมาดึงทำเป็นใยแก้วนำแสงขนาดและประเภทต่างๆ พร้อมทั้งทำการป้องกันเพื่อทำเป็นเคเบิลตามลักษณะของการใช้งานต่าง ๆ เช่น สายเคเบิลกับงานเดินสายใต้ดิน สายอากาศ สายใต้น้ำ สายในอาคารและงานระหว่างอาคาร เป็นต้น รูปที่ 2.16 จะเป็นตัวอย่างเคเบิลใยแก้วนำแสง ซึ่งเป็นลักษณะต่างๆ ไปเท่านั้น สำหรับในการใช้งานในปัจจุบันนี้มีเคเบิลมากมายหลายชนิดแล้วแต่ความต้องการใช้งานเป็นสำคัญ



รูปที่ 2-16 แสดงตัวอย่างของเคเบิลใยแก้ว

2.7 การสื่อสารด้วยแสง

จากความเจริญก้าวหน้าทางเศรษฐกิจและสังคม ทำให้มีความต้องการในการแลกเปลี่ยนข่าวสารและข้อมูลเพิ่มขึ้น เพื่อเป็นการตอบสนองต่อความต้องการได้ทั้งปัจจุบันและอนาคต ระบบสื่อสารด้วยแสง (Optical Communication System) ซึ่งสามารถส่งข่าวสารและข้อมูลต่างๆ ได้เป็นจำนวนมากในเวลาเดียวกันจึงได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย

ระบบการสื่อสารด้วยใยแก้วนำแสงเมื่อเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารที่ใช้สายเคเบิลที่ทำด้วยโลหะแล้วมีข้อดีต่างๆ ที่เกิดจากคุณสมบัติของใยแก้วนำแสงดังนี้คือ

1. ให้แบนด์วิดท์ที่กว้าง กล่าวคือ การใช้คลื่นพาหะที่มีความถี่สูงในระบบสื่อสารทำให้แบนด์วิดท์ของสัญญาณกว้างมากขึ้น การสื่อสารด้วยใยแก้วนำแสงนั้นขึ้นกับคลื่นพาหะที่มีความถี่อยู่ในช่วง $10^{13} - 10^{14}$ เฮิร์ตซ์ เมื่อเปรียบเทียบกับความถี่ของคลื่นวิทยุซึ่งมีความถี่ $10^6 - 10^9$ เฮิร์ตซ์ แล้วจะเห็นว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณกว้างขึ้นถึงประมาณ 10^6 หรือ 1 ล้านเท่า

2. ขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียวสามารถแทนคู่สายทองแดงขนาดใหญ่แต่ละคู่ได้ เช่น สายเคเบิลทางโทรศัพท์ที่มี 1,000 คู่สาย มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7 – 10 เซนติเมตร จะสามารถใช้เคเบิลใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร แทนได้ในการส่งช่องสัญญาณจำนวนที่เท่ากัน

3. การสูญเสียต่ำ ใยแก้วนำแสงมีค่าการสูญเสียเนื่องจากการลดทอนน้อยกว่าสายเกลียวคู่ (Twisted Pair) หรือ หุ้มฉนวน (Coaxial Cable)

4. ไม่ถูกรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากใยแก้วนำแสงไม่ได้สร้างจากเส้นลวดโลหะเหมือนสายเคเบิลโลหะแต่สร้างจากแก้ว (Glass) หรือซิลิคอน (Silicon) ดังนั้นจึงไม่ถูกรบกวนโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และไม่ต้องใช้เทคนิคป้องกันด้วยวิธีการชิลด์ (Shield) ที่มีราคาแพงและยุ่งยากเพื่อป้องกันการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

5. คงทนและไม่ถูกรบกวนโดยสภาพดินฟ้าอากาศ แก้วหรือซิลิคอนมีความแข็งแรงกว่าโลหะถึง 20 เท่า โดยที่ซิลิคอนหรือแก้วก็เป็นธาตุเฉื่อย ดังนั้นสภาพแวดล้อมจึงมีผลน้อยกว่าการใช้งานสายที่ทำด้วยโลหะ

6. มีความปลอดภัย ในระบบสายโลหะจำเป็นต้องป้องกันอันตรายให้กับอุปกรณ์หรือมนุษย์จากไฟฟ้าลัดวงจรระหว่างสาย หรือระหว่างสายกับสายดิน ซึ่งเมื่อใช้เส้นใยแก้วนำแสงแล้วจะไม่มีปัญหาเกี่ยวกับสิ่งเหล่านี้

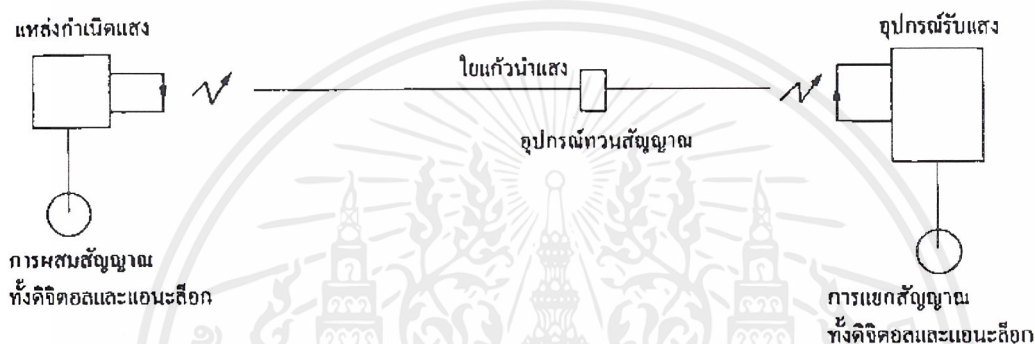
7. ราคาถูก ราคาของเส้นใยแก้วนำแสงในปัจจุบันมีราคาต่ำลงเรื่อย ๆ ในขณะที่ราคาของสายโลหะมีราคาเพิ่มขึ้น ในทางปฏิบัติทุกวันนี้ราคาของการออกแบบระบบที่ใช้ใยแก้วนำแสงมีราคาต่ำกว่าระบบแบบใช้โลหะ

2.7.1 การสื่อสารเชิงแสง

แนวความคิดในการสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสงเกิดขึ้นเมื่อนักวิทยาศาสตร์พยายามที่จะค้นคว้าเกี่ยวกับการส่งผ่านแสงในชั้นบรรยากาศมาก่อนแต่ไม่ค่อยประสบความสำเร็จมากนัก เนื่องจากแสงจะถูกดูดกลืนหรือลดทอนในชั้นบรรยากาศอย่างมาก การส่งแสงผ่านชั้นบรรยากาศจึงถูกจำกัดเฉพาะการสื่อสารในระยะทางสั้น ๆ ต่อมาจึงหันความสนใจมาวิจัยการสื่อสารโดยการใช้ใยแก้วนำแสง แต่ในระยะแรกเกิดปัญหาเนื่องจากการสูญเสียมากถึงประมาณ 1,000 เดซิเบล/กิโลเมตร ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้กับการสื่อสารได้ ต่อมานักวิทยาศาสตร์ได้ทำการวิจัยและพัฒนาจนอัตราการสูญเสียของใยแก้วนำแสงเหลือเพียง 0.2 เดซิเบล/กิโลเมตร ตัวอย่างเช่น แสงที่เดินทางในเส้นใยแก้วนำแสงที่ยาว 15 กิโลเมตร ปริมาณของแสงก็จะลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง ดังนั้นจึงสามารถนำแสงไปได้ไกลมาก จากการนำแสงเลเซอร์และใยแก้วนำแสงมาใช้ร่วมกันจึงทำให้เกิดการส่งข่าวสารยุคใหม่ขึ้นเรียกว่า “การสื่อสารใยแก้วนำแสง”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบการสื่อสารด้วยใยแก้วนำแสง แสดงได้ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งจะประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสง (Electrical Optical Converter, E/O) ที่ทำงานโดยรับสัญญาณไฟฟ้ามาจากอุปกรณ์แหล่งกำเนิดแสง หรือ เลเซอร์ และส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงโดยความแรงของสัญญาณไฟฟ้าที่ได้รับได้จากอุปกรณ์รับสัญญาณปลายทางจะถูกเปลี่ยนเป็นความเข้มแสง หรือ ระดับสัญญาณ “ 1 ” และ “ 0 ” ด้วยวิธีหลังนี้สัญญาณไฟฟ้าจะเปลี่ยนเป็นแสงที่สว่างและมีค หรือเปิด-ปิดสัญญาณที่เดินทางในใยแก้วนำแสงนั้นกำลังจะอ่อนลงเมื่อเดินทางในระยะทางที่เพิ่มขึ้นพร้อมทั้งรูปคลื่นที่ขยายกว้างออกด้วย ดังนั้น เมื่อถึงอุปกรณ์เปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้า (O/E) ทางด้านรับสัญญาณแล้วก่อนที่จะแสงจะส่งไปก็จะถูกทวนสัญญาณและส่งต่อไปยังปลายทาง



รูปที่ 2-17 ผังแสดงระบบการสื่อสารใยแก้วนำแสง

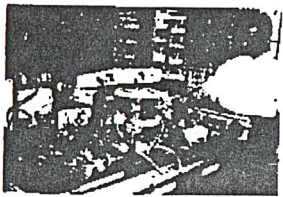
2.7.2 ระบบสื่อสารใยแก้วนำแสง

ระบบอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นแสงนั้นทำได้โดยใช้อุปกรณ์ทางแสงได้แก่ แหล่งกำเนิดแสง (Light Source) ซึ่งปกติใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิด ไดโอดเปล่งแสง (LED) หรือไดโอดเลเซอร์ (LD) ส่วนอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้านั้นทำได้โดยใช้ไดโอดแสง (Photodiode) หรือทรานซิสเตอร์แสง (Photo Transistor) นอกจากกรณีที่ระยะทางของสายส่งยาวมากอาจต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Repeater) ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วเปลี่ยนกลับเป็นสัญญาณแสงอีกครั้งและส่งกลับไปในเส้นใยแก้วนำแสง

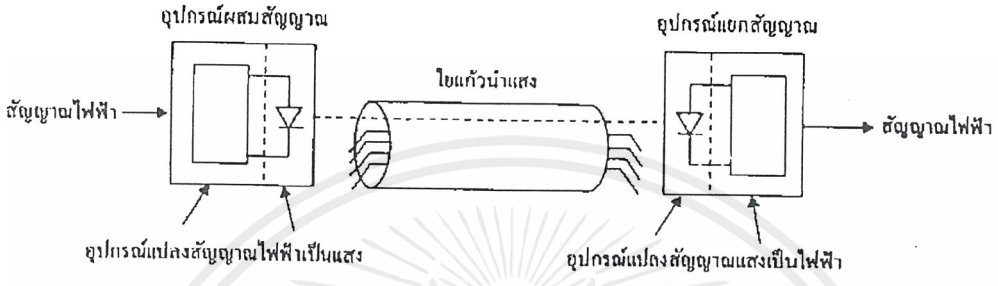
การผสมและแยกสัญญาณ

การผสมสัญญาณ (Modulation) ของการสื่อสารนั้น หมายถึงการทำให้ความถี่ของการสั่นในการส่งเปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณข่าวสาร สำหรับการสื่อสารใยแก้วนำแสงนั้นความถี่ (หรือความยาวคลื่น) ของแสงที่ปล่อยออกมาจากอุปกรณ์กำเนิดแสงมีค่าไม่คงที่ ดังนั้นความหมายของการผสมสัญญาณจึงแตกต่างกับการสื่อสารทางไฟฟ้า ถ้าหากสามารถทำให้แสงเป็นแสงอาพันธ์ (Coherence Light) ที่สมบูรณ์นั้นคือมีความถี่คงที่ และสามารถเปลี่ยนความถี่แสงให้อยู่ในย่านความถี่ไมโครเวฟได้ก็จะทำให้การสื่อสารใยแก้วนำแสงมีการผสมคลื่นชนิดต่าง ๆ เหมือนกับการ

สื่อสารทางไฟฟ้า ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการผสมคลื่นแสงนั้นเป็นเพียงการผสมความเข้มแสง (Intensity Modulation) เท่านั้น (ดูรูปที่ 2.18 ประกอบ)



(ก) ระบบการผสมสัญญาณ



(ข) ผังแสดงการผสมสัญญาณ

รูปที่ 2-18 แสดงการผสมสัญญาณและการส่ง

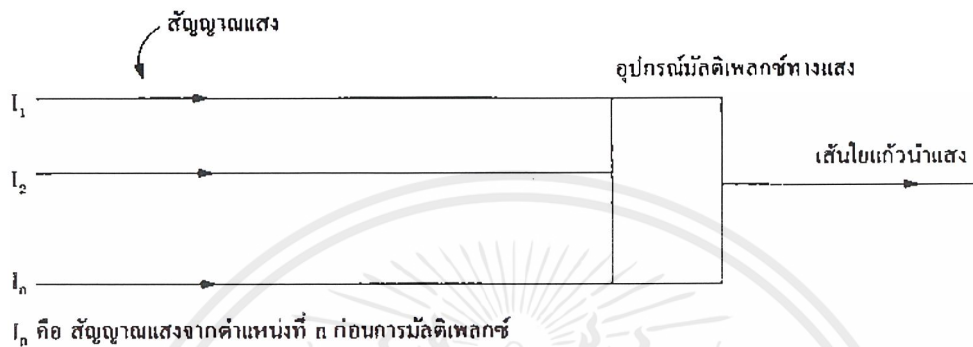
ปกติสัญญาณแสงทางด้านรับของระบบสื่อสารนั้นสัญญาณจะอ่อนกำลังลง และบางครั้งอาจเกิดความผิดพลาดเนื่องจากการส่งผ่านไปใยแก้วนำแสง เมื่ออุปกรณ์รับแสงทำการแปลงสัญญาณแสงให้ได้สัญญาณไฟฟ้าที่ออกมาเป็นรูปร่างของสัญญาณเดิมที่เป็นสัญญาณพื้นฐาน (Baseband) และเป็นไปตามรูปร่างของกรอปกคลื่น (Envelope) ของสัญญาณที่เกิดจากการรวมกับคลื่นพาห้ทางแสง สัญญาณนี้จะผ่านชั้นคอนทากไฟฟ้าเพื่อทำการขยายสัญญาณ และได้สัญญาณที่เครื่องรับปลายทางเหมือนกับต้นกำเนิดข่าวสารทุกประการ ในอนาคตถ้าสามารถทำให้แสงที่เป็นแสงอาพันธ์อย่างสมบูรณ์ก็จะสามารถใช้วิธีการผสมคลื่นที่ทำให้ความถี่ของต้นกำเนิดแสงเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณนั้น คือใช้วิธีผสมคลื่นที่มีประสิทธิภาพดีได้และทำนองเดียวกันกับทางด้านรับแสงก็สามารถใช้การแยกสัญญาณที่เรียกว่าเทคนิคทางด้านความถี่ (Heterodyne Detection) เป็นส่วนการรับสัญญาณปลายทาง

การส่งสัญญาณแบบดิจิตอลและแอนะล็อก

การส่งสัญญาณ โดยทั่วไปนั้นมีสองแบบ คือ การส่งสัญญาณแบบดิจิตอล (Digital) และแอนะล็อก (Analog) การสื่อสารด้วยแสงนั้นมีการส่งสัญญาณอยู่สองชนิดนี้เช่นกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับสัญญาณไฟฟ้าที่มาผสมกับแสงว่าจะจะเป็นสัญญาณดิจิตอลหรือสัญญาณแอนะล็อกเท่านั้น การส่งสัญญาณแบบดิจิตอลโดยทั่วไปแล้วจะนำมาเปลี่ยนแปลงเป็นรหัส (Code) ที่เหมาะแก่การส่งก่อนแล้วจึงส่งออกไปเช่นเดียวกับการส่งสัญญาณแบบแอนะล็อก นั่นคือก่อนที่จะทำการเปลี่ยนแปลงสัญญาณแอนะล็อกให้เป็นสัญญาณแสงนั้น จะทำการผสมสัญญาณขั้นแรกกับแหล่งกำเนิดแสงก่อน ทั้งนี้ก็

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะว่าแสงเอาต์พุตของอุปกรณ์กำเนิดแสงนั้นไม่เป็นสัดส่วนกับระดับสัญญาณไฟฟ้าอินพุตเสมอไป ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากในการรักษาคุณสมบัติของการส่งเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงต้องทำการผสมสัญญาณเบื้องต้นก่อน การเลือกระบบการส่งสัญญาณทั้ง 2 ชนิดนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน การเลือกระบบการส่งแบบแอนะล็อกมักใช้กับการส่งสัญญาณภาพในข่ายสาย (Networks) หรือเคเบิลทีวี แต่ในอนาคตระบบการส่งแบบดิจิทัลที่มีคุณสมบัติดีกว่าจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในทุก ๆ ด้าน



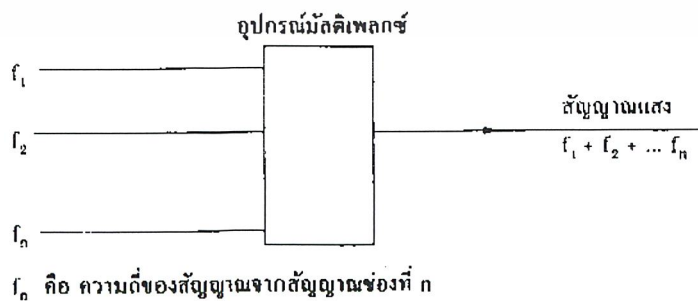
รูปที่ 2-19 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งระยะทาง

การทำมัลติเพล็กซ์

การสื่อสารนั้นถ้าสามารถส่งข่าวสารได้มากเท่าใดก็จะเป็นการประหยัด ระบบสื่อสารใยแก้วนำแสงก็เช่นเดียวกันต้องมีการทำมัลติเพล็กซ์ (Multiplex) เหมือนกับระบบการสื่อสารใช้สายที่เป็นโลหะเช่นกัน การมัลติเพล็กซ์ทางแสงสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ

1. การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งระยะทาง (Space Division Multiplexing) หมายถึง ในสายเคเบิลหนึ่งเส้นจะมีเส้นใยแก้วนำแสงเป็นจำนวนมากซึ่งเป็นวิธีที่ทำให้ส่งสัญญาณได้จำนวนมากต่อสายเคเบิลหนึ่งเส้น (ดูรูปที่ 2.19)

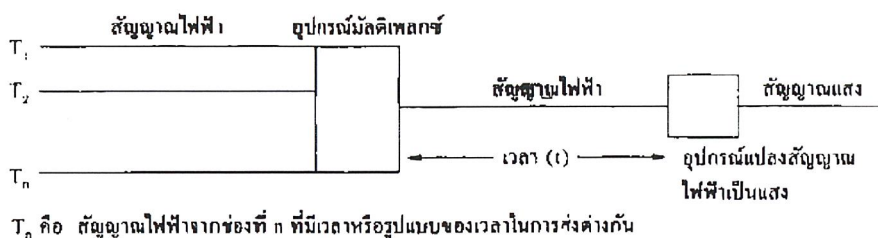
2. การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiplexing) เป็นระบบที่ใช้กับการสื่อสารใยแก้วนำแสงที่มีการส่งสัญญาณจำนวนมาก โดยก่อนส่งไปนั้นจะถูกทำการมัลติเพล็กซ์ในขั้นตอนของการแปลงเป็นสัญญาณแสงเป็นไฟฟ้าก่อนการส่งสัญญาณ (ดูรูปที่ 2.20)



รูปที่ 2-20 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่

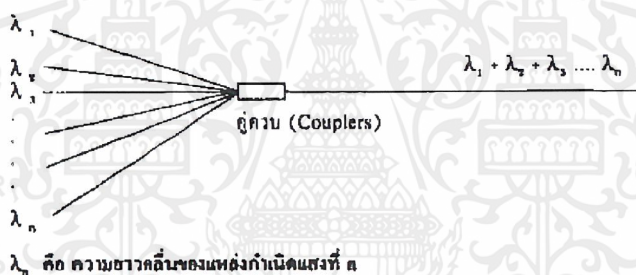
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา (Time Division Multiplexing) มีหลักการเช่นเดียวกับ การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้สำหรับการส่งสัญญาณแบบดิจิทัล (ดูรูปที่ 2.21)



รูปที่ 2-21 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา

4. การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing) เป็นวิธีการส่งสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันจำนวนมากในใยแก้วนำแสงหนึ่งเส้น ข้อดีคือ สัญญาณไฟฟ้าที่ส่งไปกับความยาวคลื่นแต่ละความยาวคลื่นไม่ว่าจะเป็นแบบแอนะล็อกหรือดิจิทัลสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยง่าย (ดูรูปที่ 2.22)



รูปที่ 2-22 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น

2.7.3 อุปกรณ์แหล่งกำเนิดแสง

แหล่งกำเนิดแสงที่นิยมใช้ปัจจุบันคือไดโอดเปล่งแสงชนิดสารกึ่งตัวนำและไดโอดเลเซอร์ เพราะไดโอดเหล่านี้เปล่งแสงที่มีความยาวคลื่นย่าน 0.8-0.9 และ 1.3-1.6 ไมครอน ซึ่งตรงกับย่านที่ใยแก้วนำแสงมีค่าสูญเสียต่ำและสามารถควบคุมกำลังขาออกได้อย่างรวดเร็วโดยการปรับค่ากระแสไบแอส (Bias Current) จึงง่ายต่อการผสมสัญญาณ อีกทั้งอายุการใช้งานมากกว่าหนึ่งล้านชั่วโมง ความแตกต่างที่สำคัญระหว่าง LED และ LD คือ LD มีมุมการเปล่งแสงที่แคบกว่าแต่มีความกว้างของสเปกตรัมมากกว่า (Spectrum Width) จึงนิยมใช้กับการส่งสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ (Coherent Transmission) นอกจากนี้ยังเปล่งแสงเมื่อมีการต่อกระแสขับเคลื่อน (Drive Current) ได้เร็วกว่า แต่เนื่องจาก LD เป็นอุปกรณ์เทอร์ชโฮลด์ (Threshold Device) การเปล่งแสงจึงไม่คงที่และเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแส จึงต้องมีวงจรควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback) เพื่อให้กำลังขาออกของเลเซอร์คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

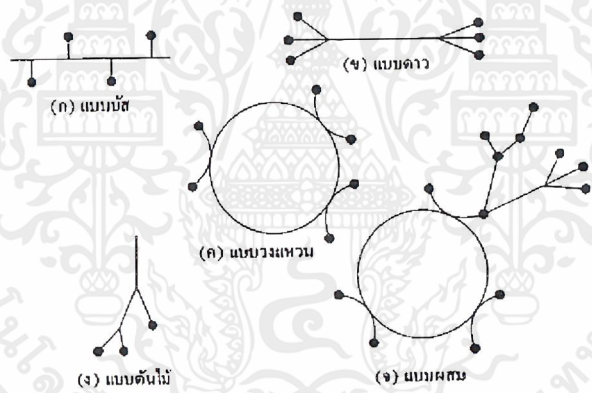
2.7.4 อุปกรณ์รับแสง

อุปกรณ์รับแสงที่นิยมใช้เป็นประเภทสารกึ่งตัวนำซึ่งแบ่งออกเป็นพวกใหญ่ ๆ ได้ 2 ประเภทตามประมาณแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้จากภายนอก คือ

1. โฟโตไดโอด (Photodiode, PD) เป็นพวกที่ได้รับการป้อนแรงดันไฟฟ้าปริมาณน้อย ตัวอย่างเช่น PIN-PD เป็นต้น

2. อวาลานซ์โฟโตไดโอด (Avalanche Photodiode, APD) เป็นพวกที่ได้ รับการป้อนแรงดันไฟฟ้าปริมาณมาก การเลือกใช้อุปกรณ์รับแสงแบบ PIN หรือ APD นั้น ตามปกติจะขึ้นอยู่กับราคาและความไวของเครื่องรับที่ต้องการ (Receiver Sensitivity) กระบวนการอวาลานซ์ใน APD มีเทรชต์โฮลด์ซึ่งทำให้มีราคาแพงกว่า PIN เนื่องจาก APD มีการขยายกำลังได้สูงจึงจะทำให้ความไวของเครื่องรับได้ถึงประมาณ -15 dB ซึ่งมากกว่าของ PIN ไดโอด นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงระดับสัญญาณรับต่ำสุดที่จะรับได้ด้วย

2.8 สรุป



รูปที่ 2-23 ระบบสื่อสารเครือข่ายต่าง ๆ

จากการเรียนรู้ส่วนประกอบต่างๆ ของระบบสื่อสารเชิงแสงแล้ว ถ้านำมาประกอบกันเป็นระบบก็สามารถทำให้เป็นระบบสื่อสารที่ใช้ติดต่อสื่อสารกันได้ การติดต่อสื่อสารทั่วไปนั้นมีการเชื่อมโยงกันได้ด้วยวิธีต่าง ๆ กันไม่ว่าจะเป็นแบบจุดต่อจุด (Point-to-Point) แบบหลายจุด (Multipoint) หรือ แบบเครือข่าย (Networks) โดยผ่านตัวกลางสื่อสารด้วยวิธีการต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นแบบซิมเพลกซ์ (Simplex) ครึ่งดูเพลกซ์ (Half Duplex) หรือ ดูเพลกซ์เต็ม (Full Duplex) เป็นต้น รูปที่ 2.23 การใช้งานของระบบสื่อสารนั้นจำเป็นต้องใช้ข้อตกลงต่าง ๆ ร่วมกัน ทางด้านระบบการส่งข้อมูลให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน หรือเรียกว่า โพรโตคอล (Protocol) จึงจะทำให้สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ทั่วโลก เช่น การใช้ระบบ ISDN (Intergrated Service Digital Networks) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

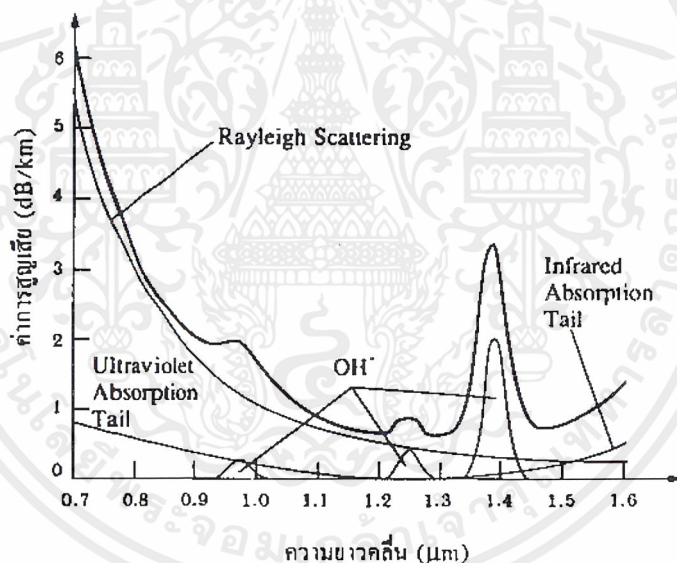
คุณสมบัติใยแก้วนำแสง

3.1 การลดทอน

กำลังของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง (P_i) ถูกส่งเข้าไปในใยแก้วนำแสงยาว L กิโลเมตร แล้วกำลังของแสงที่ออกจากเส้นใยแก้วนำแสง (P_o) เมื่อพิจารณาที่ $P_o < P_i$ โดยทั่วไปแล้วการสูญเสียกำลังของแสงในใยแก้วนำแสงจะถูกกำหนดเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอน (Attenuation Coefficient, α) ซึ่งมีหน่วยเป็นเดซิเบลต่อกิโลเมตร ซึ่งแทนด้วยความสัมพันธ์คือ

$$\alpha L = -10 \log \frac{P_o}{P_i} \quad 3.1$$

เมื่อการลดทอนกำลังของแสงในใยแก้วนำแสงนั้นมีผลมาจากการดูดกลืนแสงของในส่วนของแกนหรือเคลด การสะท้อนของรังสีของแสง และการโค้งงอของใยแก้วนำแสง



รูปที่ 3-1 แสดงการลดทอนของแสงในใยแก้วนำแสงสัมพันธ์กับความยาวคลื่น

3.1.1 การดูดกลืนของวัสดุ

พิจารณาการดูดกลืนในแก้วซิลิกาที่บริสุทธิ์ จากรูปที่ 3.1 จะเห็นว่าแก้วซิลิกาที่บริสุทธิ์จะดูดกลืนแสงน้อย และจะเห็นว่าอยู่ในช่วงของความยาวคลื่นระหว่าง 0.8 ถึง 1.6 ไมครอน จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวถูกเลือกเพื่อใช้งานทางด้านสื่อสาร การดูดกลืนแบบนี้จะมีค่ามากบริเวณความยาวคลื่นในช่วงของอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet, UV) และอินฟราเรด (Infrared, IR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การดูดกลืนจากภายนอก

การลดทอนของแสงที่เกิดจากการดูดกลืนแสงนี้เกิดจากการที่สารที่ใช้ผลิตเส้นใยแก้วนำแสงหรือแก้วนั้นมีสารเจือปนอยู่ที่ทำให้เกิดการดูดกลืนของแสงขึ้น โดยทั่วไปแล้วจะมีการดูดแสงอันเนื่องมาจากแก้วและสารเจือปน ตัวอย่างเช่น กรณีที่มีสารเจือปนอยู่ 1 ในล้านส่วนก็จะทำให้เกิดการดูดกลืนแสงที่มีค่าดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3-1 การสูญเสียจากการดูดกลืนของสารที่สารและความยาวคลื่นต่างๆ

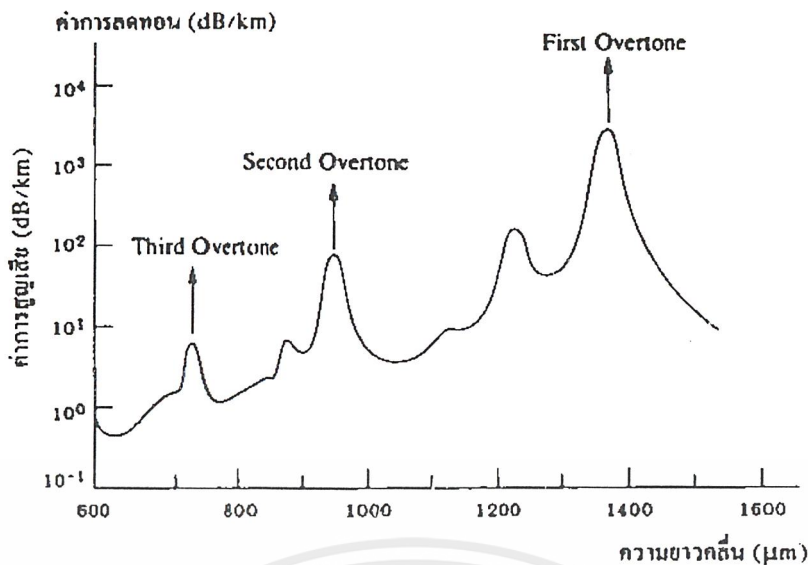
สารเจือปน	ความยาวคลื่น (nm)	ค่าการสูญเสีย (dB/km)
Cr ³⁺	625	1.6
C ²⁺	685	0.1
Cu ²⁺	850	1.1
Fe ²⁺	1100	0.68
Fe ³⁺	400	0.15
Ni ²⁺	650	0.1
Mn ³⁺	460	0.2

เทคนิคการผลิตใยแก้วนำแสงสมัยใหม่นั้นสามารถลดอิมพurityของสารเจือปนพวกนี้ได้จนถึงระดับที่ไม่มีผลต่อการดูดกลืนได้ อย่างไรก็ตามอิมพurityตัวหนึ่งที่ไม่สามารถขจัดได้ก็คือไฮดรอกซิล (Hydroxyl, OH) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 จุดยอดของการสั่นพื้นฐานของอิมพurityไฮดรอกซิลจะเกิดที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ 2.27 ไมครอน และพื้นฐานการสั่นที่ 4.2 ไมครอน ซึ่งการสั่นพื้นฐานนี้ทำให้เกิดการโอเวอร์โทน (Overtone) ที่ฮาร์โมนิกต่างๆ ดังนี้ 1.38 , 0.95 และ 0.72 ไมครอน และเมื่อรวมระหว่างการสั่นพื้นฐานและโอเวอร์โทนจะได้จุดยอดที่ 1.24 , 1.13 และ 0.88 ไมครอน ตามลำดับ

3.1.3 การสะท้อนเรย์ลี

การดูดกลืนของใยแก้วนำแสงที่ความยาวคลื่นสั้นซึ่งขึ้นอยู่กับ การสะท้อนของแสงที่เกิดจากใยแก้วนำแสงมีค่าดัชนีหักเหที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนชนิดเรย์ลี (Rayleigh, α_R) จะเท่ากับ $1/\lambda^4$ ของค่าสูญเสียของกำลังแสงที่เกิดจากการสะท้อนเรย์ลีนั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-2 แสดงการดูดกลืนจากไฮดรอกซิล

3.1.4 การสูญเสียจากการโค้งงอ

การสูญเสียแบบโค้งงอ (Bending Loss) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ การโค้งงอชนิดมหภาค หรือแมโครเบนด (Macrobend) ที่มีรัศมีของส่วนโค้งมากกว่า 10 มิลลิเมตร และการโค้งงอชนิดจุลภาค หรือ ไมโครเบนด (Microbend) ที่มีรัศมีของส่วนโค้งน้อยกว่า 10 มิลลิเมตร การโค้งงอชนิดแมโครเบนดจะเกิดขึ้นเมื่อเส้นใยแก้วม้วนอยู่รอบหลอดม้วน เนื่องมาจากการถูกโค้งงอตามมุมต่าง ๆ การเกิดการสูญเสียเนื่องจากการโค้งงอแบบนี้รังสีของแสงที่เคลื่อนที่ในเส้นใยแก้วตรงบริเวณที่โค้งงอ ซึ่งทำให้แสงตกกระทบตรงรอยต่อระหว่างแกนและเคลดที่มีค่าน้อยกว่ามุมวิกฤต จึงทำให้อิทธิพลของแสงกระจายออกไปนอกเส้นใยแก้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.3

พิจารณาการสูญเสียจากไมโครเบนด คือ

$$L_f = N \langle h^2 \rangle \frac{a^4}{D^6 \lambda^3} \left(\frac{E_b}{E_r} \right)^{3/2} \quad 3.2$$

N คือ จำนวนโค้งของการโค้งงอต่อความยาว

h คือ ส่วนสูงเฉลี่ยของเคเบิลที่โค้งงอ

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของเคเบิลใยแก้วนำแสง

a คือ รัศมีของแกนใยแก้ว

λ คือ ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง

E_b คือ ค่าอิลาสติกโมดูลัสของใยแก้ว

E_r คือ ค่าอิลาสติกโมดูลัสของเคเบิล

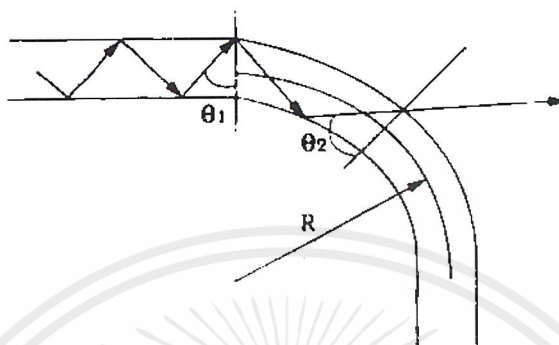
พิจารณาค่าการสูญเสียจากแมคโครเบนด์แปรผันกับ \exp^{-R/R_c}

R คือ รัศมีของการโค้งงอ

เมื่อ $R_c = a/(NA)^2$

a คือ รัศมีของแกนใยแก้ว

NA คือ นิวเมอร์ริคัลอเปอริเจอร์



θ_1 และ θ_2 คือมุมตกกระทบของลำแสงภายในใยแก้วนำแสง

รูปที่ 3-3 แสดงทางเดินของแสงในใยแก้วนำแสงที่โค้งงอ

การสูญเสียของกำลังแสงจะค่าต่ำสำหรับแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำ และถ้าผลต่างของค่าดัชนีหักเหระหว่างแกนและแคลคมิต่ำมากก็จะทำให้การสูญเสียมีค่าสูง เส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยวที่ทำงานที่ความยาวคลื่นยาว ๆ จะไวต่อการสูญเสียจากการโค้งงอ และเส้นใยแก้วที่ถูกพันอยู่รอบแกนม้วนที่มีรัศมี 10 เซนติเมตร ซึ่งนับว่าสั้นนั้นก็ยังสามารถแก้ไขได้โดยการตัดใยแก้วนำแสงส่วนที่โค้งงอทิ้งไปได้ การโค้งงอชนิดไมโครเบนด์เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างทางเรขาคณิตของเส้นใยแก้วนำแสงในกระบวนการผลิต เช่น รัศมีของแกน จุดต่อระหว่างแกน และแคลคที่ขรุขระ เป็นต้น ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการผลิต นอกจากนั้นการที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแก้วไม่เท่ากันตลอดทั้งเส้นก็ทำให้มีแสงบางส่วนกระจายออกมาจากใยแก้วนำแสงได้เช่นกัน

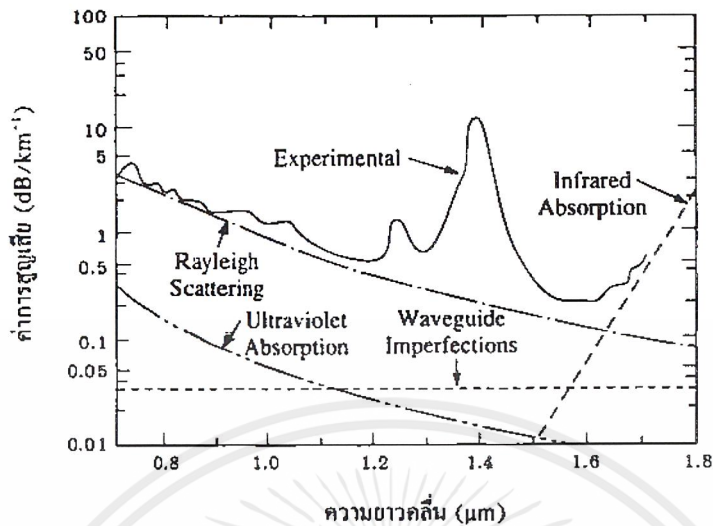
3.1.5 การลดทอนรวม

พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอนทั้งหมด (α) ตามสมการ

$$\alpha = \alpha_A + \alpha_B + \alpha_C \quad 3.3$$

เมื่อ α_A , α_B และ α_C คือค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอนภายในใยแก้วนำแสงที่แสงเดินทางผ่านไปตำแหน่ง A, B และ C รูปที่ 3.4 ข้างล่างแสดงการลดทอนที่วัดได้สำหรับเส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยว ซึ่งเห็นว่าการลดทอนต่ำสุดจะอยู่ที่ความยาวคลื่น $\lambda = 1.55$ ไมครอน ซึ่งมีค่า

ประมาณ 0.2 เดซิเบล/กิโลเมตร จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่เคเบิลใยแก้วนำแสงได้ทะลุใช้ที่ความยาวคลื่น 1.55 ไมครอนเพื่อให้สูญเสียต่ำสุด

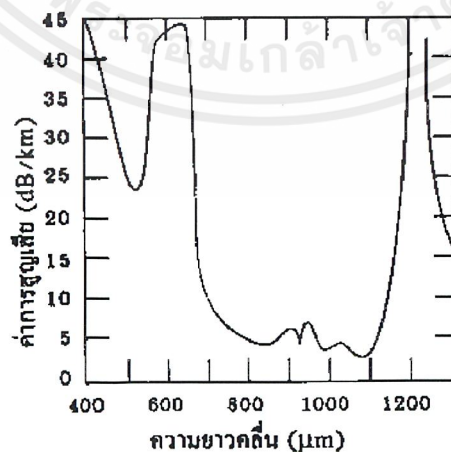


รูปที่ 3-4 แสดงการสูญเสียของเส้นใยแก้วนำแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ

3.1.6 การลดทอนและวัสดุใยแก้ว

พี ซี เอส (Plastic Clad Silica , PCS) เป็นเส้นใยแก้วที่มีการสูญเสียสูงมากซึ่งเป็นผลเนื่องจากการดุดกคลื่นของแคลด์ ทั้งนี้เพราะเส้นใยพลาสติก (Plastic Fiber) จะมีการสูญเสียมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.5

ใยแก้วฟลูออไรด์ (Fluoride Glass Fiber) จะมีการสูญเสียในช่วงความยาวคลื่นของอินฟราเรดที่มีค่าต่ำกว่าเส้นใยแก้วชนิดอื่น ๆ จึงทำให้สามารถใช้ในช่วงความยาวคลื่นมากกว่า 1.6 ไมครอน ขณะเดียวกันก็สามารถลดการสะท้อนเรย์ลีที่ความยาวคลื่นยาว ๆ ได้ด้วย

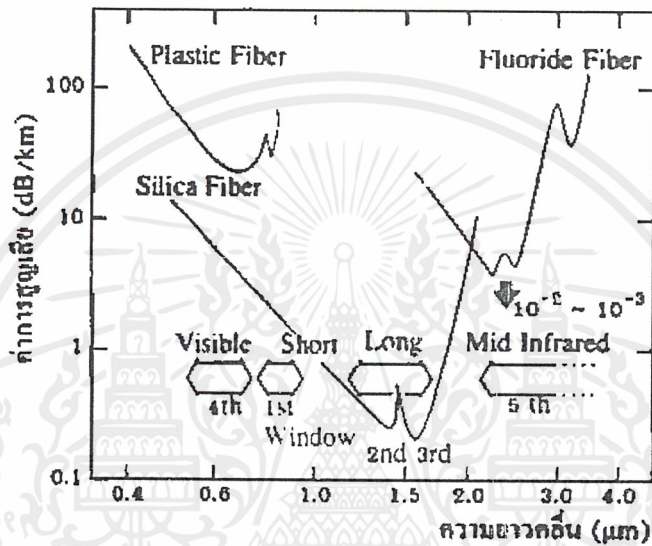


รูปที่ 3-5 แสดงการสูญเสียที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ของ PCS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.7 สเปกตรัมของการลดทอน

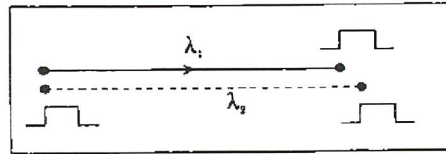
สเปกตรัมของการลดทอนในรูปที่ 3.6 แสดงให้เห็นว่าช่วงความยาวคลื่นที่มีค่าการสูญเสียต่ำจะมีอยู่ 3 ช่วง คือ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 850 ,1,300 และ 1,550 นาโนเมตร ซึ่งแต่ละความยาวคลื่นจะมีการนำไปประยุกต์ใช้งานต่างกัน คือที่ความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร นั้นจะใช้กับระบบเครือข่ายท้องถิ่น (LAN) และการตรวจวัด ส่วนที่ความยาวคลื่น 1,300 นาโนเมตร จะใช้กับระบบเครือข่ายความเร็วสูง (High Speed LAN) และการสื่อสาร ส่วนที่ความยาวคลื่น 1,550 นาโนเมตร จะใช้กับงานด้านการสื่อสาร



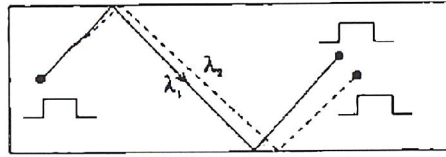
รูปที่ 3-6 แสดงสเปกตรัมของการลดทอน

3.2 การกระจายในใยแก้วนำแสง

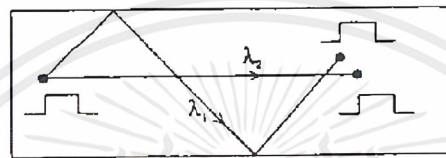
ขณะที่พัลส์แสงเดินทางไปตามเส้นใยแก้วนั้น พัลส์แต่ละแบบจะขยายกว้างออกและทับกับพัลส์ที่อยู่ใกล้เคียงทำให้เกิดความผิดพลาดเกิดขึ้นที่เอาต์พุต การเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การเกิดการกระจายของพัลส์ (Dispersion) กลไกที่ทำให้เกิดการกระจายมี 3 ชนิด คือ การกระจายเชิงวัสดุ (Material Dispersion) การกระจายของท่อนำคลื่น (Waveguide Dispersion) และการกระจายเชิงโหมด (Mode Dispersion) ดูรูปที่ 3.7



(ก) การกระจายเชิงวัสดุ



(ข) การกระจายของท่อนำคลื่น

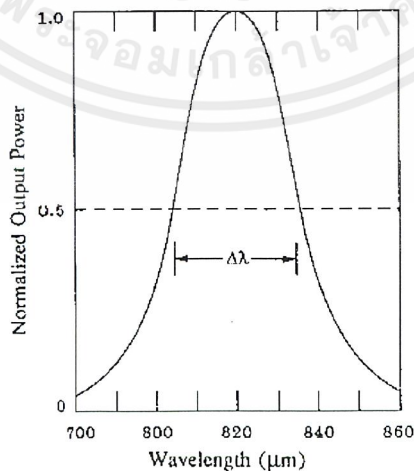


(ค) การกระจายเชิงโหมด

รูปที่ 3-7 แสดงการเกิดการกระจายของพัลส์สัญญาณแบบต่าง ๆ

3.2.1 การกระจายเชิงวัสดุ

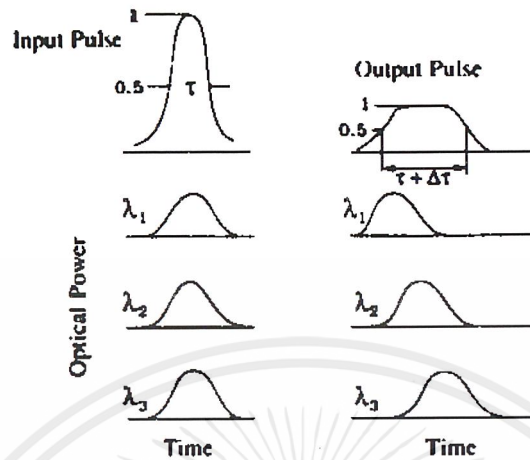
การกระจายแบบนี้เกิดขึ้นเนื่องจากดัชนีหักเหของซิลิกาที่ทำไมแก้วนำแสงเปลี่ยนแปลงไปตามความยาวคลื่นของแสงที่เดินทางผ่าน จึงทำให้ความเร็วของแสงในซิลิกาเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่น ในขณะที่เดียวกันแสงที่มาจากแหล่งกำเนิดแสง เช่น LED หรือ LD จะมีความยาวคลื่นไม่คงที่เพียงความยาวคลื่นเดียวจึงทำให้แสงที่ได้จากแหล่งกำเนิดแสงมีความกว้างของสเปกตรัม ($\Delta\lambda$) ขึ้น ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3-8 แสดงสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น พัลส์ที่เกิดจากแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันจะมีความเร็วในซีกิตกาที่แตกต่างกัน นั่นคือ พัลส์ที่เกิดจากแสงคนละความยาวคลื่นจะถึงปลายทางต่างเวลากัน ดังแสดงในรูปที่ 3.9



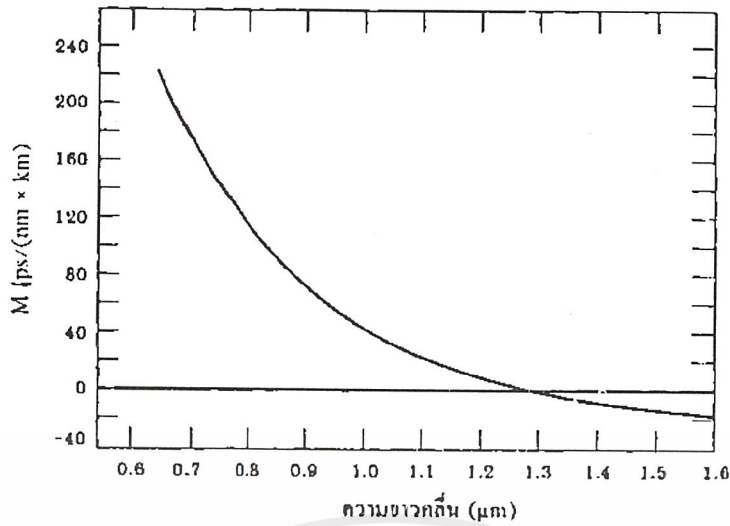
รูปที่ 3-9 แสดงการเกิดกระจายของพัลส์

ความกว้างของพัลส์ ($\Delta\lambda$) ที่เพิ่มขึ้นต่อหนึ่งหน่วยความยาว (L) สามารถหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\tau}{L} &= \frac{\lambda}{c} n\Delta\lambda \\ &= -M\Delta\lambda \end{aligned} \quad 3.4$$

เมื่อ λ คือความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง c คือความเร็วแสงในสุญญากาศ n คือค่าดัชนีหักเหของวัสดุที่ทำใยแก้ว M คือค่าการกระจายเชิงวัสดุ และ $\Delta\lambda$ คือ ความกว้างของสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงโดยที่ค่า M จะมีค่าสัมพันธ์กับความยาวคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ตัวอย่างการคำนวณ หาความกว้างของพัลส์ที่เพิ่มขึ้น โดยพิจารณาในระบบเชื่อมสัญญาณที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดซีกิตกายาว 2 กิโลเมตร ความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร และแหล่งกำเนิดแสง LED มีความกว้างของสเปกตรัม เท่ากับ 30 นาโนเมตร และมีค่า M ตามรูปที่ 3.10 เท่ากับ 90 ps/ nm/ km คือ

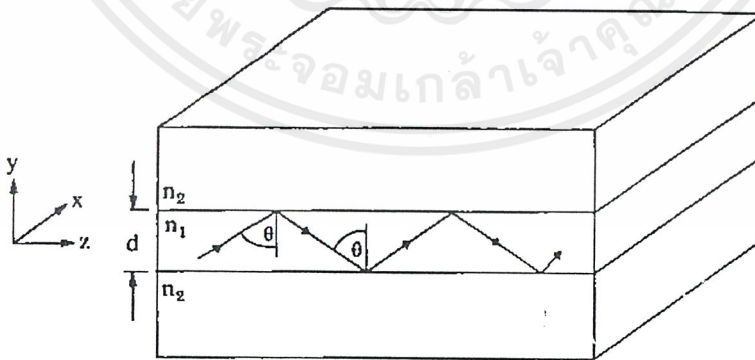
$$\begin{aligned} &= -M\Delta\lambda L \\ &= 90 \text{ ps / nm / km} \times 30 \text{ nm} \times 2 \text{ km} \\ &= 5.4 \text{ ns} \end{aligned}$$



รูปที่ 3-10 แสดงการเกิดการกระจายเชิงวัสดุ

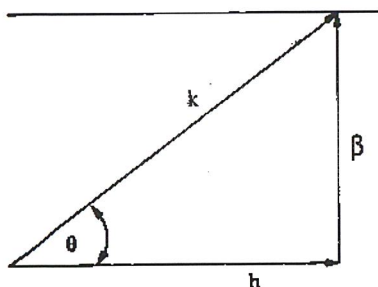
3.2.2 การกระจายท่อนำคลื่น

การกระจายแบบนี้จะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นเช่นเดียวกับการกระจายเชิงวัสดุ เพื่อให้เข้าใจการกระจายแบบนี้จะต้องกล่าวถึงทางเดินของแสงโหมดต่าง ๆ ในท่อนำคลื่น โดยการสมมติว่ามีท่อนำคลื่นที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.11 เมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านชั้นกลางที่มีดัชนีหักเห n_1 ซึ่งชั้นนี้จะบางมากและมีความหนาเท่ากับ d โดยชั้นที่อยู่บนและล่างจะมีค่าดัชนีหักเห n_2 และ n_3 ตามลำดับ กรณีที่ $n_2 = n_3$ เรียกว่าเป็นโครงสร้างที่สมมาตร ถ้าให้ k เป็นแฟกเตอร์ของการแพร่ (Propagation Factor) ในตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n_1 โดยที่ k จะมีค่าเป็น $k = k_0 n_1$ เมื่อ k_0 คือ เป็นแฟกเตอร์ของการแพร่ในอากาศ



รูปที่ 3-11 แสดงลักษณะของท่อนำคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-12 แสดงมุมตกกระทบและทางเดินของแสง

ถ้าแสงเดินทางทำมุมตกกระทบ θ ดังรูปที่ 3.12 ก็จะสามารถกระจายทางเดินของแสงให้อยู่ในแนวตรงได้ และถ้าให้ β เป็นแฟกเตอร์ของการแพร่ในแนวตรงซึ่งทำให้ได้ว่า

$$\beta = k \sin \theta = k_0 n_1 \sin \theta \quad 3.6$$

และ
$$h = k \cos \theta$$

ในที่นี้ β เรียกว่า แฟกเตอร์ของการแพร่ตามยาว (Longitudinal) และให้ n_{eff} คือดัชนีเอฟเฟกทีฟ (Effective Refractive Index) ซึ่งเท่ากับ $n_1 \sin \theta$ โดยที่ n_{eff} จะเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดโหมดต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ของแสง เมื่อค่า θ มีค่าอยู่ระหว่าง θ_c และ 90° ดังนั้น n_{eff} จะมีค่าอยู่ระหว่าง n_2 และ n_1

3.2.3 การคำนวณโหมดของแสงในท่อนำคลื่น

แสงที่สะท้อนไปมาในท่อนำคลื่นจะถูกกำหนดให้มีการเคลื่อนที่อยู่ 2 ทิศทางของการโพลาไรซ์ คือ TE (Transverse Electric) และ TM (Transverse Magnetic) ในกรณีที่ n_1 และ n_2 มีค่าใกล้เคียงกันมาก ($n_1 \sim n_2$) โหมดของ TE และ TM สามารถหาได้จากสมการ (ดูรูปที่ 3.12)

$$\tan \frac{hd}{2} = \frac{1}{n_1 \cos \theta} \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2} \quad 3.7$$

สมมติว่า $n_1 = 3.6$, $n_2 = 3.55$ ดังนั้นจะได้ว่า มุมวิกฤตคือ

$$\theta_c = \sin^{-1} n_2/n_1 = 80.4^\circ$$

นั่นคือ $80.4^\circ \leq \theta_c \leq 90^\circ$ และ $3.55 \leq n_{\text{eff}} \leq 3.6$

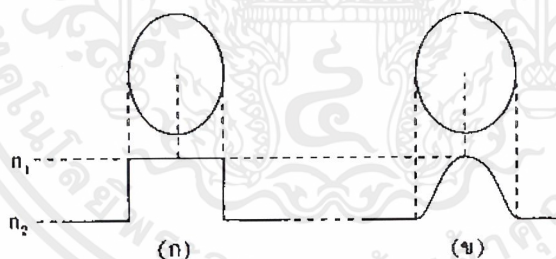
ตารางที่ 3-2 แสดงค่าจากการคำนวณ

θ	n_{eff}	$\text{Tan}(hd/2)$	hd	$2\pi n_1 \cos \theta$	d/λ
80.4	3.550	0	0	3.757	0
82	3.565	0.651	1.155	3.148	0.367
84	3.580	1.235	1.780	2.364	0.753
86	3.591	2.161	2.275	1.578	1.442
88	3.598	4.653	2.718	0.789	3.445
90	3.600	∞	3.142	0	∞

ตารางที่ 3.2 แสดงถึงค่าสมการที่คำนวณโดยเลือกค่า θ ตามค่าในตารางแถวตั้งที่ 1 ค่าในแถวตั้งที่ 2 เป็นค่า n_{eff} คำนวณได้จากสมการ (3.6) ในแถวตั้งที่ 3 เป็นค่าคำนวณได้จากสมการ (3.7) ทำให้สามารถคำนวณค่า hd ได้ และค่า d/λ คำนวณจากสมการ (3.8)

$$\frac{d}{\lambda} = \frac{hd}{2\pi n_1 \cos \theta} \quad 3.8$$

ค่าที่คำนวณได้จากสมการ (3.7) และ (3.8) จะมีค่าของโหมดต่ำสุดซึ่งนำไปเขียนกราฟในรูปที่ 3.13 โดยจะกำหนดชื่อเป็น TE_0 และ TM_0 รูปนี้เรียกว่า ชาร์ตของโหมด



(ก) ลักษณะดัชนีหักเหแสงของแกนเมื่อมีลักษณะเป็นชั้นบันได

(ข) การกระจายของสัญญาณเมื่อดัชนีหักเหภายในแกนมีค่าคงที่ n_1 เปลี่ยนแปลง

รูปที่ 3-13 แสดงการแพร่ของคลื่นที่โหมดต่าง ๆ

พิจารณาโหมดอื่น ๆ ที่สูงขึ้นได้โดย ค่า (d/λ) จะถูกกำหนดโดยสมการ

$$\left(\frac{d}{\lambda}\right)^m = \left(\frac{d}{\lambda}\right)_0 + \frac{m}{2n_1 \cos \theta} \quad 3.9$$

เมื่อ m เป็นค่าจำนวนเต็มที่เป็นบวกและ $[d/\lambda]_0 =$ ค่า d/λ สำหรับโหมดต่ำสุดที่คำนวณ

จากสมการ (3.8) โดยโหมดที่แตกต่างที่เกิดขึ้นในท่อนำคลื่นจะมีค่า $\Delta[d/\lambda]$ คือ

$$\Delta\left(\frac{d}{\lambda}\right) = \frac{1}{2n_1 \cos \theta} \quad 3.10$$

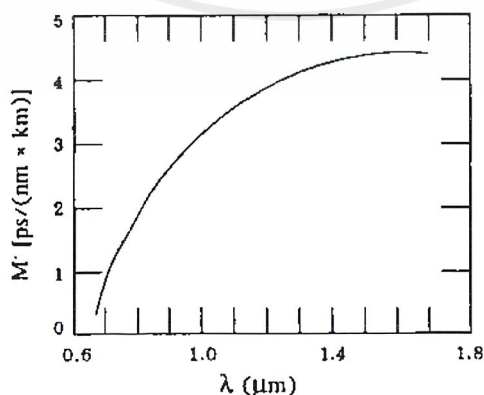
ตารางที่ 3.3 แสดงค่าคำนวณสำหรับโหมดต่าง ๆ คือ TE_0 , TE_1 , TE_2 , และ TE_3 จากรูปที่ 3.14 สำหรับโหมดเดียวกัน เช่น TE_0 ถ้าค่า $[d/\lambda]$ เปลี่ยนไป ในเส้นใยแก้วค่านี้นจะทำให้พัลส์ที่โหมดเดียวกันแต่มี n_{eff} ต่างกันถึงปลายทางคนละเวลา นั่นคือทำให้สัญญาณพัลส์ที่โหมดเดียวกันแต่ n_{eff} ต่างกันจะถึงปลายทางคนละเวลา จึงทำให้สัญญาณพัลส์รวมมีความกว้างเพิ่มขึ้น ค่าเวลาที่เพิ่มขึ้นของพัลส์หาได้จาก

$$\begin{aligned} \frac{\Delta(\tau)}{L} &= \frac{\lambda}{c} n_{eff} \Delta\lambda \\ &= -M' \Delta\lambda \end{aligned} \quad 3.11$$

โดยที่ M' คือการกระจายท่อนำคลื่น

ตารางที่ 3-3 แสดงการคำนวณ

θ	n_{eff}	TE_0 $(d/\lambda)_0$	$\Delta(d/\lambda)$	TE_1 $(d/\lambda)_1$	TE_2 $(d/\lambda)_2$	TE_3 $(d/\lambda)_3$
80.4°	3.550	0	0.836	0.836	1.672	2.508
82°	3.565	0.367	0.998	1.365	2.363	3.360
84°	3.580	0.753	1.329	2.082	3.410	4.739
86°	3.591	1.442	1.991	3.433	5.424	7.415
88°	3.598	3.445	3.980	7.425	11.40	15.38
90°	3.600	α	α	α	α	α



รูปที่ 3-14 แสดงการกระจายของท่อนำคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายเชิงโหมด

การกระจายของโหมด ในกรณีแหล่งกำเนิดแสงมีความยาวคลื่นเพียงความยาวคลื่นเดียวจะทำให้ค่า $[d/\lambda]$ คงที่ แต่โหมดที่เคลื่อนที่ในเส้นใยแก้วจะมีอยู่หลายโหมด จึงใช้ระยะเวลาในการเดินทางไปยังปลายทางไม่เท่ากัน โดยในและโหมดจะทำให้ความกว้างของพัลส์ขยายออกเช่นเดียวกัน การกระจายแบบนี้ไม่ขึ้นกับความกว้างของสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง การกระจายแบบนี้จะเกิดขึ้นมากในใยแก้วแบบหลายโหมด ส่วนในใยแก้วแบบโหมดเดียวจะไม่มีกระจายแบบนี้ เพราะใยแก้วโหมดเดียวจะมีเพียงโหมดเดียวที่เคลื่อนไปในใยแก้วเท่านั้น เวลาที่เพิ่มขึ้นทั้งหมดของความกว้างของพัลส์จะเท่ากับ

$$(\Delta\tau)^2 = (\Delta\tau)_{\text{mod}}^2 + (\Delta\tau)_{\text{dis}}^2 \quad 3.12$$

เมื่อ $(\Delta\tau)_{\text{mod}}$ คือ การกระจายความกว้างของพัลส์เนื่องจากโหมด $(\Delta\tau)_{\text{dis}}$ คือการกระจายเนื่องจากการกระจายเชิงวัสดุและท่อนำคลื่นซึ่งเขียนเป็นสมการคือ

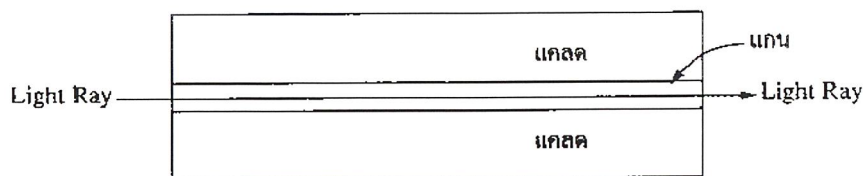
$$(\Delta\tau)_{\text{dis}} = - (M' + M) \Delta\lambda \tau \quad 3.13$$

ตารางที่ 3-4 แสดงเวลาที่เพิ่มขึ้นของการใช้แหล่งกำเนิดแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ

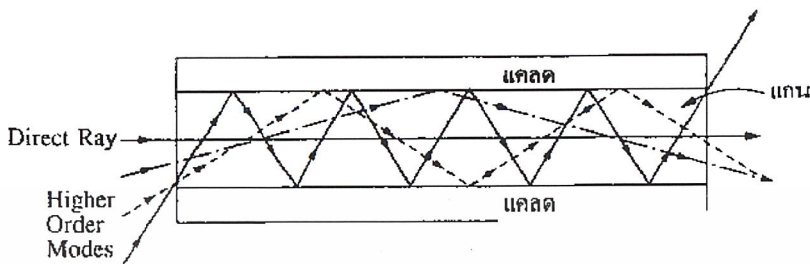
Source	λ μm	$\Delta\lambda$ nm	$(\Delta\tau/L)$ ns/km	แอนะล็อก		ดิจิทัล	
				$F_{3\text{dB}} \times L$	$R_{\text{NRZ}} \times L$	$F_{3\text{dB}} \times L$	$R_{\text{RZ}} \times L$
				GHz×km	GHz×km	Gbps×km	Gbps×km
LED	0.82	20	2.2	0.23	0.32	0.16	0.16
LED	1.5	50	0.75	0.67	0.94	0.47	0.47
LD	0.82	1	0.11	4.55	6.4	3.2	3.2
LD	1.5	1	0.015	33.33	46.7	23.3	23.3

3.3 การเดินทางของแสงในใยแก้วนำแสง

แสงสามารถแพร่กระจายเข้าไปในใยแก้วได้โดยการสะท้อนหรือการหักเหแสง กล่าวคือแสงจะแพร่กระจายอย่างไรขึ้นอยู่กับโหมดของการแพร่กระจายและรูปแบบของดัชนีหักเห โหมดของการแพร่กระจายหรือโหมด หมายถึงทางเดิน (Path) ของแสงนั่นเอง ถ้าทางเดินของแสงมีเพียงทางเดียวที่ทำให้แสงแพร่กระจายเข้าไปในใยแก้วนำแสงได้เรียกโหมดเดียว (Single Mode) ถ้ามีทางเดินของแสงหลาย ๆ ทาง เรียกว่า มัลติโหมด (Multimode) หรือหลายโหมด รูปที่ 3.15 แสดงการกระจายของแสงเข้าไปในใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดียวและแบบหลายโหมด



(ก) โหมดเดียว

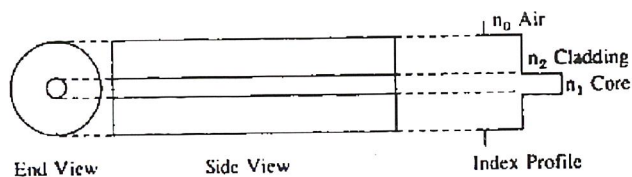


(ข) หลายโหมด

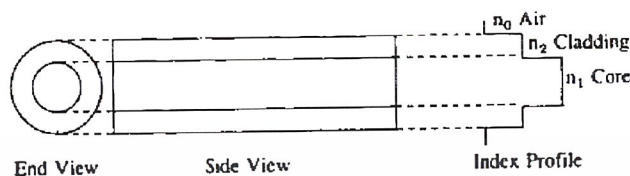
รูปที่ 3-15 แสดงโหมดของการแพร่กระจายของแสง

อินเดกซ์โปรไฟล์

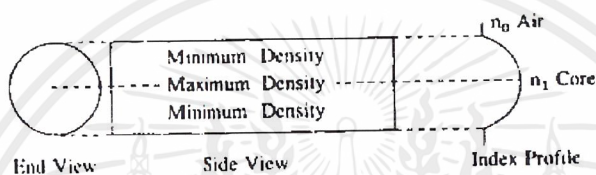
อินเดกซ์โปรไฟล์ (Index Profile) ของใยแก้วนำแสงคือ กราฟของความสัมพันธ์ของดัชนีหักเหของแกนนำเส้นใยแก้วนำแสง โดยที่ดัชนีหักเหถูกเขียนบนแกนนอนและระยะห่างจากแกนของใยแก้วนำแสงอยู่ในแนวตั้ง อินเดกซ์โปรไฟล์ของใยแก้วนำแสงทั้งสามชนิด (ดูรูปที่ 3.16) โดยทั่ว ๆ ไปใยแก้วนำแสงจะมีอินเดกซ์โปรไฟล์อยู่ 2 ประเภทคือ แบบสเตปและเกรดอินเดกซ์ หรือแบบขั้นบันได และแบบมน โดยที่แบบสเตปอินเดกซ์จะมีดัชนีหักเหของแสงคงที่ตลอดเนื้อสารที่เป็นแกนและแกลด โดยปกติค่าดัชนีหักเหที่แกนจะมากกว่าที่แกลด แนวทางเดินของแสงจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงสะท้อนไปมาตรงบริเวณรอยต่อระหว่างแกนกับแกลดตามกฎของสเนลล์ ส่วนใยแก้วนำแสงแบบเกรดอินเดกซ์จะมีดัชนีหักเหของแกนเปลี่ยนแปลงไปตามแนวแกนของใยแก้ว โดยที่ตำแหน่งแนวศูนย์กลางของใยแก้วจะมีค่าดัชนีหักเหสูงสุด จากนั้นค่าดัชนีหักเหจะค่อย ๆ ลดลงไปตามระยะที่ห่างออกจากแนวศูนย์กลาง จนมีค่าเท่ากับดัชนีหักเหของแกลดในตำแหน่งที่แกนต่อกับแกลดพอดี โครงสร้างของใยแก้วนำแสงโดยทั่ว ๆ ไปแบ่งออกเป็นประเภทตามโครงสร้างได้ 3 ประเภท คือ โหมดเดียว หลายโหมดสเตปอินเดกซ์ และหลายโหมดเกรดอินเดกซ์



(ก) โหมดเดี่ยวขั้นบันได



(ข) หลายโหมดขั้นบันได

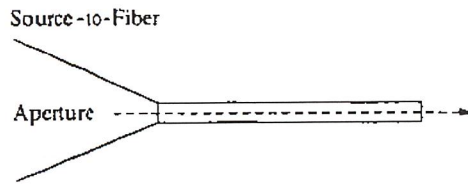


(ค) หลายโหมดแบบแกน

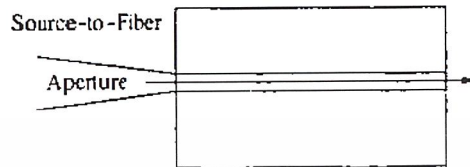
รูปที่ 3-16 แสดงอินเดกซ์โปรไฟล์ของแกนใยแก้วนำแสง

ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวสเตปอินเดกซ์มีแกนกลางขนาดเล็กมากจนแสงผ่านเข้าไปภายในได้เพียงทางเดียวเท่านั้น ใยแก้วนำแสงประเภทนี้แสดงในรูปที่ 3.17 รูปแบบอย่างง่ายที่สุดของใยแก้วนำแสงชนิดนี้ก็คือมีแกนเป็นแก้ว และเคลดเป็นอากาศ ความแตกต่างของดัชนีหักเหของตัวกลางทั้งสองมีค่ามากทำให้มุมวิกฤต (ประมาณ 42°) มีค่าน้อยที่รอยต่อระหว่างแก้วและอากาศ ผลทำให้ใยแก้วนำแสงมีมุมรับแสงเป็นมุมกว้าง ดังนั้นทำให้ง่ายต่อการส่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเข้าไปในใยแก้วนำแสง อย่างไรก็ตามใยแก้วนำแสงชนิดนี้ง่ายต่อการแตกหักจึงมีข้อจำกัดในการนำมาใช้งาน

ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวสเตปอินเดกซ์ที่เหมาะสมนำไปใช้งานคือใยแก้วนำแสงที่มีแกนเป็นแก้วและมีเคลดที่ไม่ใช่อากาศ ค่าดัชนีหักเหของเคลดมีค่าน้อยกว่าดัชนีหักเหของแกนเล็กน้อยและมีค่าเท่ากันตลอด สายใยแก้วนำแสงชนิดนี้จะแข็งแรงกว่าชนิดที่มีอากาศเป็นเคลดแต่มุมวิกฤตจะมีค่ามาก (ประมาณ 77°) เป็นผลให้ใยแก้วมีมุมรับแสงแคบซึ่งทำให้ยากต่อการส่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเข้าไปในใยแก้วนำแสง



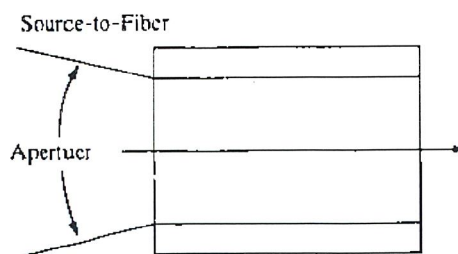
(ก) มีอากาศเป็นแคลด



(ข) มีแก้วเป็นแคลด

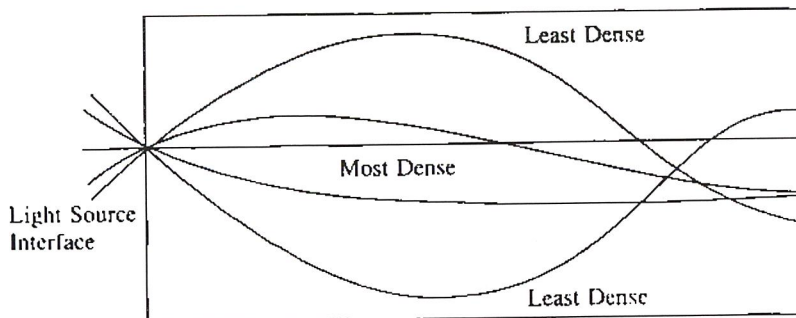
รูปที่ 3-17 โยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวชั้นบันได

โยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเตปอินเดกซ์มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับโหมดเดี่ยวแต่มีแกนใหญ่กว่า (ดูรูปที่ 2.18 และ 2.19) โยแก้วนำแสงประเภทนี้จะมีมุมในการรับแสงกว้างทำให้แสงผ่านเข้าไปได้ง่ายขึ้น รังสีของแสงที่กระทบรอยต่อของแกนและแคลดที่มีมุมมากกว่ามุมวิกฤต จะผ่านเข้าไปในโยแก้วนำแสงโดยการสะท้อนกลับป้อนกลับมารอยต่อทั้งสองเป็นรูปซิกแซก รังสีของแสงที่กระทบรอยต่อของแกนและแคลดโดยมีมุมน้อยกว่ามุมวิกฤต จะผ่านเข้าไปในแคลดแล้วหายไป จะเห็นได้ว่ามีหลายทางที่แสงจะผ่านเข้าไปในโยแก้วนำแสง ซึ่งทำให้รังสีต่าง ๆ เดินทางผ่านโยแก้วนำแสงที่ความยาวหนึ่งในเวลาที่ไม่นานเท่ากัน โยแก้วนำแสงหลายโหมดเกรดอินเดกซ์มีลักษณะของแกนที่ดัชนีหักเหค่ามากที่สุดตรงจุดศูนย์กลางแล้วดัชนีหักเหจะลดลงไปตามแนวแกนรัศมีเมื่อแสงผ่านเข้าไปในโยแก้วนำแสงโดยการหักเหมุมต่าง ๆ กัน แล้วทางเดินของแสงจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง รังสีของแสงด้านนอกสุดจะเดินทางด้วยระยะไกลกว่ารังสีของแสงที่อยู่ใกล้กับจุดศูนย์กลางของโยแก้วนำแสงเพราะว่าดัชนีหักเหลดลงตามแนวรัศมี และความเร็วแปรผันเป็นส่วนกลับกับค่าดัชนีหักเห ดังนั้นรังสีของแสงที่ห่างจากจุดศูนย์กลางมากจะมีความเร็วมากกว่าทำให้รังสีทุก ๆ รังสีใช้เวลาในการเดินทางผ่านโยแก้วนำแสงเท่ากัน



รูปที่ 3-18 โยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดสเตปอินเดกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-19 ใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดเกรดอินเดกซ์

นิวมอริคัลลอเปอร์เจอร์

รูปที่ 3.20 แสดงรูปตัดขวางของใยแก้วนำแสงชนิดดัชนีหักเหแบบชั้นบันไดที่ใช้ในการหา นิวมอริคัลลอเปอร์เจอร์ (NA) จะเห็นว่ารูปกรวยของรังสีของแสงที่รับโดยใยแก้วนำแสงจะหาได้จากความแตกต่างของดัชนีหักเหของแกนและเคลด ส่วนของความแตกต่างของดัชนีหักเหนี้นิยามโดย

$$\Delta = (n_{\text{core}} - n_{\text{cl}}) / n_{\text{core}} \quad 3.14$$

จากนิยามของมุมวิกฤตนั้นสามารถจะหาขนาดของรูปกรวยของแสงที่รับโดยใยแก้วนำแสง รูปที่ 3.20 รังสีตกกระทบที่รอยต่อของแกนและเคลดที่มุมวิกฤต ถ้ามุมของกรวยเป็น θ_i จากกฎของสเนลล์จะได้

$$\begin{aligned} n_i \sin \theta_i &= n_{\text{core}} \sin \theta_c = n_{\text{core}} \sin(90^\circ - \theta_c) \\ &= n_{\text{core}} \cos \theta_c = n_{\text{core}} (1 - \sin^2 \theta_c)^{1/2} \\ \sin \theta_c &= n_{\text{cl}} / n_{\text{core}} \end{aligned} \quad 3.15$$

ดังนั้น $n_i \sin \theta_i = \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{cl}}^2}$ นิวมอริคัลลอเปอร์เจอร์ คือ การวัดว่าระบบของแสงว่าจะรับแสงได้มากน้อยเพียงใด ระบบของแสงอาจจะเป็นใยแก้วนำแสงหรือออปเจ็คทีฟเลนส์ (Objective Lens) หรือ โฟโตกราฟิกเลนส์ (Photographic Lens) NA คือ ผลคูณของค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่แสงตกกระทบกับค่า \sin ของมุม θ_i ที่มากที่สุด คือ

$$NA = n_i \sin \theta_{\text{max}} \quad 3.16$$

ส่วนมากแสงที่ตกกระทบจะมาจากอากาศ ดังนั้น $n_i = 1$ ในกรณีนี้ นิวมอริคัลลอเปอร์เจอร์ของใยแก้วนำแสงชนิดสเตปอินเดกซ์ คือ

$$NA = \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{cl}}^2} \quad 3.17$$

เมื่อ $\Delta \ll 1$

$$\begin{aligned} NA &= \sqrt{(n_{core} - n_{cl})}(n_{core} + n_{cl}) \\ &= \sqrt{(2n_{core} \Delta)(n_{core})} \\ &= n_{core} \sqrt{2\Delta} \end{aligned} \quad 3.18$$

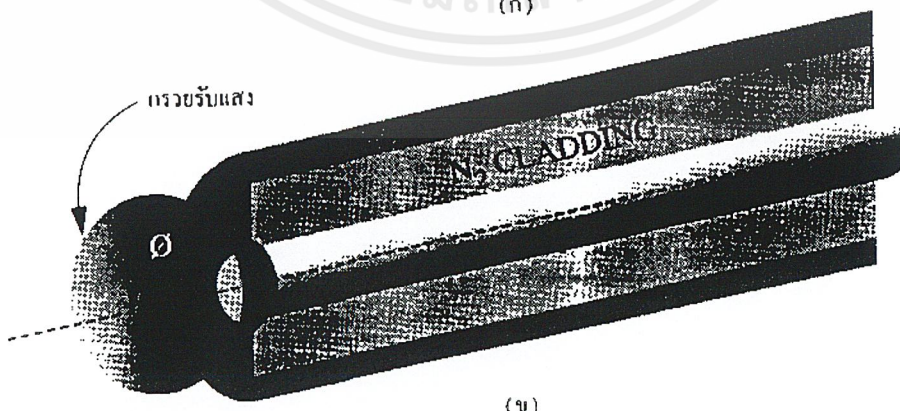
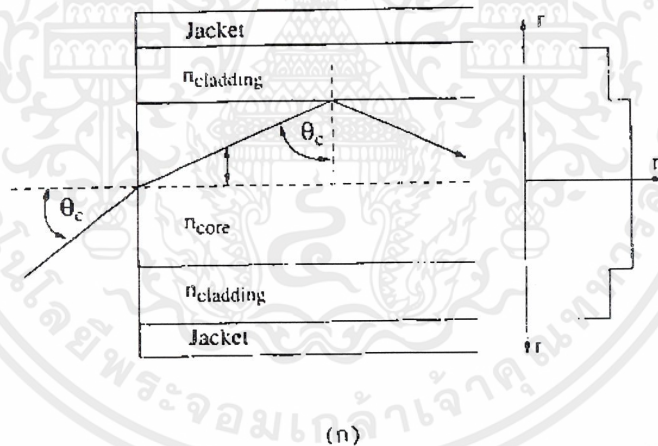
เงื่อนไขที่ $\Delta \ll 1$ เรียกว่า วีคลี่ไกด์ (Weekly-guide)

ค่าผลต่างดัชนีหักเหจำเพาะ (Δ)

สำหรับค่าผลต่างดัชนีหักเหจำเพาะนั้นเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงขนาดของความแตกต่างของดัชนีหักเหในส่วนแกน และเคลดโดยกำหนดค่าผลต่างดัชนีหักเหจำเพาะดังสมการ

$$\Delta = \frac{(n_{core} - n_{cl})}{n_{core}} \quad 3.19$$

โดยทั่วไปค่าผลต่างดัชนีหักเหจำเพาะจะมีค่าน้อยกว่า 1 มาก จึงมักจะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยค่าผลต่างดัชนีหักเหจำเพาะนี้หากมีค่ามากจะทำให้ง่ายต่อการป้อนแสงเข้าไปในแกน

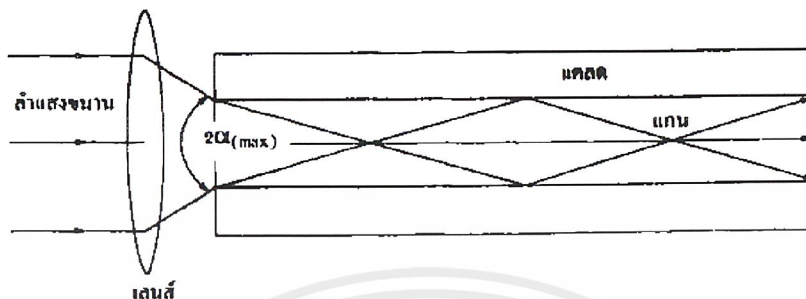


รูปที่ 3-20 ไดอะแกรมของการหา NA ของใยแก้วชนิดดัชนีหักเหชั้นบันได

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมรับแสง

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นการที่แสงสามารถเดินทางเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงได้นั้น มุมตกกระทบที่ปลายของเส้นใยแก้วนำแสงจะต้องมีค่าน้อยกว่า α_{\max} พิจารณารูปที่ 3.21 ดังนั้น มุมรับแสงที่เหมาะสมจึงหมายถึงมุมที่มีค่าเป็น 2 เท่าของ α_{\max}



รูปที่ 3-21 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยแก้วนำแสง

นั่นคือความสัมพันธ์ของผลต่างดัชนีหักเหจำเพาะ นิวเมอริคัลแอปอเจอร์ และมุมรับแสง อธิบายจากตัวอย่างของเส้นใยนำแสงดังนี้ คือ

$$\begin{aligned} n_{\text{core}} &= 1.53, \quad n_{\text{cl}} = 1.50, \quad n_0 = 1 \\ \theta_c &= \sin^{-1}(1.50/1.53) = 78.6^\circ \\ \Delta &= (1.53 - 1.50)/1.53 = 0.0196 = 1.96\% \\ NA &= 1.53 (2 \times 0.0196)^{1/2} = 0.303 \\ \alpha_{(\max)} &= \sin^{-1} 0.303/1 = 17.6^\circ \end{aligned}$$

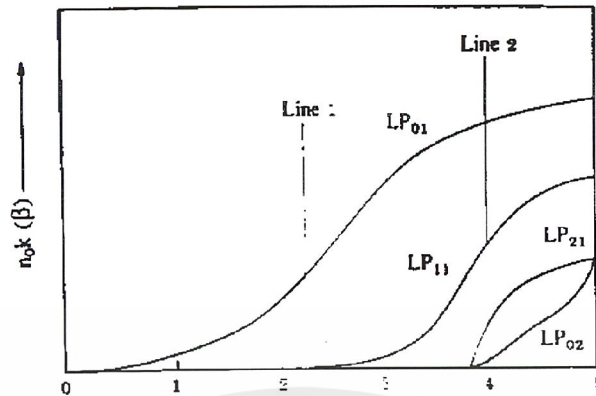
ความถี่นอร์มัลไลซ์ (V)

ในการหาจำนวนโหมดของการเคลื่อนที่ของคลื่นภายในเส้นใยแก้วนำแสง สามารถหาได้จากพารามิเตอร์ที่เรียกว่า ความถี่นอร์มัลไลซ์ หรือ V ดังสมการ

$$V = \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right) NA \quad 3.20$$

เมื่อ a เป็นรัศมีของแกน λ เป็นความยาวคลื่นของแสง จะเห็นได้ว่าขนาดของแกนภายในเส้นใยแก้วนำแสงนั้นมีความสัมพันธ์กับค่า NA และ V โดยทราบแล้วว่าแกนของเส้นใยนำแสงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าจะมีค่า NA มากกว่า และจากสมการข้างต้น ค่า V สัมพันธ์กับค่า NA สำหรับเส้นใยนำแสงโหมดเดียวมี $0 < V < 2.405$ แต่สำหรับเส้นใยนำแสงหลายโหมด $V > 2.405$ โหมดของแสงดังรูปที่ 3.22 เมื่อ LP หมายถึงรูปแบบของการกระจายพลังงานของแสงที่ใช้เมื่อออกจากปลายเส้นใยแก้วนำแสง เมื่อ LP_{01} หมายถึงการกระจายพลังงาน

แสงเมื่อแสงออกจากปลายเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียว ส่วน LP_{11} , LP_{21} และ LP_{02} เป็นชนิดหลายโหมด และ β คือ ค่าคงที่ของการแพร่



รูปที่ 3-22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่นอร์มัลไลซ์

เส้นใยพลาสติกนำแสง

การสื่อสารเครือข่ายแบนด์วิดท์กว้างนับว่ามีความสำคัญมากในการนำมาใช้งานทางด้านสื่อสาร ทั้งทางด้านข้อมูล ภาพ และเสียง เส้นใยพลาสติกนำแสง (Plastic Optical Fiber, POF) ในปัจจุบันนั้นสามารถส่งผ่านข้อมูลได้มากขึ้นถึง 300 Mbit/s ถึง 3 Gbit/s ถึงแม้จะไม่เทียบเท่ากับความสามารถของใยแก้วนำแสงก็ตาม แต่นับว่ามีอัตราที่มากกว่าการใช้สายทองแดง ด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1 มิลลิเมตร ทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและเดินสายมากกว่าใยแก้ว เส้นใยพลาสติกนั้นเหมาะสมกับการส่งข้อมูลในระยะทางใกล้ ๆ ประมาณ 100 เมตร หรือน้อยกว่า อย่างเช่น ระบบ LAN และการสื่อสารประสม แม้กระทั่งการส่งข้อมูลแบบ อะซิงโครนัส (Asynchronous Transfer Mode, ATM) ซึ่งเดิมใช้สายทองแดงซึ่งมีความจุของสัญญาณไม่เพียงพอ ในการเชื่อมต่อต่าง ๆ นั้นเส้นใยพลาสติกก็ทำได้ง่าย ดังนั้น ในไม่ช้าเส้นใยพลาสติกจะเข้ามามีบทบาทอย่างมากแน่นอนจนสามารถนำเครือข่ายสื่อสารเข้าถึงบ้านเรือน หรือที่อยู่อาศัยได้ (Fiber-optic to the Home) เส้นใยพลาสติกนั้นอาจทำมาจากพลาสติกประเภทต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น โพลีเมทิลเมทาคริเลต (Polymethylmethacrylate, PMMA) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความยาวคลื่นประมาณ 650 nm ที่มีค่าการลดทอนของแสงเท่ากับ 150 dB/km อย่างไรก็ตามในช่วงความยาวคลื่นนี้ไม่ได้อยู่ในย่านของการสื่อสารจึงไม่นิยมใช้งาน เส้นใยพลาสติกอีกประเภทหนึ่งคือ ฟลูออรีเนทโมโนเมอร์ (Fluorinated Monomer) ซึ่งพบว่ามีค่าการลดทอนที่ 25 – 50 dB/km ในช่วงความถี่ที่สามารถใช้ในเครือข่ายสื่อสารได้คือ 600 – 1300 nm คสลันใยพลาสติกประเภทนี้เป็นสารโพลีเมอร์โดยเมื่อนำไปใช้งานจะมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 750 ถึง 1000 ไมโครเมตร และสามารถส่งผ่านสัญญาณที่มีอัตราเร็วได้ถึง 3 Gbit/s เลยทีเดียว

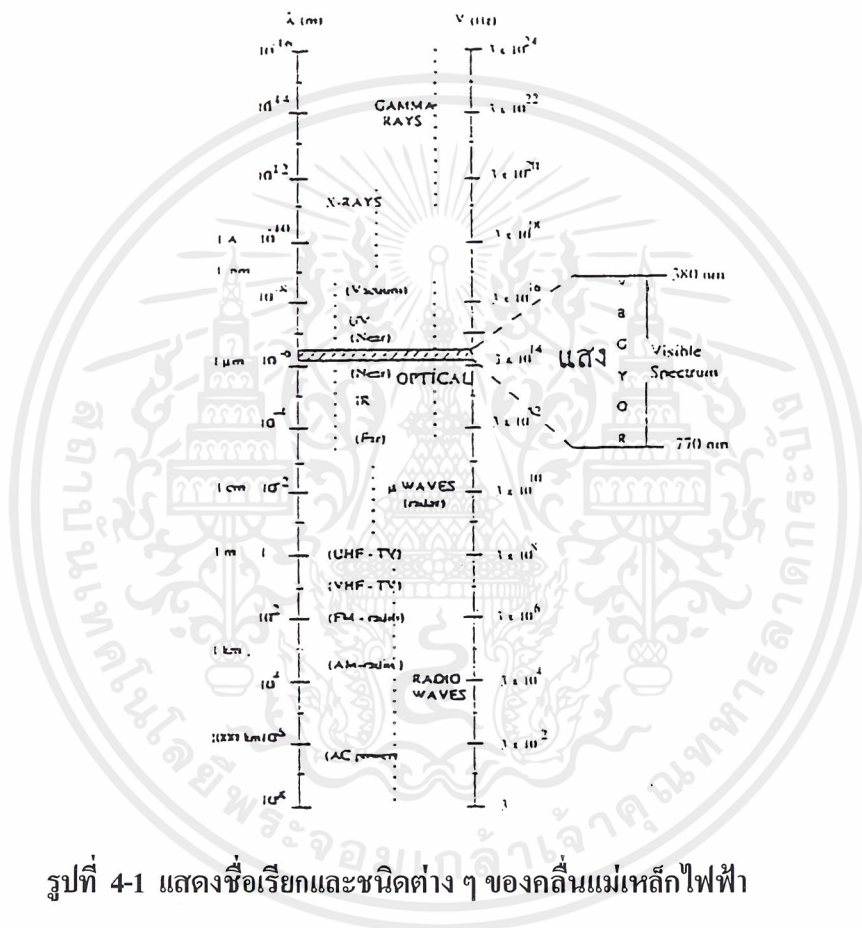
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ระบบออปโตอิเล็กทรอนิกส์

4.1 แหล่งกำเนิดแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ที่ตามนุษย์มองเห็นได้ (Visible Light) จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น $0.4 \mu\text{m} - 0.7 \mu\text{m}$ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไปตามช่วงความยาวคลื่นและช่วงความถี่ ดังแสดงในรูป 4.1



รูปที่ 4-1 แสดงชื่อเรียกและชนิดต่าง ๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

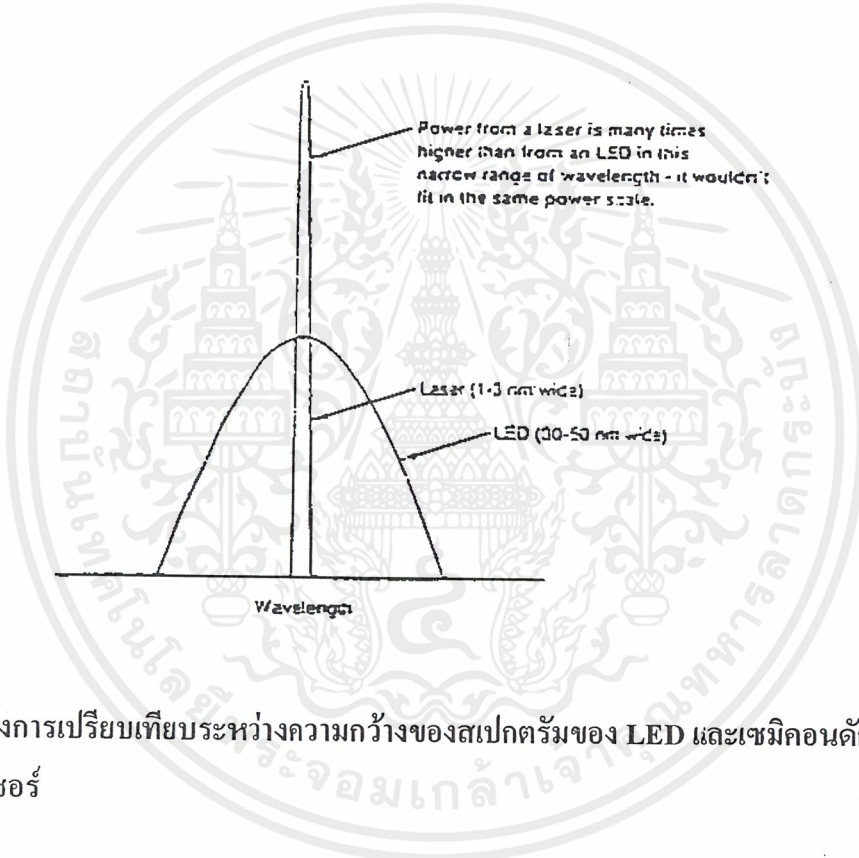
การเลือกช่วงของแสงจากแหล่งกำเนิดสำหรับเส้นใยนำแสงนั้นแสงจะต้องมีความยาวคลื่นที่ทำให้ประสิทธิภาพในการส่งเส้นใยนำแสงมากที่สุด ตามปกติจะใช้กันในช่วง 850 , 1300 หรือ 1550 นาโนเมตร สำหรับเส้นใยนำแสงแบบแก้ว ช่วงของความยาวคลื่นนี้สำคัญมากเนื่องจากช่วงความกว้างของมันมากก็จะเกิดปัญหาการ फैนและการกระจายของสัญญาณ แหล่งกำเนิดแสงจะต้องสามารถให้พลังงานที่พอเพียงที่จะสามารถส่งสัญญาณผ่านเข้าไปในเส้นใยนำแสงได้ และไม่มีผลต่อการ फैนของสัญญาณที่เครื่องรับด้วย แหล่งกำเนิดแสงส่วนมากที่ใช้ในระบบการสื่อสารทางแสงนี้ จะเป็นอุปกรณ์ประเภทสารกึ่งตัวนำ คือ Light Emitter Diode หรือ LED และ เซมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนดักเตอร์เลเซอร์ และบ่อยครั้งจะได้ยินว่า เลเซอร์ไดโอด (Laser Diode, LD) อุปกรณ์พวกนี้ส่วนมากจะเป็นมาตรฐานที่ใช้ควบคู่กับวงจรที่ใช้ในการสื่อสารระบบนี้ด้วย

4.1.1 ช่วงทำงานของความยาวคลื่น (Operating Wavelength)

แหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่นมีผลทั้งต่อการลดทอนของสัญญาณและการกระจายของสัญญาณในการส่งผ่านเส้นใยนำแสง ปกติจะใช้ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 750 – 850 , 1300 และ 1500 นาโนเมตร ในเส้นใยนำแสงชนิดซิลิคอน และประมาณ 660 ในเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก ความกว้างของช่วงสเปกตรัมหรือช่วงความยาวที่ส่งนี้ สำหรับแหล่งกำเนิดที่เป็น LED และแหล่งกำเนิดเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์จะมีความแตกต่างกันตามรูปที่ 4.2

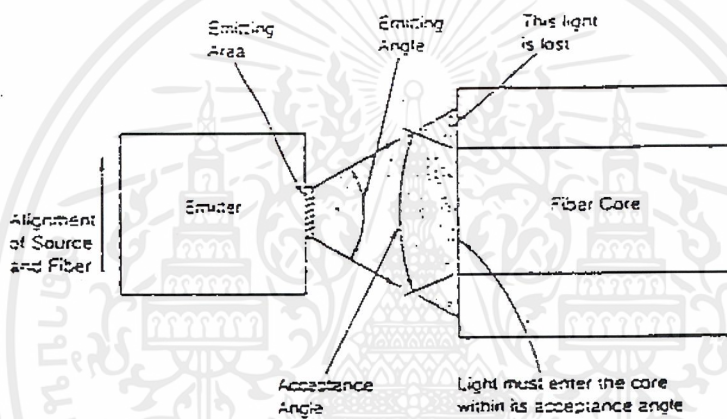


รูปที่ 4-2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างความกว้างของสเปกตรัมของ LED และเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์

ความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยออกมาและช่วงความกว้างของสเปกตรัม ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของส่วนประกอบ ความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยออกมาขึ้นอยู่กับสารกึ่งตัวนำที่นำมาทำแหล่งกำเนิดแสง ส่วนช่วงสเปกตรัมขึ้นอยู่กับโครงสร้างของอุปกรณ์ แหล่งกำเนิดที่เป็นเลเซอร์และ LED นั้นทำมาจากสารกึ่งตัวนำเหมือนกัน แต่ LED จะมีความกว้างของช่วงสเปกตรัมมากกว่า ซึ่งถ้าเป็นเลเซอร์ 2 อันที่มีโครงสร้างเหมือนกันแต่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน ช่วงสเปกตรัมก็จะแคบคล้ายกันแต่มีความยาวคลื่นต่างกัน

4.1.2 พลังงานและการเชื่อมต่อของแสง (Output Power and Light Coupling)

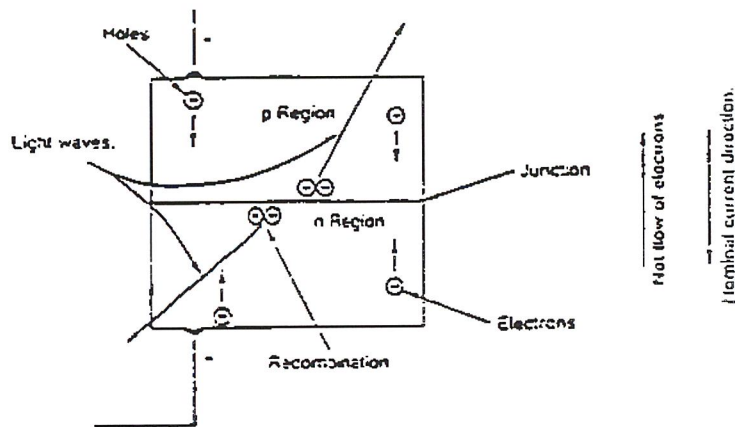
พลังงานที่ใช้ในการสื่อสารทางแสงนี้ แหล่งกำเนิดแสงต้องมีพลังงานที่สอดคล้องกับเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ ซึ่งโดยปกติจะใช้พลังงานอยู่ในช่วงที่มากกว่า 100 มิลลิวัตต์ สำหรับแหล่งกำเนิดที่เป็นเลเซอร์ และ 100 ไมโครวัตต์สำหรับแหล่งกำเนิดแสงที่เป็น LED พลังงานเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับมุมของแสงที่ปล่อยออกจากแหล่งกำเนิด ขนาดของพื้นที่หน้าตัดของช่องปล่อยแสง การจัดเรียงของแหล่งกำเนิดกับเส้นใยนำแสง และลักษณะการรับแสงของเส้นใยนำแสง ดังรูปที่ 4.3 ความเข้มของแสงที่ปล่อยออกมาจะไม่สม่ำเสมอ โดยมุมที่แสงถูกปล่อยออกมาแต่ละแสงจะมีความเข้มมากตรงตำแหน่งศูนย์กลางการปล่อยปกติ เซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์จะไม่มีกระจายของแสงที่มุมประมาณ $10 - 20^\circ$ และ แสงจาก LED จะกระจายแสงด้วยมุมที่ใหญ่กว่ามุมของเลเซอร์



รูปที่ 4-3 แสดงการส่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงสู่เส้นใยนำแสง

4.1.3 แหล่งกำเนิดแสงของ LED (Light – Emission Diode Source)

LED เป็นแหล่งกำเนิดแสงในช่วงที่ตาไม่สามารถมองเห็นได้อยู่ในช่วงของแสงอินฟราเรด (Infrared Light) โดยปกติแหล่งกำเนิดนี้จะใช้ในการสื่อสารระยะสั้น ๆ แนวคิดพื้นฐานของการปล่อยแสงของ LED นี้แสดงดังรูปที่ 4.4 ถ้ามีแรงดันไฟอย่างอ่อนดกคร่อมในรอบต่อ เนื่องจากไดโอดทำขึ้นจากพื้นที่ 2 บริเวณ แต่ละบริเวณมีการเจือสารไม่บริสุทธิ์ (Impurities) ทำให้มีลักษณะความต้องการทางไฟฟ้าต่างกัน บริเวณด้าน P จะถูกเจือด้วยสารเจือไม่บริสุทธิ์น้อยกว่า อะตอมของสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดโฮล (Hole) บริเวณด้าน N จะถูกเจือด้วยสารเจือไม่บริสุทธิ์ ซึ่งจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระขึ้น (Free Electron) ดังนั้นจึงมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่มากมายในโครงสร้างผลึก ถ้าใส่แรงดันไฟบวกให้กับด้าน P และใส่แรงดันไฟลบที่ด้าน N มีผลทำให้อิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่มารวมตัวกันตรงรอยต่อของทั้ง 2 บริเวณ ถ้าให้แรงดันไฟอย่างต่อเนื่องอิเล็กตรอนก็จะเคลื่อนที่ผ่านไปเป็นไดโอดและเกิดการรวมตัวกันอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 4-4 แสดงลักษณะการทำงานของ LED

สารกึ่งตัวนำหลายชนิดไม่จำเป็นต้องเป็นซิลิคอนและเจอร์มาเนียมเพราะการปล่อยพลังงานความร้อนซึ่งเกิดจากการสั้นในโครงผลึก ซึ่งในสารที่นำมาทำเป็น LED นี้การรวมตัวกันของพาหะจะทำให้เกิดโฟตอนของแสงขึ้น ซึ่งเกิดจากการปล่อยมาจากสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญที่สุด คือ แกลเลียมอะเซไนด์ (Gallium Arsenide) และธาตุอื่น ๆ ในหมู่ที่ 3a และ 5a ในตารางธาตุ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

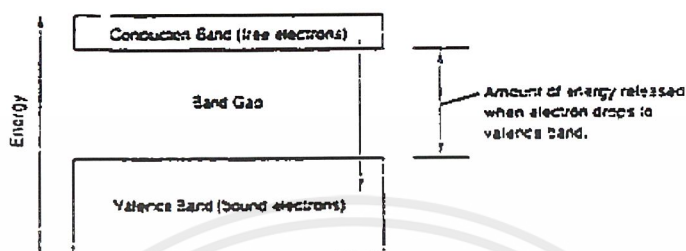
ตารางที่ 4-1 แสดงธาตุหมู่ที่ 3a และ 5a ที่มีความสำคัญ

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

ช่วงความยาวคลื่นที่ถูกปล่อยออกมานั้นขึ้นอยู่กับระดับพลังงานภายในของสารกึ่งตัวนำ ถ้าเป็นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิต่ำ อิเล็กตรอนทั้งหมดจะมีพันธะอยู่ภายในโครงสร้างผลึก ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น อิเล็กตรอนบางตัวจะแตกจากพันธะแล้วกระโดดสู่ระดับพลังงานที่สูงกว่า เรียกว่า ระดับคอนดักชัน (Conduction Level) ทำให้พวกมันสามารถที่จะเคลื่อนที่อย่างอิสระในโครงสร้างผลึกนั้น แถบพลังงานชั้นวาเลนซ์ (Valence Band) และแถบพลังงานคอนดักชัน (Conduction Band) จะแยกกันอยู่โดยมีระดับพลังงานที่แบ่งกันเอาไว้ เรียกว่า แถบพลังงานห้าม (Band Gap) ซึ่งจะเป็นตัวบอกคุณลักษณะหลายอย่างของสารกึ่งตัวนำ

แถบพลังงานคอนดักชันจะมีอิเล็กตรอนอิสระหลังจากเกิดโฮลที่แถบพลังงานวาเลนซ์ ซึ่งมันจะถูกพิจารณาว่าเป็นประจุบวก โฮลนี้สามารถเคลื่อนที่ได้โดยอิเล็กตรอนจากตำแหน่งอื่น ๆ ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างผลึกจะเคลื่อนที่มารวมตัวกับโฮล และแตกเป็นโฮลตามเดิมอีกครั้ง สารเจือไม่บริสุทธิ์ของสารกึ่งตัวนำจะเป็นตัวกำเนิดอิเล็กตรอนและโฮล เมื่ออิเล็กตรอนตกจากแถบพลังงานคอนดักชันลงสู่แถบพลังงานวาเลนซ์จะเกิดการปล่อยพลังงานที่มีค่าเท่ากับความแตกต่างของพลังงานของทั้งสองระดับ ดังรูปที่ 4.5



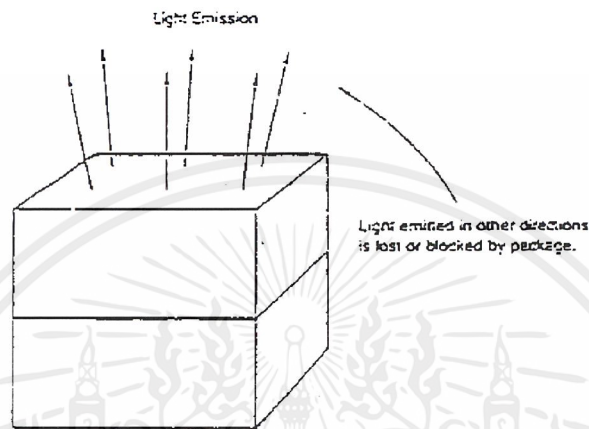
รูปที่ 4-5 แสดงระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

ความแตกต่างของระดับพลังงานทั้งสองหรือแถบพลังงานหวงห้ามซึ่งทำให้เกิดจำนวนพลังงานที่คายออกมาและความยาวคลื่นที่ถูกปล่อยซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารกึ่งตัวนำนั้นตามปกติแล้วจะใช้ LED ในเส้นใยนำแสงแบบพลาสติกซึ่งทำจากแกดเลียมอะลูมิเนียมอะเซไนด์ (Gallium aluminum arsenide) หรือแกดเลียมอะเซไนด์ (Gallium arsenide) LED แบบแกดเลียมอะเซไนด์จะให้แสงอยู่ในช่วง 930 นาโนเมตร ถ้าเพิ่มอะลูมิเนียมเข้าไปจะเกิดการลดลงของค่าขีดเริ่ม (threshold current) ซึ่งทำให้มีช่วงชีวิตดีขึ้นและสามารถเพิ่มพลังงานในแถบพลังงานหวงห้ามทำให้แสงที่ปล่อยออกมาอยู่ในช่วง 750 – 900 นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่ใช้งานอยู่ที่ 820 – 850 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิห้อง

สารประกอบสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ๆ ก็สามารถนำมาใช้ทำ LED ได้ซึ่งจะมีช่วงความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมาแตกต่างกันออกไป เช่น แกดเลียมอะเซไนด์ฟอสไฟด์ (Gallium Arsenide Phosphide) ให้แสงในช่วง 665 นาโนเมตร เป็นแสงสีแดง แต่จะไม่ดีเท่าแกดเลียมอะลูมิเนียมอะเซไนด์ (GaAlAs) และ GaAsP มีราคาถูกกว่า GaAlAs แต่มีคุณภาพในการทำงานต่ำกว่าสารประกอบสารกึ่งตัวนำที่สำคัญมีคุณภาพสูงคือ อินเดียมแกดเลียมอะเซไนด์ฟอสไฟด์ (InGaAsP) ทำจากอินเดียมแกดเลียมอะเซไนด์และฟอสฟอรัสรวมกันด้วยจำนวนของอินเดียม (Indium) อย่างเท่าๆกัน และเติมอะเซไนด์กับฟอสฟอรัสลงไปด้วย ผลของสารประกอบนี้คือเขียนได้เป็น $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ เมื่อ x เป็นสัดส่วนของอินเดียม และ y เป็นสัดส่วนของอาร์เซนิค ซึ่งพวกนี้จะถูกเรียกว่า ควอเตอร์นารี (quaternary) เป็นพวกที่มี 4 สารประกอบพวกนี้ทำยากกว่า เทอร์นารี (ternary) พวก 3 สารประกอบคือ GaAlAs ซึ่งให้ความยาวคลื่น 1300 และ 1550 nm LED บ่อยครั้งใช้ในระยะสั้นๆโดยใช้ความยาวคลื่น 1300 nm เพื่อความสะดวกและการแตกกระจายของสีน้อย แต่ 1550 nm นั้นความแตกกระจายมีมากกว่า

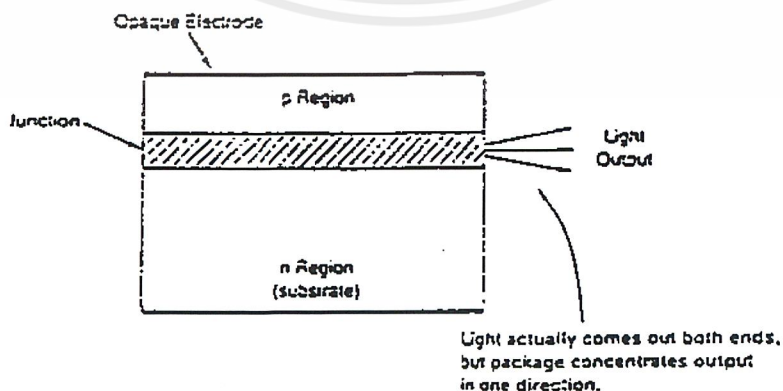
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 4-6 แสดงลักษณะการส่องแสงของ LED

โครงสร้างพื้นฐานที่แตกต่างกันคือไดโอดที่เปล่งแสงทางขอบ (edge emitter diode) ดังแสดงในรูป 4.7 บริเวณที่สัมผัสกับคุณสมบัติของไฟฟ้าจะครอบคลุมทั้งด้านบนสุดและล่างสุดของขอบอิมิตเตอร์ ดังนั้นแสงจึงไม่สามารถออกมาได้ LED จะจำกัดแสงให้อยู่ในแนวแคบในระนาบของรอยต่อ p/n ซึ่ง LED ที่สร้างขึ้นนี้จะถูกล้อมรอบด้วยบริเวณที่มีดัชนีหักเหต่ำกว่า โดยการสร้างท่อนำคลื่น (waveguide) ซึ่งมีหน้าที่เหมือนกันกับเส้นใยแสงและทำการปล่อยแสงออกจากปลายทั้งสองซึ่งสามารถที่จะต่อเชื่อมเข้าไปในเส้นใยแสง ข้อเสียคือเมื่อปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้ LED เสื่อมหาย



รูปที่ 4-7 แสดงการปล่อยแสงของ LED แบบ edge-emittor diode

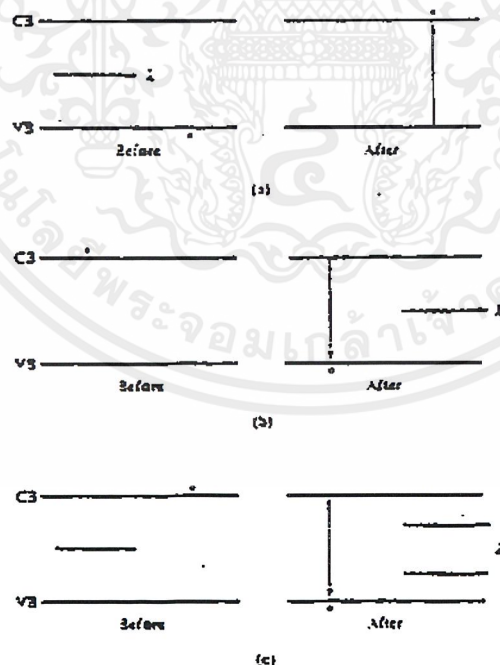
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 แหล่งกำเนิดเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ (Semiconductor Laser Sources)

ถึงแม้ว่าเซมิคอนดักเตอร์จะมีพื้นที่ในการปล่อยแสงเหมือน LED แต่จะให้แสงในช่วงที่ต่างกัน ซึ่งจะมีผลต่อพลังงานที่ดีกว่าและทิศทางที่แน่นอนกว่า

4.1.4.1 การปล่อยแสงด้วยการกระตุ้น (Stimulated Emission)

แสงจะถูกปล่อยออกมาเมื่อมีอิเล็กตรอนอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าตกลงสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่าซึ่งจะให้พลังงานออกมา โดยจะปลดปล่อยแสงที่มีอิทธิพลจากภายนอกซึ่งเรียกว่า การปล่อยแสงตามธรรมชาติ (spontaneous emission) แต่ก็จะเป็นเพียงชั่วขณะเท่านั้น ถ้าเราใช้เวลารอบๆการเกิดแสงอย่างการปล่อยแสงตามธรรมชาตินี้โดยสมมุติว่ามีอิเล็กตรอนอยู่ที่ระดับพลังงานบนซึ่งพร้อมที่จะปลดปล่อยพลังงานอยู่แล้วและใส่พลังงานโฟตอนเข้าไป ซึ่งจะเป็นจำนวนของพลังงานที่อิเล็กตรอนต้องการที่จะปลดปล่อย โฟตอนภายนอกนี้สามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานชั้นบนสู่ระดับพลังงานชั้นล่างและคายพลังงานออกมาเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นเดิมได้ กระบวนการนี้เรียกว่า การขยายแสงด้วยการกระตุ้น (Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation) หรือเรียกย่อๆว่า LASER ซึ่งแสดงได้ตามไคอะแกรมของการปล่อยแสงแบบต่างๆ ในรูปที่ 4.8



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4.2 Population Inversion

เงื่อนไขพิเศษที่ต้องสนใจของการเกิดเลเซอร์ คือ มีจำนวนอิเล็กตรอนหรืออะตอมหรือโมเลกุลอยู่มากในชั้นระดับพลังงานด้านบนมากกว่าชั้นระดับพลังงานด้านล่าง เงื่อนไขนี้เรียกว่า population inversion เนื่องจากตามปกติอิเล็กตรอนมากมายอยู่ในชั้นล่างอยู่แล้ว สิ่งนี้เป็นสิ่งจำเป็นเนื่องจากอะไรก็ตามที่อยู่ในระดับพลังงานชั้นล่างนั้นสามารถดูดกลืนแสงที่ถูกปล่อยออกมาได้ โดยจะมีการดูดกลืนแสงมากกว่าการปล่อยแสง ถ้ามีเงื่อนไขนี้เกิดขึ้น การกระตุ้นให้เกิดการปล่อยแสงก็จะหยุดลงในทุกทิศทาง

4.1.4.3 การจัดรูปของลำเลเซอร์ (Laser Beam Formation)

ลำแสงเลเซอร์ถูกจัดรูปแบบโดยอุปกรณ์สำหรับเพิ่มค่าเรโซแนนซ์ (resonator) ซึ่งเป็นตัวจำกัดขอบเขตของแสงและทำให้ผ่านมาอีกครั้งในตัวกลางที่ถูกกระตุ้น ดังรูปที่ 4.9 สำหรับเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ เรโซเนเตอร์นี้สามารถทำได้จากส่วนของกระจกที่ขอบแต่ละด้านของบริเวณที่อะตอมถูกกระตุ้นนั้นอยู่ แสงที่ถูกปล่อยออกมาจะเคลื่อนไปข้างหน้าตรงไปกระจกด้านหนึ่งแล้วจะสะท้อนกลับและเป็นอย่างนี้ต่อไปแสงที่ถูกกระตุ้นให้ปล่อยอิเล็กตรอนจะรวมกันเข้ากับแสงที่ผ่านระนาบของรอยต่อ แสงที่ถูกปล่อยในทิศทางอื่นๆจะรั่วไหลออกไป ดังนั้นแสงที่มีการเดินทางกลับมาตลอดทางแคบๆ ของบริเวณที่ถูกกระตุ้นจะขยายและสร้างขึ้นเป็นลำแสงเลเซอร์



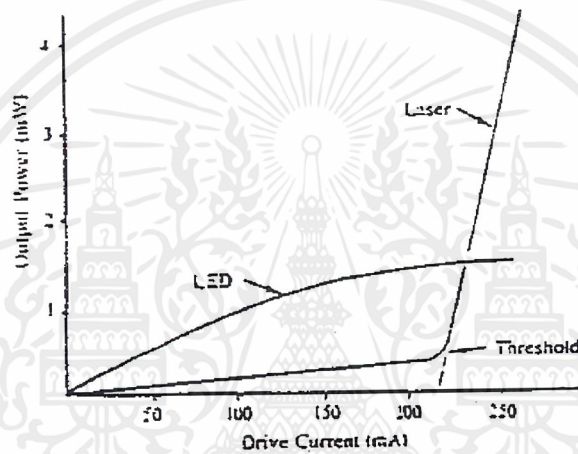
รูปที่ 4-9 แสดงพื้นฐานการเกิดเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์

ส่วนปิดกั้นที่เห็นแสดงออกอยู่นั้นเป็นกระบวนการที่ยุ่ยากเล็กน้อยกระจกจะอยู่ส่วนขอบล่างของโครงสร้างผนังของสารกึ่งตัวนำที่เรียกว่าแฟลคเค็ต (facets) ซึ่งแฟลคเค็ตตอนท้ายจะทำให้แสงทะลุออกมาแต่จะควบคุมการสะท้อนของแสงส่วนใหญ่ ในทางปฏิบัติแฟลคเค็ตที่อยู่ด้านหน้าจะไม่ทำให้แสงออกมาแต่จะทำให้แสงสะท้อนไปมาในสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำเป็นสารที่ถูกกระตุ้นให้ปล่อยแสงมาก ดังนั้นที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นจึงจำเป็นต่อการสร้างลำแสงเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 ความแตกต่างของแหล่งกำเนิด (Functional Differences)

สิ่งที่แตกต่างกันระหว่าง LED กับเลเซอร์ไดโอดนั้นมีอยู่สองประการคือ ถ้าเป็น LED นั้นจะไม่มีตัวเรโซเนเตอร์ แต่ก็สามารถสร้างให้มีขนาดเล็กได้และเลเซอร์นั้นต้องทำเป็นแรงขับเคลื่อนสูงเพื่อที่จะได้ความหนาแน่นของเลเซอร์มาก เอาท์พุทของเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ขึ้นอยู่กับแรงขับเคลื่อนที่ผ่านทะลุตัวมันโดยต้องมีแรงดันไบอัสที่มีค่าแรงขับเคลื่อนอย่างน้อยตามต้องการและยาวนาน ที่ค่ากระแสต่ำๆเลเซอร์ที่ถูกปล่อยออกมาจะอ่อนเหมือนการปล่อยแสงตามธรรมชาติ (spontaneous emission) ซึ่งมีประสิทธิภาพเหมือนกับ LED ถ้ากระแสที่ให้ผ่านค่าขีดเริ่มไปแล้วนั้นก็จะเป็นลำแสงเลเซอร์ และเพิ่มความเข้มขึ้นเรื่อยๆ ดังรูป 4.10



รูปที่ 4-10 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสขับกับกำลังของแสงที่ปล่อย

$$P = N \cdot hc / \lambda = (\eta \cdot E_g \cdot I) / e \quad 4.1$$

- เมื่อ N คือ จำนวนของการประจุต่อวินาที
 η คือ อัตราส่วนการแพร่กระจายประจุที่ถูกรวมตัว
 E_g คือ พลังงานแถบหวงห้ามของสารในหน่วยของจูล

ความแตกต่างในโครงสร้างนี้เป็นส่วนสำคัญ เลเซอร์นั้นสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า LED ธรรมดาและให้กระแสขับที่สูงด้วยดังนั้นเลเซอร์จึงมีกำลังงานมากกว่า LED ความเข้มของแสงที่ปล่อยออกมานั้นจะเป็นค่าแคบกว่าแสงจาก LED ซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 4.1 ที่กล่าวมาแล้ว

4.1.6 ความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอด

แสงเลเซอร์ของเลเซอร์ไดโอดนั้นขึ้นอยู่กับสิ่งประกอบขึ้นของชั้นรอยต่อของสารกึ่งตัวนำเหมือนกับ LED สารประกอบของสารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่ที่นำมาทำเป็นแหล่งกำเนิดแสงสำหรับเส้นใยแก้วนำแสงจะใช้สารประกอบสารกึ่งตัวนำหมู่ที่ 3 รวมกับหมู่ที่ 5 เช่น แกลเลียมอะเซไนด์ (Gallium Arsenide) หรืออินเดียมฟอสไฟด์ (Indium Phosphide) โดย

- | | |
|--|--------------------------------|
| 1. $\text{Ga}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{As}$ บน GaAs | ความยาวคลื่น 780 nm 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 ถึงอย่างไรก็ดีขนาดของแถบสเปกตรัมที่มีขนาด 1-3 nm ก็ใหญ่เพียงพอที่จะทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการแตกกระจายของสัญญาณสเปกตรัมของเลเซอร์ไดโอด ถึงแม้ว่าจะมีความเข้มของกำลังงานมากที่สุดที่ความยาวคลื่นหนึ่งก็ตาม แต่ในเลเซอร์ไดโอดการเกิดเลเซอร์ออสซิลเลชัน (Laser Oscillation) ที่ต่อเนื่องกันทำให้อัตราการขยายซึ่งมีผลต่อการเกิดความยาวคลื่นอื่นๆด้วย แต่ความยาวคลื่นเดียวเท่านั้นที่มีอัตราขยายสูงสุดระหว่างระยะทางของตัวเรโซเนเตอร์ที่กำเนิดเลเซอร์โดยความยาวคลื่นหาได้จาก

$$2D = N\lambda \quad 4.2$$

เมื่อ 2D คือ ระยะไปกลับระหว่างเรโซเนเตอร์ในหนึ่งรอบ

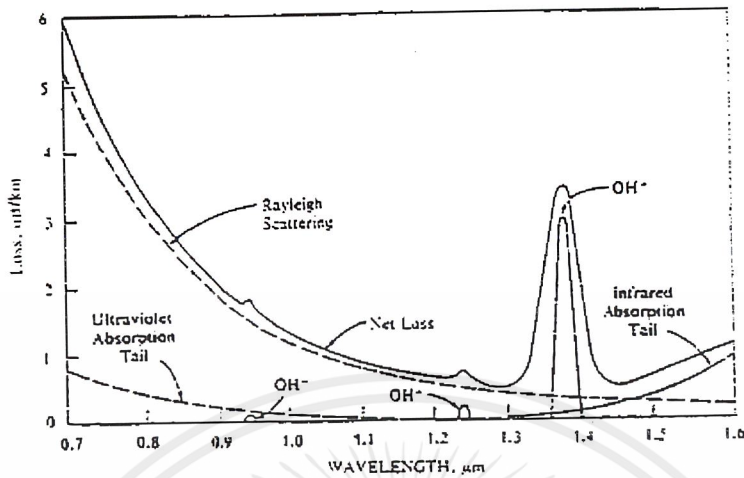
N คือ จำนวนเต็ม

โดยความยาวคลื่นนั้นต้องอยู่ในขอบเขตของความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่เกิดจากการปล่อยโดยการกระตุ้น

4.1.8 Fiber Transmission Windows

ทั้งแหล่งกำเนิดที่เป็น LED และเลเซอร์ไดโอดจะมีลักษณะการส่งผ่านเหมือนกันถึงแม้ว่าจำนวนค่านิวเมอริคัล (numerical value) จะต่างกัน คุณลักษณะเด่นของการปล่อยแสงนั้นจะต้องเข้ากันได้กับช่องการปล่อยให้ผ่านของเส้นใยนำแสง (Fiber Transmission Windows) ซึ่งตามปกติจะมีค่า

อยู่ที่ 0.85 , 1.3 และ 1.5 ไมโครเมตร โดยแสดงไว้ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียในเส้นใยนำแสงน้อย วัสดุที่ใช้ทำแหล่งกำเนิดนั้นสามารถทำให้มีพฤติกรรมตามช่องทางนี้ได้



รูปที่ 4-11 Fiber Transmission Windows

อัตราส่วนของการโต้ป็นสารที่เป็นวัสดุที่ใช้ทำเลเซอร์ไดโอด จะสามารถหาช่องว่างแถบพลังงาน (band gap) ของสารผลสมนั้นได้ ซึ่งจะทำได้ความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมาด้วยสมการด้านล่างนี้ใช้ในการหาความคลื่นที่ปล่อยออกมาเมื่อทราบค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารผลสมนั้น

$$\lambda (\mu\text{m}) = 1.24 / E_g (\text{eV}) \quad 4.3$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นที่ต้องการหา

E_g คือ ช่องว่างแถบพลังงานในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์

4.2 วงจรขับ

เป็นส่วนที่ในการมอดดูเลทสัญญาณข้อมูลที่ต้องการส่งเข้าไปในเส้นใยนำแสงเข้ากับแสงโดยใช้ความเข้มของกระแสเป็นตัวกำหนดความเข้มของแสงที่จะปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดที่ใช้แล้วส่งเข้าไปในเส้นใยนำแสงเรียกว่าอินเทินซิติมอดดูเลชัน (Intensity Modulation) โดยความยาวคลื่นของสัญญาณแสงจะมีค่าสั้นกว่า (ความถี่มากกว่า) ความยาวคลื่นของสัญญาณไฟฟ้ามากดังนั้นความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า จึงเป็นตัวที่ทำหน้าที่เป็นเอ็นเวลลอปของสัญญาณแสงที่ออกมา

4.2.1 การออกแบบตัวส่งแสง (Transmitter design)

แหล่งกำเนิดแสงเป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบโดยตัวส่งแสงจะต้องสอดคล้องกับประเภทของแหล่งกำเนิดแสงด้วย และสอดคล้องกับประเภทของสัญญาณที่ส่งด้วยว่าเป็นอนาลอกหรือดิจิตอล โดยการออกแบบจะต้องมีตัวเรือน ซึ่งถือว่าเป็นส่วนที่ต้องการเพื่อช่วยป้องกันแหล่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

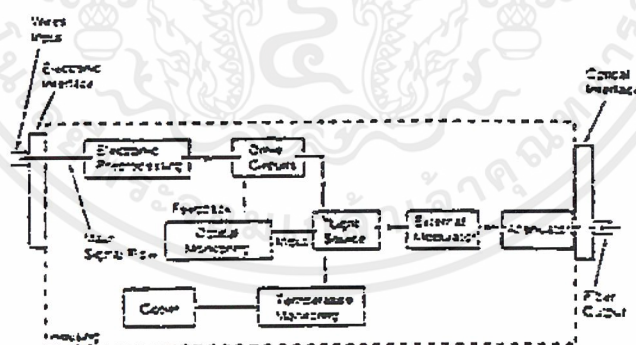
กำเนิดไม่ให้เกิดความเสียหายและช่วยในการสร้างสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์และช่วยในการส่งแสงผ่านเส้นใยนำแสง โดยส่วนประกอบภายในจะต้องเป็นส่วนช่วยในการต่อแสงเชื่อมกับเส้นใยนำแสงและยังต้องการวงจรขับเพื่อขับกระแสและการควบคุมอุณหภูมิ

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

โดยบางครั้งอาจจะมีอุปกรณ์ส่วนอื่นๆเข้ามาเกี่ยวข้องกับตัว เช่น External modulator ในกรณีนี้ที่แหล่งกำเนิดไม่สามารถมอดูเลตแสงได้เอง หรือส่วนของการลดทอนสัญญาณในกรณีที่มีการติดต่อสื่อสารในระบบสั้นๆ



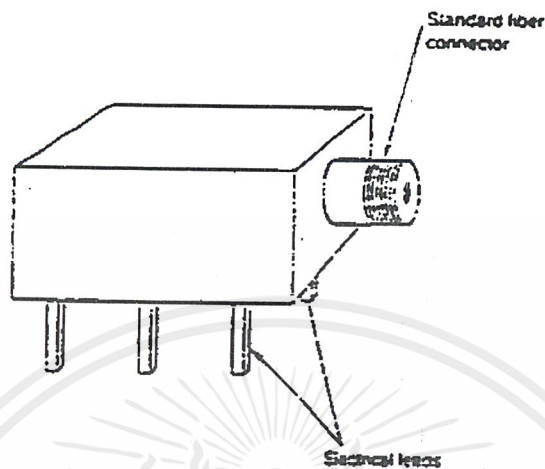
รูปที่ 4-12 แสดงส่วนประกอบในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสง

1. ตัวเรือน (housing) ตัวเรือนนี้จะมีรูปแบบอย่างง่ายๆ โดยจะออกแบบเป็นกล่องสี่เหลี่ยมเพื่อความสะดวกซึ่งจะมีหัวต่อสองส่วนคือ ส่วนเชื่อมต่อทางแสงและส่วนเชื่อมต่อทางอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งส่วนใหญ่จะออกแบบเป็นมาตรฐาน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 4-13 แสดงส่วนเชื่อมต่อทางแสงของตัวส่ง

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

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

Thermoelectric cooler ในตัวส่งแสงสามารถทำให้การทำงานมีความแน่นอนที่อุณหภูมิคงที่ การควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์สามารถลดความไม่ดีของกำลังเอาต์พุตอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ จะทำให้กำลังเอาต์พุตที่คงที่เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการทำงานของอุปกรณ์รับแสง ขณะที่กำลังเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้ลดลงอัตราบิตคลาดเคลื่อน (bit-error rate) เพิ่มขึ้นในระบบดิจิทัล และ s/n ratio ลดลงในระบบอนาล็อก จะทำให้ระบบการทำงานของอุปกรณ์กำเนิดแสงลดลงและขั้นตอนนี้จะทำให้ความยาวคลื่นแสงคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง กระแสขีดเริ่มมีค่าคงที่ (threshold current)

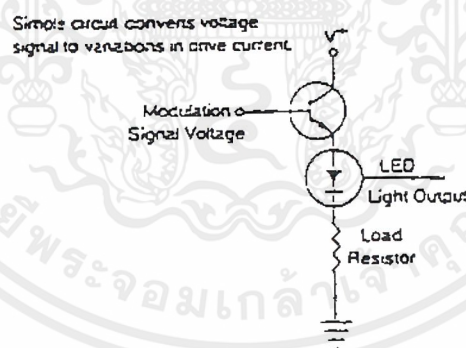
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

7. ส่วนของมอนิเตอร์ทางแสง (Optical monitoring) ตัวส่งแสงชนิดเลเซอร์ประกอบด้วยวงจรเอาต์พุตที่มีเสถียรภาพ โฟโอดีเทคเตอร์จะตรวจจับแสงที่แผ่ออกจากส่วนหน้าของเลเซอร์และขับวงจรการป้อนกลับ (Feedback circuit) ซึ่งจะปรับกระแสขับจนกำลังเอาต์พุตทั้งหมดคงที่ นอกจากนี้วงจรลดทอนสัญญาณ (Attenuator) ตัวส่งแสงจะสร้างระดับกำลังที่เป็นมาตรฐาน แต่ในบางกรณีระดับกำลังเหล่านี้อาจจะสูงกว่าที่ต้องการเนื่องจากตัวรับแสงสามารถรับกำลังเอาต์พุตได้จำกัด ในบางครั้งจะใช้ตัวลดทอนสัญญาณเพื่อที่จะลดกำลังเอาต์พุตของตัวส่งแสงให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยสำหรับตัวรับแสง

4.2.3 การออกแบบตัวส่งโดยใช้ LED อย่างง่าย

LED เป็นแหล่งกำเนิดที่จะเปล่งแสงเมื่อทำการไบอัสแรงดันซึ่งมีค่าอย่างน้อยสูงกว่าแรงดันในช่องว่างหรือดีพลักชัน โดยมีค่าประมาณ 1.5 โวลต์สำหรับ LED ที่ทำจาก GaAlAs ความยาวคลื่น 800-900 nm และประมาณ 1 โวลต์สำหรับ GaAsP ที่มีความยาวคลื่น 1300 nm วงจรขับสำหรับแหล่งกำเนิด LED แสดงดังรูปที่ 4.14



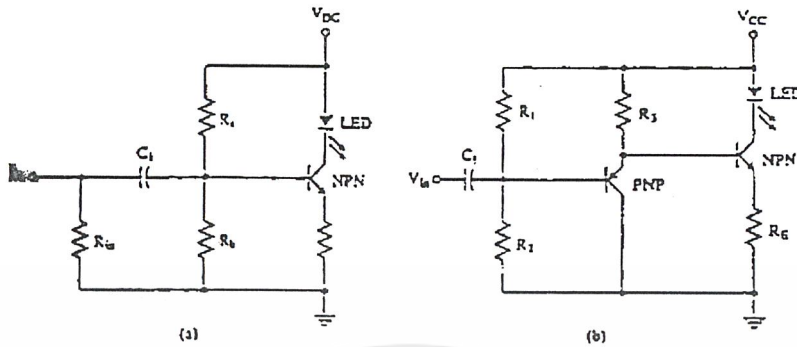
รูปที่ 4-14 แสดงวงจรขับอย่างง่ายสำหรับ LED source

4.2.4 การออกแบบตัวส่งแสงโดยใช้เลเซอร์ไดโอดอย่างง่าย

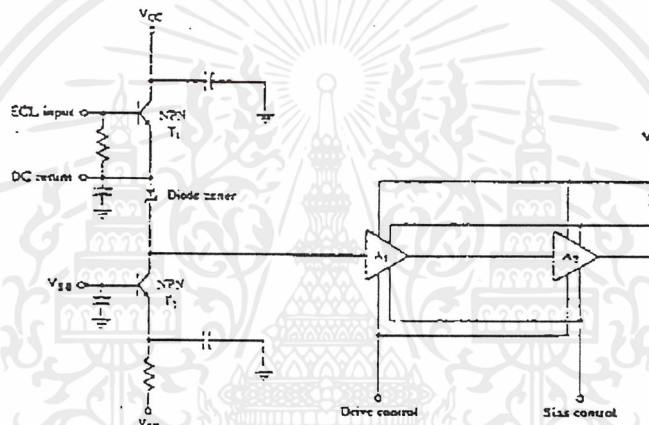
คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์จะเหมือนกับ LED เนื่องจากทั้งคู่เป็นแหล่งกำเนิดแบบใช้สารกึ่งตัวนำทั้งคู่ แต่เลเซอร์จะให้แสงออกมากี่ต่อเมื่อแรงขับกระแสสูงกว่าค่าแรงขับกระแสขีดเริ่ม (threshold current) เนื่องจากต้องการกระแสขับที่มากกว่านั้นตัวต้านทานที่จำกัดกระแสจึงต้องมีค่าน้อย โดยค่าแรงขับกระแสอยู่ในช่วง 100 – 200 mA และแรงเคลื่อนไฟฟ้า 1.6-1.8 V วงจรขับของเลเซอร์ไดโอดในรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 ใช้ในทางดิจิทัล ซึ่งในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 4.16 a ใช้วงจรขับแบบแบ่งกระแส (shunt driver) และทรานซิสเตอร์แบบฟิลด์เอฟเฟ็ท (field effect transistor) โดยค่า R_2 และ C ใช้ในการไปอัสกับทรานซิสเตอร์ โครงสร้างของวงจรนี้สามารถที่จะมอดดูเลทแสงได้มากถึงจิกะ (10^9)



รูปที่ 4-15 แสดงวงจรขับของเลเซอร์ไดโอดแบบอนาลอก



รูปที่ 4-16 แสดงวงจรขับของเลเซอร์ไดโอดแบบดิจิทัล

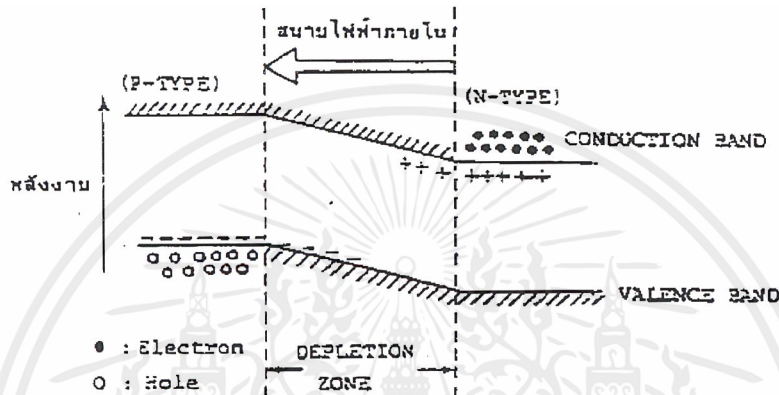
4.3 อุปกรณ์รับแสง

การรับแสงคือการเปลี่ยนแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ในการทำงานนี้สามารถแบ่งได้ 2 วิธี วิธีที่หนึ่งคือการเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่า Photo electric effect โดยใช้กระบวนการดูดพลังงานนั้นคือ เมื่อมีแสงมาตกกระทบสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์แบนด์จะเลื่อนขึ้นไปอยู่ที่แถบคอนดักชันแบนด์ แต่การเลื่อนขึ้นไปนี้เป็นแต่เพียงอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เท่านั้น และในที่สุดจะกลับมารวมกับโฮลอีกครั้งในแถบวาเลนซ์แบนด์ทำให้ไม่ได้รับ photo electric effect ด้วยเหตุนี้เพื่อที่จะเปลี่ยนแสงให้เป็นกระแสไฟฟ้าจะต้องใช้สภาพการแยกกันของอิเล็กตรอนกับโฮลก่อนที่จะมารวมตัวกัน

วิธีที่สองทำได้โดยการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานความร้อนแล้วจึงเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า Sensitive Heat effect โดยทั่วไปจะมีการตอบสนองช้ามากและความ

ไวไม่คืนก็จึงใช้ เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) และโบโรมิเตอร์และอื่นๆ แต่ไม่นำมาใช้ในการสื่อสารด้วยแสง

สำหรับอุปกรณ์รับแสงสารกึ่งตัวนำก็เช่นเดียวกันกับแหล่งกำเนิดแสง นั่นคือเพื่อที่จะแยกอิเล็กตรอนกับโฮลนั้นโดยทั่วไปใช้ PN-junction ซึ่งที่รอยต่อของ P-N นั้นจะเกิดสนามไฟฟ้าในที่ว่างขึ้นโดยมันจะถูกดึงด้วยอิเล็กตรอนของ N-type และ โฮล ของ P-type ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบและบวกตามลำดับ เป็นผลให้ไม่มีอิเล็กตรอน และโฮลขึ้นตรงบริเวณรอยต่อนี้ เรียกว่า Depletion zone ดังในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4-17 แสดงลักษณะของ Depletion zone

อุปกรณ์รับแสงที่ใช้ในการสื่อสารทางแสงส่วนใหญ่จะเป็นพวกโฟโตดิเทคเตอร์ (photodetector) โดยทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานทางแสงเป็นพลังงานทางไฟฟ้า โฟโตดิเทคเตอร์ในอุดมคติจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

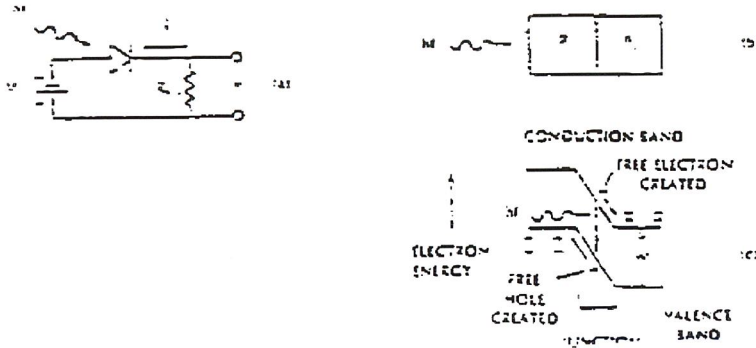
1. จะต้องมี khả năngรับแสงที่เบาบางที่ตกกระทบอุปกรณ์
2. จะต้องสามารถทำงานในช่วงใกล้อินฟราเรด (850 , 1300 , 1500 nm)
3. จะต้องมีความเร็วเพียงพอต่อการเปลี่ยนแสงเป็นอิเล็กตรอน
4. จะต้องมีขนาดเล็กเข้ากับเส้นใยนำแสงได้ดี
5. จะต้องมีราคาต่ำ
6. จะต้องไม่ไวต่อสิ่งแวดล้อม

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

4.3.1 พีเอ็นโฟโตไดโอด (PN Photodiode)

เป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่าโฟโตไดโอดจะทำงานเมื่อมีแรงดันไบอัสให้กับตัวโฟโตไดโอดแบบไบอัสกลับ (reverse bias) ตามรูปที่ 4.18 แสดงลักษณะของPN photodiode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

เมื่อให้แรงดันไฟไบอัสกลับจะกลับทำให้ค่าพลังงานกำแพงศักย์ (energy barrier) ระหว่างรอยต่อพีและเอ็นเพิ่มขึ้นทำให้อิเล็กตรอนอิสระทางด้านเอ็น และโฮลอิสระทางด้านพีไม่สามารถข้ามบริเวณที่เกิดกำแพงศักย์ได้จึงไม่มีกระแสไหล บริเวณรอยต่อที่ไม่มีประจุใดๆ เลยนี้เรียกว่า Depletion zone ตามที่กล่าวมาแล้ว บริเวณความต้านทานสูงเป็นผลให้โวลเตจทั้งหมดที่ตกคร่อมไดโอดจะตกคร่อมบริเวณนี้เกือบทั้งหมด

พิจารณารูปที่ 4.18 (c) เมื่อกลุ่มก้อนโฟตอนถูกดูดกลืนในรอยต่อที่ผ่านด้านพีมาแล้ว การดูดกลืนพลังงานทำให้อิเล็กตรอนข้ามแถบช่องว่างพลังงาน (band gap) จากวาเลนซ์แบนด์ไปยังคอนดักชันแบนด์ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระและทำให้โฮลออกจากวาเลนซ์แบนด์ ดังนั้นจะมีประจุอิสระที่ถูกสร้างขึ้นจากการดูดกลืนโฟตอนซึ่งอิเล็กตรอนจะเคลื่อนตัวลงไปยังกำแพงศักย์และโฮลจะเคลื่อนที่ไปยังกำแพงศักย์ซึ่งเป็นสาเหตุให้กระแสไหลผ่าน วงจรภายนอกเหมือนกับ การปลดปล่อยแสงของอิเล็กตรอน ซึ่งในกรณีนี้จะเกิดกระแสไหลในหลอดโฟโตไดโอดเมื่อโฮลและอิเล็กตรอนรวมตัวกันใหม่ที่บริเวณนั้นจะเกิดกระแสไฟฟ้าน้อยๆ ซึ่งจะทำให้ประจุต่างๆ หลุดเคลื่อนที่ทำให้กระแสหยุดไหล นอกจากนี้ประจุพาหะจะถูกสร้างขึ้นใกล้ Depletion zone และมันสามารถที่จะแพร่ผ่านบริเวณนี้ไปได้ ดังนั้นจะเกิดสนามไฟฟ้าจำนวนมากที่บริเวณรอยต่อทำให้มีกระแสภายนอกเกิดขึ้น

4.3.2 ไฟอีนโฟโตไดโอด (PIN photodiode)

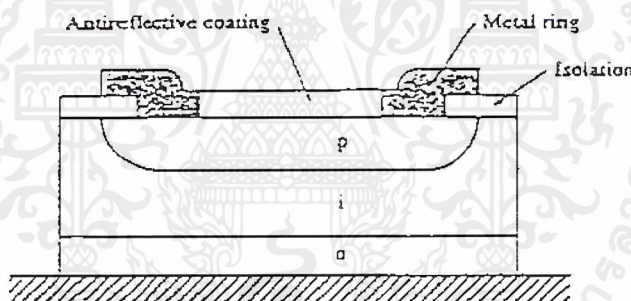
ไฟอีนโฟโตไดโอดเป็นอีกชนิดหนึ่งที่ใช้ชั้นของ depletion-layer เข้ามาใช้ในการทำงาน เรียกเต็มๆว่า positive-intrinsic-negative เป็นที่นิยมใช้มากในระบบสื่อสารในการเป็นดีเทคเตอร์รับแสง ไฟอีนจะมีชั้นอินทรินสิค (intrinsic) อยู่ระหว่างกลางของชั้นที่มีการโด๊ปเป็นพาหะบวกหรือด้านพี และชั้นที่มีการโด๊ปเป็นพาหะลบหรือด้านเอ็นมีโครงสร้างดังรูป 4.19 แสงจะตกกระทบบนด้านพีของโฟโตไดโอด และมีการถูกดูดกลืนแสงโดยอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เข้าไปข้างหน้าเข้าไปยังชั้นอินทรีนติคเลเยอร์ที่ไม่มีประจุอยู่เลย ดังนั้นจึงมีความต้านทานสูงจึงทำให้โวลเตจตกคร่อมไดโอดจะตกคร่อมที่ชั้นนี้เกือบทั้งหมดและมีแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้ามาก โดยระหว่างนั้นต้องมีการไบอัสแรงดันแบบกลับให้กับโฟโตไดโอดด้วย โดยในการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลนั้นจะต้องมีพลังงานอย่างเพียงพอ พลังงานโฟตอนที่ใช้ทำให้เราทราบค่าความยาวคลื่นคัทออฟ (Cutoff wavelength) ไม่อย่างนั้นโฟโตไดโอดจะไม่เปลี่ยนแสงเป็นกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งความยาวคลื่นคัทออฟสามารถหาได้จากแถบพลังงานช่องว่างของสารที่นำมาทำโฟโตไดโอดดังสมการ

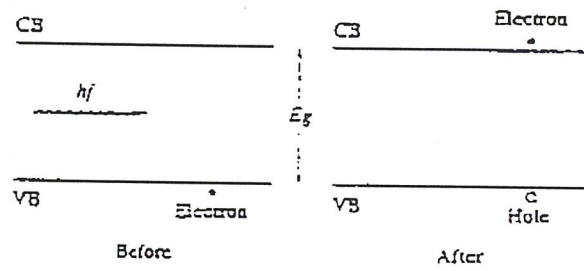
$$\lambda_c = (h \cdot c) / E_g = 1.24 / E_g \quad 4.4$$

- เมื่อ λ_c คือ ความยาวคลื่นที่ทำงาน ในหน่วย ไมโครเมตร
 h คือ ค่าคงที่ของพลังค์
 c คือ ความเร็วแสง
 E_g คือ แถบพลังงานช่องว่างของสารที่นำมาทำโฟโตไดโอด (eV)



รูปที่ 4-19 แสดงโครงสร้างของ PIN photodiode

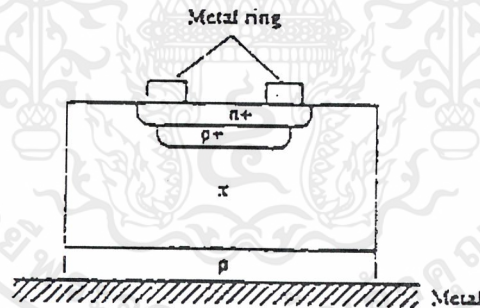
อิเล็กตรอนจะต้องอยู่ในชั้นของคอนดักชันแบนด์ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าหรือกระแสโฟตอน คู่อิเล็กตรอน-โฮลจะถูกแยกโดยค่าสนามไฟฟ้าในชั้นอินทรีนติคเลเยอร์ ความหนาของชั้นอินทรีนติคเลเยอร์ควรจะบางแต่กว้างสำหรับการดูดกลืน (บริเวณที่ทำให้เกิดประจุลบ) ตามรูปที่ 4.20 ความบางเป็นส่วนสำคัญเนื่องจากมันจะอำนวยความสะดวกในการตกกระทบของโฟตอน และสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นมา บริเวณด้านอื่นควรจะแคบมากๆ อิเล็กตรอนจะได้ไม่เคลื่อนที่ออกจากอุปกรณ์ PIN photodiode จะใช้ในการสื่อสารระยะสั้นๆ และมีการมอดูเลทด้วยความถี่ต่ำ เหมาะสำหรับเป็นตัวรับของ LED ซึ่งปกติจะใช้แรงดันไบอัสกลับ 7-10 โวลต์



รูปที่ 4-20 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสง

4.3.3 อะวาลานซ์โฟโตไดโอด (avalanche photodiode)

อุปกรณ์รับแสงจะทำงานเมื่อมีแรงดันไบอัสที่สูงมากตามปกติแล้วจะมากกว่า 300 โวลต์ โดยมีภาคขยายหรือการเพิ่มขึ้นอย่างทวีคูณของกระแสโฟโตที่เกิดขึ้น AVD หรือ อะวาลานซ์โฟโตไดโอดเหมาะสำหรับการสื่อสารที่ใช้ในระยะทางไกลๆ และความถี่ที่มอดูเลตสูง (ประมาณ 100 Mhz) ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้กับแหล่งกำเนิดที่เป็นเลเซอร์ไดโอด ซึ่งโดยปกติจะใช้โครงสร้างที่เรียกว่า reach-through construction APD (RAPD) โดยที่ reach-through avalanche photodiode จะเรียงจากด้านพี (P-type) ซึ่งมี p^+ วางอยู่ และมี n^+ วางอยู่ตามรูปที่ 4.21 โครงสร้างนี้เป็นโครงสร้างแบบ $p^+ \pi p n^+$ ชั้นของ π เลเยอร์นี้เป็นชั้นของอินทรีนลิกเลเยอร์ซึ่งมีการได้ไปเป็นชนิดพีด้วยโบรอนหรือฟอสฟอรัส ลักษณะของ APD เหมือนกับ PN-junction สนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากชั้น depletion region



รูปที่ 4-21 แสดงโครงสร้างของอะวาลานซ์โฟโตไดโอด

แสงที่เข้ามาจะต้องผ่านชั้น p^+ และจะถูกดูดกลืนโดยชั้น π เลเยอร์ โฟตอนจะสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น อิเล็กตรอนจะเลื่อนลอยมาที่รอยต่อพีเอ็นซึ่งมีสนามไฟฟ้าสูง ซึ่งสนามนี้จะไปเร่งให้อิเล็กตรอน-โฮลเร็วขึ้นเป็นผลให้เกิดการชนกับคู่อิเล็กตรอนคู่อื่นๆ ซึ่งการชนนี้จะเกิดขบวนการเพิ่มขึ้นอย่างทวีคูณของพาหะโดยนิยามไว้ว่า

$$M = 1/(1 - V/V_B)^n \quad 4.5$$

เมื่อ V คือ แรงดันไบอัสกลับที่ใส่เข้าไป

V_B คือ แรงดันพังทลาย (breakdown voltage)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

n คือ ค่าคงที่ระหว่าง 3 กับ 6 ซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของสารที่ทำอุปกรณ์รับแสง จำนวนเฉลี่ยของการเกิดอิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดการสร้างโฟตอนต่อหนึ่งหน่วยความยาว เรียกว่า ไอออไนเซชันเรต (ionization rate) บอกถึงความแตกต่างสำหรับอิเล็กตรอนกับโฮล

4.4 คุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง

ประสิทธิภาพของอุปกรณ์รับแสงประเมินได้จากคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ประสิทธิภาพทางควอนตัม (Quantum efficiency) ซึ่งแสดงว่าแสงที่รับมาได้เปลี่ยนเป็นไฟฟ้าได้มากเท่าใด ความไวการรับแสง (ระดับรับแสงต่ำสุดที่ต้องการสำหรับการส่งที่มีคุณภาพ) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการออกแบบระยะเวลาการถ่ายทอดของระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง สัญญาณรบกวน (noise) ที่เกิดขึ้น และความเร็วที่ตอบสนองการทำงาน สำหรับประสิทธิภาพทางควอนตัม กำหนดจากสารและโครงสร้างของอุปกรณ์รับแสง แต่สำหรับความไวการรับแสงนั้นจะเกี่ยวข้องกับขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้

เนื่องจาก APD ใช้ปรากฏการณ์การขยายแบบอะวาแลนซ์ตามที่กล่าวมาแล้วนั้น ดังนั้นจึงมีความไวสูงประมาณ 10-20 dB (10-100 เท่า) เมื่อเทียบกับโฟโตไดโอดธรรมดา สัญญาณรบกวนที่เกิดในอุปกรณ์รับแสงมีสิ่งๆที่เรียกว่า Shot noise ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสโฟโต (photo current) ที่เกิดจากการกระตุ้นอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นระเบียบทางเวลาโดย Shot noise เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Shot noise current} = I_0 M^2{}^+F \quad 4.6$$

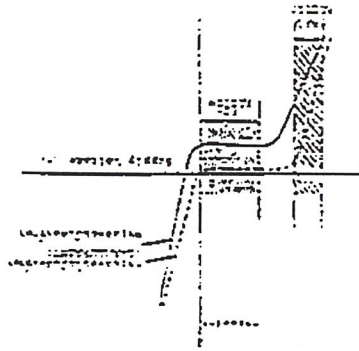
เมื่อ M คือ อัตราการขยายกระแสของอุปกรณ์รับแสง

I_0 คือ กระแสโฟโตในกรณีที่ $M=1$

F คือ Excess noise figure มีค่ามากเมื่อเทียบกับ M

นั่นคือ จากสมการจะเป็นว่าที่ระดับการรับแสงที่เท่ากัน ถ้าหากว่าทำให้แรงดันไบอัสแบบย้อนกลับที่ป้อนให้มีความสูงและทำให้อัตราการขยายกระแสเพิ่มขึ้นนั้นสัญญาณออก(output signal, $I_0 M^2{}^+F$) จะเพิ่มขึ้นมากด้วย แต่ shot noise ก็เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

คุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสงโดยทั่วไปแสดงดังรูป 4.22 จากรูปจะช่วยให้เข้าใจความแตกต่างของบริเวณการทำงานของ APD และ photodiode ได้ดี และในรูปนี้ได้แสดงถึงการไหลของกระแสที่เรียกว่า dark current ที่เกิดในสภาพที่มีแรงดันไบอัสกลับแต่ไม่มีแสงเข้า



รูปที่ 4-22 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้และกระแสไฟโด้

กระแส dark current นี้มีลักษณะพิเศษคือ มันจะเพิ่มขึ้นเร็วกว่าการเพิ่มขึ้นของสัญญาณออก (output signal) shot noise เป็นสิ่งที่เกิดจาก dark current และอื่นๆที่เป็นแหล่งต้นกำเนิดในการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงนอกจากจะต้องคำนึงถึง shot noise นี้แล้วยังมี thermal noise ที่เกิดจากในวงจรไฟฟ้าไม่เกี่ยวกับสัญญาณแสงที่เข้ามา ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องเลือกค่า M ที่เหมาะสมทำให้ผลรวมของ shot noise และ thermal noise มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับคู่ระดับของสัญญาณ

ความเร็วในการตอบสนองต่อความถี่เป็นสิ่งที่กำหนดจากเวลาที่มีสัญญาณเข้ามาจนกระทั่งเกิดปรากฏการณ์คูดแสง แต่ปัจจุบันเนื่องจากทั้ง APD และ photodiode สามารถตอบสนองความเร็วได้ถึงหลาย GHz จึงไม่มีปัญหาการใช้งาน โดยการเปรียบเทียบคุณสมบัติของ APD และ photodiode แสดงดังตารางที่ 4.2

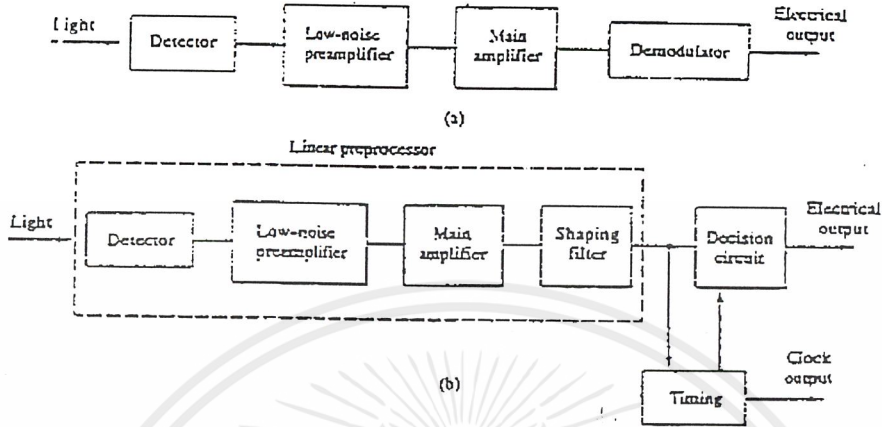
ตารางที่ 4-2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง

อุปกรณ์รับแสง		
หัวข้อ	PD	APD
ประสิทธิภาพทางควอนตัม	80 %	80 %
ความไวการรับแสง	- 15 ถึง - 20 dBm ₀	- 30 ถึง - 40 dBm ₀
ความเร็วการตอบสนองความถี่	หลาย Ghz	หลาย Ghz
อัตราขยาย	1	500
ค่าแรงดันไฟฟ้าไบอัสที่ต้องการ	0 - 20 V	V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 วงจรอุปกรณ์รับแสง

ตามรูปที่ 4.23 แสดงลักษณะของบล็อกไดอะแกรมของวงจรับแสงทั้งสัญญาณที่เป็นดิจิตอลและอนาลอกจะคล้ายกันมาก เอาท์พุทที่ออกมาจากดีเทคเตอร์จะมาเข้าในวงจรขยายเพื่อทำให้กระแสมากขึ้น



รูปที่ 4-23 บล็อกไดอะแกรมของวงจรับแสง a) analog b) digital

4.5.1 วงจรับแสงแบบโฟโตไดโอด

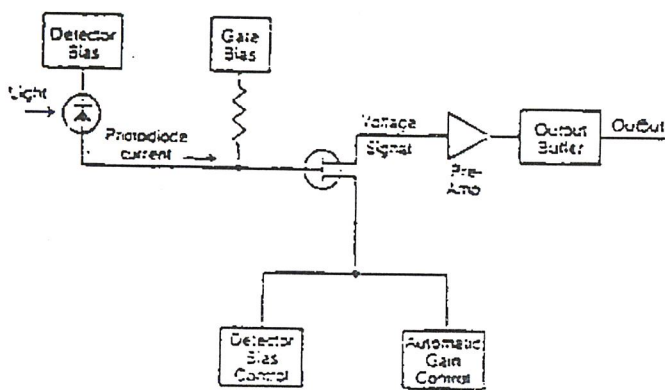
ตามปกติ PN และ PIN photodiode ที่ใช้ในการสื่อสารทางแสง มีวงจรการใช้ตามรูปแบบที่กำหนดซึ่งจะต้องมีการไบอัสกลับให้โฟโตไดโอดและความต้านทานที่ต่ออนุกรมเข้ากับโฟโตไดโอดซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.24 ซึ่งวิธีนี้โฟโตไดโอดจะเป็นตัวนำทางแสง (photoconductive) เนื่องจากกระแสโฟโตที่ไหลเป็นสัดส่วนกับความต้านทานของแสงสว่างของโฟโตไดโอด



รูปที่ 4-24 แสดงวงจรับแสงของ PN และ PIN photodiode

การแบ่งแรงดันระหว่างโฟโตไดโอดกับตัวต้านทานขึ้นอยู่กับความสว่าง ถ้าสว่างมากโฟโตไดโอดกระแสก็มากในวงจรที่แสดงนี้สัญญาณข้อมูลจะตกคร่อมที่ตัวความต้านทานนอกจากนี้ยังมีวงจรที่ยุ่งยากกว่าโดยมีวงจรขยายด้วย นอกจากตัวต้านทาน คือ PIN-FET and detector preamplifier ในรูปที่ 4.25

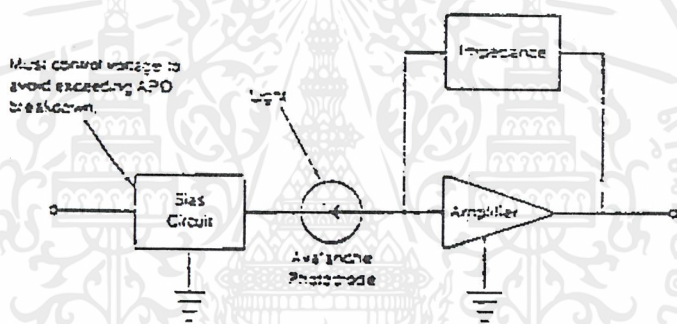
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-25 แสดงบล็อกไดอะแกรม PIN-FET receiver circuit

4.5.2 วงจรรับแบบอะวาลานซ์โฟโต้ไดโอด

รูปแบบของวงจรก็คล้ายกับวิธีแรกเนื่องจากต้องการแรงดันไบอัสเหมือนกันแต่ต้องการมากกว่าซึ่งแต่ละขั้นตอนต้องใช้ความแน่นอนในการทำซึ่งรูปแบบแสดงในรูป 4.26



รูปที่ 4-26 แสดงวงจรรับแบบอะวาลานซ์โฟโต้ไดโอดอย่างง่าย

ในทางปฏิบัติมีค่าหนึ่งที่มีความสำคัญกับโฟโต้ดีเทคเตอร์ คือค่า Responsivity (R) บางครั้งอาจเรียกว่า radiant sensitivityซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของกระแสโฟโต้ (กระแสที่เกิดจากการดูดกลืนโฟตอน) กับพลังงานที่ตกกระทบ

$$R = I_p / P_t \tag{4.7}$$

โดย R มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อวัตต์ (Ampere/watt) .

และ
$$I_p = (N_e \cdot e) / s \tag{4.8}$$

โดย e คือ ประจุของอิเล็กตรอน

N_e คือ จำนวนของอิเล็กตรอนที่ถูกสร้างขึ้น

และ
$$P_t = (N_p E_p / s) \tag{4.9}$$

โดย E_p คือ พลังงานของโฟตอน

N_p คือ จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะได้ว่า

$$R = (N_e \cdot e) / (N_p E_p) = (n_q e) / E_p \quad 4.10$$

$$R = (n_q e) / hf = [n_q (e\lambda)] / (hc) \quad 4.11$$

เมื่อ λ มีหน่วยเป็นเมตร

c มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

R มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อวัตต์

e มีหน่วยเป็นคูลอมบ์

ดังนั้นจะได้

$$R = (n_q \lambda) / 1.24 \quad 4.12$$

จากสมการข้างต้น และ responsivity จะเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มความยาวคลื่น เมื่อแสงพุ่งเข้าโฟโตนิกไดโอดที่บรรจุภายในแก้วหรือพลาสติก โดยแสงต้องทะลุผ่านชั้นเอ็นหรือชั้นพีเข้าสู่ดีพลีชันหรืออินทรินสิค โดยหากผ่านเข้าได้ก็ขึ้นอยู่กับกำลังส่งของแสงด้วย

ตารางที่ 4-3 ตารางเปรียบเทียบตัวรับแสงชนิดต่างๆ

Photo detector	Wavelength (nm)	Responsivity (A/W)	Dark current (nA)	Rise time (ns)	Operating Voltage (V)
Si P - N	550-850	0.4-0.7	1-5	5-10	20-40
Si PIN	850-950	0.6-0.8	3-300	1-5	5-40
InGaAs PIN	300-1500	0.8	10-30	1-3	5-40
Si APD	650-900	7.4-100	1	0.5-2	60-120
Photo TR	800-900	70	25-100	5-15 μ s	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

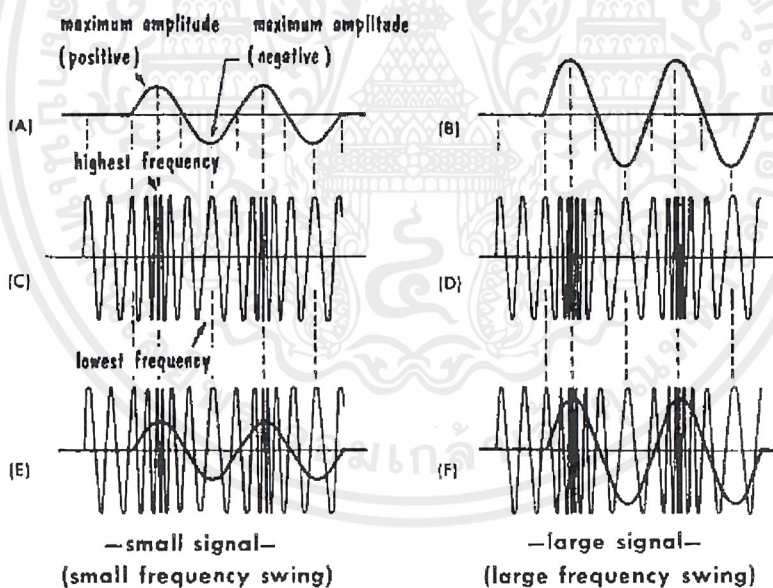
FM สเตอริโอ

5.1 บทนำ

ระบบ FM สเตอริโอเป็นระบบที่มีความแพร่หลายมากในปัจจุบัน จึงอาจกล่าวได้ว่าบ้านทุกหลัง ครอบครัวยุคใหม่จะต้องมีเครื่องรับวิทยุ FM ไว้ฟัง ก่อนที่จะเข้าสู่รายละเอียดของ FM สเตอริโอ จะขอกล่าวถึงพื้นฐานของ การผสมคลื่นทางความถี่ (Frequency modulation) รวมทั้งตัวแปรที่มีความสำคัญ

5.1.1 การผสมคลื่นทางความถี่ (Frequency Modulation)

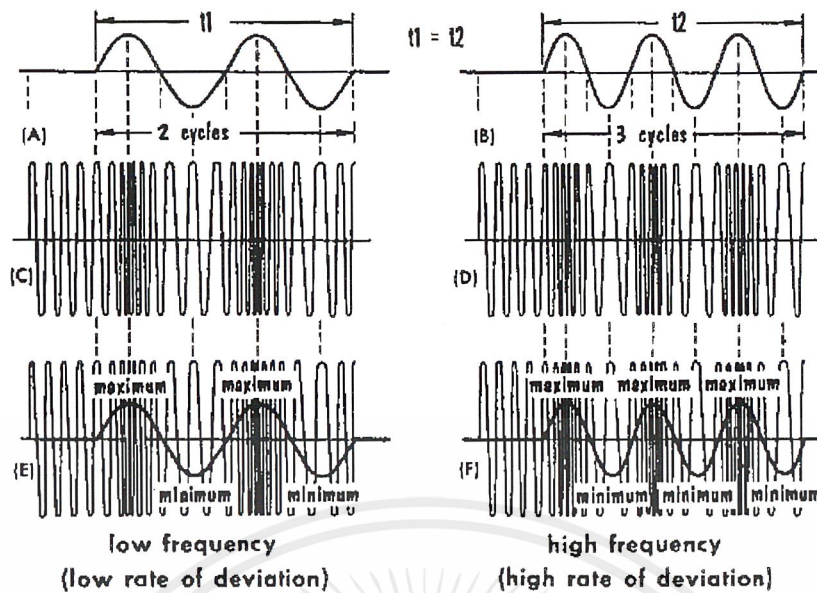
การผสมคลื่นแบบ FM คือการผสมคลื่นที่สัญญาณเสียงไปควบคุมให้ความถี่วิทยุ (ความถี่พาหะ) เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่สัญญาณเสียงที่ส่งเข้ามาควบคุม ความถี่คลื่นพาหะจะเพิ่มสูงขึ้นจากปกติ เมื่อมีสัญญาณเสียงช่วงบวกเข้ามาผสม และความถี่คลื่นพาหะจะลดต่ำลงจากปกติเมื่อมีสัญญาณเสียงช่วงลบเข้ามาผสม พิจารณารูปประกอบ



รูปที่ 5-1 การผสมคลื่นเสียงเข้ากับคลื่นพาหะแบบ FM เมื่อสัญญาณเสียงมีความแรงต่างกัน

จากรูปพบว่า ความแรงของสัญญาณเสียง มีผลต่อความถี่ของคลื่นพาหะ รูป A,C,E แสดงสัญญาณเสียงที่มีความแรงน้อย ความถี่พาหะก็จะเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นหรือต่ำลงจากความถี่ปกติน้อย ส่วนรูป B,D,F แสดงสัญญาณเสียงที่มีความแรงมาก ความถี่พาหะก็จะเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นหรือต่ำลงจากความถี่มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-2 การผสมคลื่นเสียงเข้ากับคลื่นพาหะแบบ FM เมื่อสัญญาณเสียงมีความถี่ต่างกัน

รูป A,C,E สัญญาณเสียงที่มีความถี่ต่ำ ช่วงการเปลี่ยนแปลงของความถี่พาหะจะกว้าง ส่วนรูป B,D,F สัญญาณเสียงที่มีความถี่สูง ช่วงการเปลี่ยนแปลงของความถี่พาหะจะแคบ

5.1.2 ตัวแปรที่มีความสำคัญ

ตัวแปรและนิยามของศัพท์บางคำในเรื่องของ FM มีมากมาย แต่ที่สำคัญได้แก่

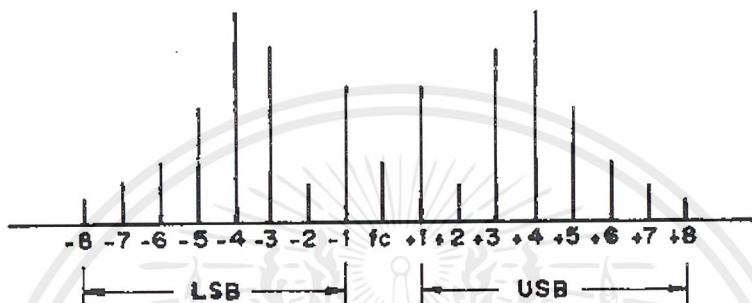
- ช่วงห่างของความถี่ (Bandwidth) คือ ความแตกต่างของความถี่ของสัญญาณ FM เนื่องจากความถี่ของสัญญาณ FM จะไม่คงที่ จากหัวข้อข้างต้น สรุปว่า ช่วงห่างของความถี่ ขึ้นอยู่กับ แอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเสียงที่นำมาผสม
- ความถี่ศูนย์กลาง (Center frequency) คือ ความถี่ค่าหนึ่งซึ่งถูกกำหนดขึ้นมาเพื่อบ่งบอกถึงช่วงที่ความถี่ FM สามารถเบี่ยงเบนไปจากความถี่ค่านี้ได้ FCC กำหนดว่า ความถี่ที่สามารถเบี่ยงเบนจากความถี่ศูนย์กลางได้ จะมีค่าไม่เกิน $\pm 75 \text{ KHz}$
- ไซด์แบนด์ (FM Side bands)

ในระบบ FM ถ้าผสมคลื่นระหว่างสัญญาณเสียงกับคลื่นพาหะ จะเกิดไซด์แบนด์จำนวนมาก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความถี่คลื่นพาหะ ทำให้ความถี่เพิ่มขึ้นอีกมากมาย เพราะการผสมคลื่นแบบ FM นั้นความแรงของสัญญาณคลื่นพาหะจะคงที่ นั่นคือกำลังของคลื่นพาหะจะถูกกระจายไปอยู่ที่ไซด์แบนด์ ความสัมพันธ์ของคลื่นพาหะกับไซด์แบนด์ในระบบ FM ขึ้นอยู่กับดัชนีการผสมคลื่น (Modulation index) ซึ่งดัชนีการผสมคลื่นจะเป็นตัวกำหนดจำนวนของไซด์แบนด์ที่สำคัญขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการคือ

1. ขนาดความแรงของสัญญาณเสียง (Amplitude) – สัญญาณเสียงที่มีแอมพลิจูดสูง ทำให้ความถี่ของคลื่นพาหะเปลี่ยนแปลงไปจาก ความถี่ศูนย์กลางมากขึ้น (แบนด์วิทกว้าง) จำนวนไซด์แบนด์มาก

2. ความถี่ของสัญญาณเสียง – สัญญาณเสียงที่มีความถี่สูง แบนด์วิทของสัญญาณ FM ก็จะแคบ เพราะเราสามารถ ตัดความถี่ที่ฮาร์โมนิกสูงๆออกได้

ความเป็นจริง ไซด์แบนด์ มีจำนวนไม่จำกัด แต่ในทางปฏิบัติ ไซด์แบนด์ที่อยู่ห่างออกจากความถี่ศูนย์กลางไปจะมีแอมพลิจูดต่ำมาก ซึ่งเราจะไม่นำมาพิจารณา



รูปที่ 5-3 สเปกตรัมความถี่ของวิทยุ FM ประกอบด้วยความถี่พาหะและไซด์แบนด์

- ดัชนีการผสมคลื่น (Modulation index) จะเป็นตัวกำหนดแบนด์วิทของความถี่วิทยุ FM ว่าจะมี ความกว้างของไซด์แบนด์เท่าใด สามารถหาดัชนีการผสมคลื่นได้จากสูตร

$$m = \frac{\Delta F}{f}$$

m = ดัชนีการผสมคลื่น

ΔF = อัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของความถี่ที่ถูกผสมแล้ว (Hz)

f = ความถี่สูงสุดของสัญญาณเสียงที่จะเข้ามาผสมคลื่น (Hz)

ในการส่งวิทยุกระจายเสียง FM ตามกฎของ FCC กำหนดให้ความถี่ของคลื่นพาหะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงไปได้สูงสุด = ± 75 KHz และความถี่ของสัญญาณเสียงที่จะเข้ามาผสมคลื่นมีค่าสูงสุดได้ = 15 KHz ดังนั้น $m = (75K / 15K) = 5$

นอกจากนี้ค่า “แบนด์วิท” สามารถหาได้เมื่อทราบค่า m จากสมการ

$$BW = 2(m + 1)f$$

ดังนั้นค่าที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานของ FCC จะได้ “แบนด์วิท” ประมาณ 180 KHz

- **การ์ดแบนด์ (Guardband)** คือ ช่วงของความถี่ที่ไม่มีกำลังสัญญาณ มีไว้เพื่อป้องกันการรบกวนและการแทรกกันระหว่างสถานี

1 สถานีของวิทยุกระจายเสียงจะมี แบนด์วิท = 200 KHz ประกอบด้วย

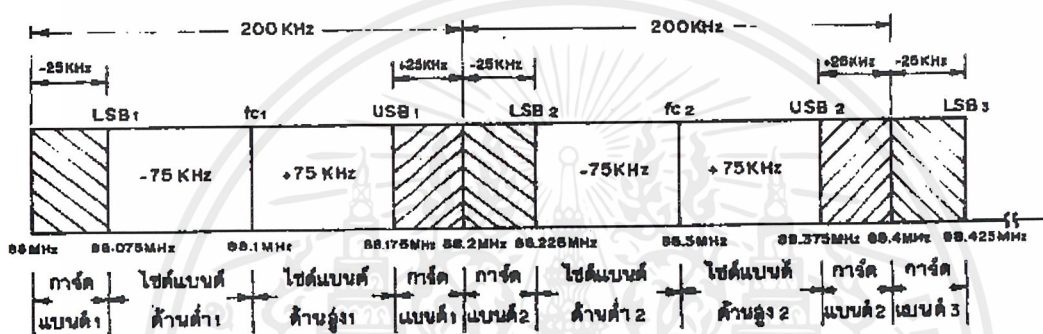
ไซด์แบนด์ 150 KHz แบ่งเป็น ไซด์แบนด์ด้านต่ำ (LSB) และด้านสูง (USB) ด้านละ 75 KHz

การ์ดแบนด์ 50 KHz แบ่งเป็นการ์ดแบนด์ด้านต่ำและด้านสูง ด้านละ 25 KHz

ความถี่ที่ใช้ในการกระจายเสียงวิทยุ FM จะอยู่ในช่วง 88 MHz-108 MHz (แบนด์วิท=20 MHz)

หรือ 20,000 Hz เมื่อนำค่าแบนด์วิทของ 1 สถานีมาหารจะได้จำนวนช่องของสถานีทั้งหมด คือ

(20,000 KHz / 200 KHz = 100 สถานี)

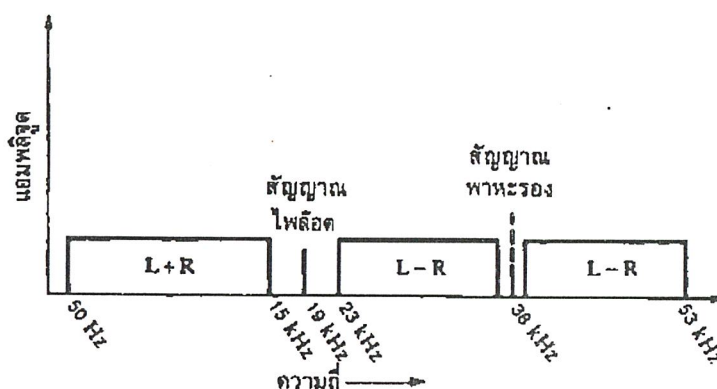


รูปที่ 5-4 แสดงแบนด์วิทแต่ละสถานีของวิทยุกระจายเสียงย่าน FM

5.2 ระบบ FM สเตอริโอ

ระบบ FM สเตอริโอ เป็นระบบซึ่งต้องออกแบบให้เครื่องรับในระบบ FM ธรรมดา (Mono) สามารถรับสัญญาณได้ตามปกติ หรือเรียกว่า ออกแบบให้ คอมแพติเบิล(Compatible) ดังนั้นเครื่องส่งในระบบนี้ต้องส่งสัญญาณเสียงทั้ง ช่องซ้ายและช่องขวามาทั้งคู่ โดยคงย่านความถี่ของสัญญาณเสียง (50 Hz-15 KHz) ตามปกติเอาไว้ สัญญาณนี้เรียกว่าสัญญาณ (L+R) นอกจากนี้ในระบบ FM สเตอริโอจะต้องส่งสัญญาณ (L-R) มาด้วย สัญญาณ (L-R) นี้จะผ่านการมอดูเลตแบบ AMDSBSC มาก่อน เนื่องจากการคิโมดสัญญาณ DSB ค่อนข้างยุ่งยาก ดังนั้นเครื่องส่งจำเป็นต้องส่งพาหะนำคลื่น (Pilot carrier) มาด้วยเพื่อช่วยในการซิงค์ (Synchronize) กับ พาหะรอง (Subcarrier) ที่เครื่องส่งความถี่ของสัญญาณนำคลื่นเท่ากับ 19 KHz ซึ่งเท่ากับครึ่งหนึ่งของพาหะรอง 38 KHz พอดี กรรมวิธีที่นำเอาสัญญาณ 2 ชนิดคือ (L+R) กับ (L-R) ส่งไปพร้อมกัน โดยใช้พาหะหลักร่วมกันนี้เรียกว่า การ “มัลติเพล็กซ์” (Multiplex)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-5 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณในระบบสเตอริโอ มัลติเพล็กซ์

กล่าวโดยสรุปจากรูปที่ 5-5 สัญญาณที่เกิดจากการมัลติเพล็กซ์จะประกอบด้วยสัญญาณไพโลต 19 KHz และสัญญาณพาหะรอง (L-R) 38 KHz ซึ่งเป็น DSB เครื่องรับ FM โมโนธรรมดาคจะรับได้แต่เฉพาะสัญญาณ (L+R) ในช่วงความถี่ประมาณ 50 Hz-15 KHz เท่านั้น สัญญาณเสียงที่ออกจากลำโพงจะเป็นสัญญาณรวมทั้งด้านซ้ายและด้านขวา ไม่มีการแยกเสียงเป็นสเตอริโอ (Stereo separation) สำหรับเครื่องรับ FM สเตอริโอจะรับเอาสัญญาณทั้งหมดมาผ่านกระบวนการดีมัลติเพล็กซ์ (Demultiplex) ซึ่งเป็นกระบวนการตรงข้ามกับการมัลติเพล็กซ์เพื่อแยกสัญญาณเสียงออกเป็นแชนแนลซ้ายและขวา

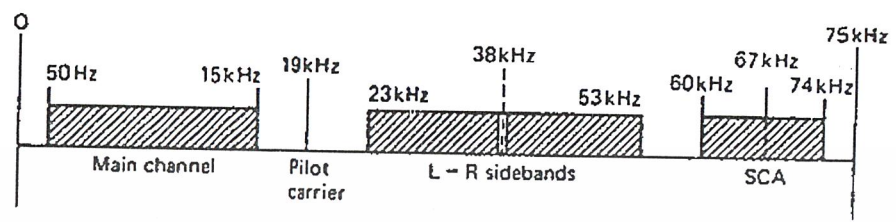
- สัญญาณ SCA (Subsidiary Communication Authorization) เป็นชื่อองค์กรที่ให้บริการด้านบันเทิง แต่ประเทศไทยเรายังไม่มีระบบ SCA ส่วนมากสัญญาณ SCA ที่ส่งจะเป็นสัญญาณเสียงเพลงอย่างเดียวไม่มีโฆษณาหรือประกาศ ผู้ที่จะรับฟังสัญญาณ SCA จะต้องเสียค่าบริการหรือค่าสมาชิก สัญญาณ SCA นี้ส่งมาพร้อมกับ การกระจายเสียง FM เว้นแต่ว่ามอดูเลตลงบนพาหะรองพิเศษอีกตัวหนึ่ง สัญญาณพาหะรองสำหรับ SCA นี้อาจใช้ค่าความถี่ค่าใดค่าหนึ่งในช่วง 20-75 KHz ถ้าสถานีส่งสัญญาณสเตอริโอด้วย พาหะรองสำหรับ SCA จะต้องหนีเลยขึ้นไปอยู่ในช่วง 53-75 KHz ความถี่มาตรฐานที่ใช้คือ 67 KHz

พาหะรอง SCA จะมอดูเลตแบบ FM โดยมีความถี่เบี่ยงเบนไป ± 75 KHz ย่านความถี่ของสัญญาณมัลติเพล็กซ์ทั้งหมด (ในกรณีที่มี SCA) จะเป็นดังรูปที่ 1 สัญญาณ SCA และสัญญาณไพโลต 19 KHz จะมอดูเลตเพียงสัญญาณละ 10 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเหลือให้สัญญาณ (L+R) กับ (L-R) อีก 80 เปอร์เซ็นต์

รายการที่จะกระจายเสียงในระบบ SCA จะเป็นรายการอะไรก็ได้ แต่โดยทั่วไปมักจะเป็นรายการเพลง (Background music) หรือรายการพิเศษเฉพาะผู้ฟังเฉพาะกลุ่ม เช่น รายการอ่านหนังสือให้คนตาบอดฟังหรืออาจจะเป็นการส่งภาพโทรทัศน์แบบสแกนช้า (Slow scan TV หรือ SSTV) สำหรับคนหูหนวก นอกจากนี้ยังอาจใช้เป็นช่องสัญญาณในการติดต่อสื่อสารระหว่างห้องส่งกับสถานีซึ่งแยกกันอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

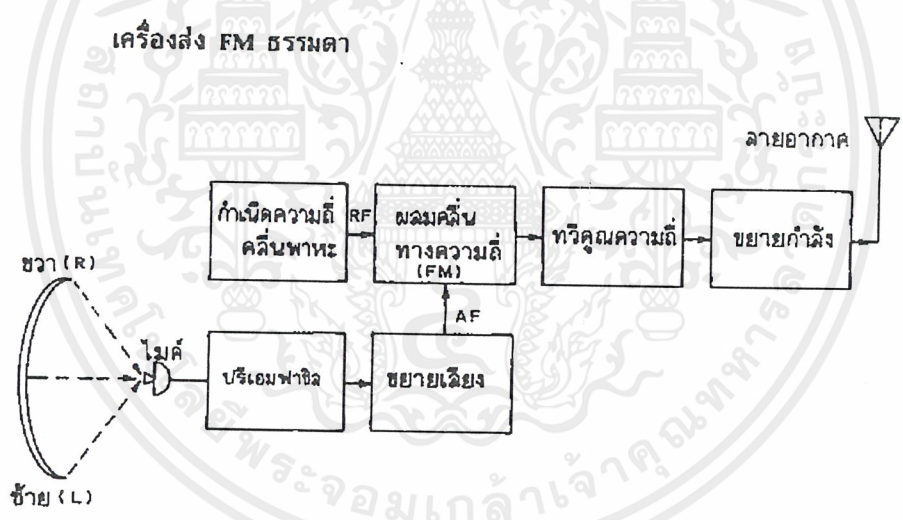
เครื่องรับ SCA สามารถใช้ร่วมกับเครื่องส่ง FM ธรรมดาได้ เพียงแต่เพิ่มชุดฟิลเตอร์ชนิดแบนด์พาส เพื่อกรองเอาสัญญาณ SCA ที่ความถี่ 67 KHz ออกมาแล้วตีมอดด้วยวงจรเฟสล็อกซึ่งจูนความถี่ไว้ที่ 67 KHz สัญญาณที่ได้จะถูกขยายไปยังลำโพงหรือเอาท์พุทอื่น โดยผู้ฟังสามารถเลือกฟังรายการหลักหรือรายการ SCA อย่างใดอย่างหนึ่งหรือจะฟังพร้อมๆกัน ทั้ง 2 รายการก็ได้



รูปที่ 5-6 สเปกตรัมของระบบสเตอริโอโมดูลิเฟสล็อก ซึ่งมีสัญญาณ SCA รวมอยู่ด้วย

5.2.1 เครื่องส่งวิทยุ FM

ในการส่งสัญญาณ FM ด้วยเครื่องส่งวิทยุ จะต้องประกอบด้วยวงจรที่สำคัญทั้งหมดได้แก่



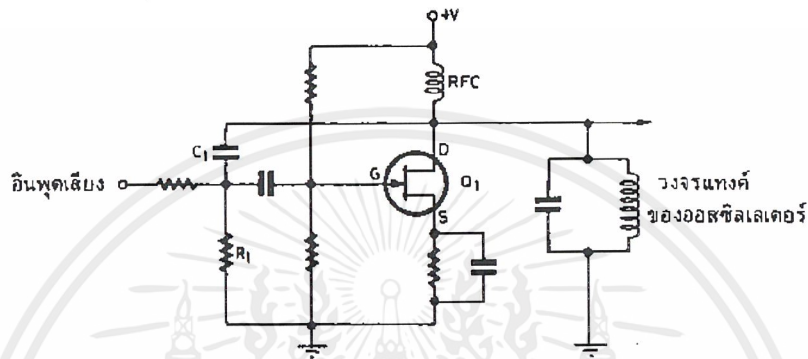
รูปที่ 5-7 บล็อกไดอะแกรมแสดงเครื่องส่งวิทยุ FM แบบธรรมดา (Mono)

1. วงจรปริอิมฟาซิล - ทำหน้าที่ยกระดับความแรงของสัญญาณเสียงความถี่สูงให้แรงขึ้นมากกว่าปกติ เพื่อให้สัญญาณเสียงต่อสัญญาณรบกวน (S/N Ratio) เท่ากันตลอดย่านความถี่เสียง
2. วงจรมอดมเสียง - ทำให้สัญญาณเสียงมีความแรงมากขึ้น
3. วงจรมอดมความถี่ - ทำหน้าที่เป็นภาคผสมคลื่นทางความถี่ (Frequency Modulator) ซึ่งที่ภาคนี้มีความถี่ที่ส่งเข้ามา 2 ความถี่ คือ ความถี่คลื่นพาหะ (RF) และความถี่สัญญาณเสียง (AF)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรมอดูเลเตอร์มีอยู่หลายชนิด ได้แก่

(3.1) รีแอคแตนซ์มอดูเลเตอร์ (Reactance modulator) - หลักการของวงจรรีแอคแตนซ์มอดูเลเตอร์ ก็คือ ไบอัส FET หรือทรานซิสเตอร์ เป็นตัวที่ทำหน้าที่เป็นรีแอคแตนซ์ (ความจุหรือความเหนี่ยวนำ) ในวงจรแท่งค้ำของออสซิลเลเตอร์ ฉะนั้นเมื่อป้อนสัญญาณเสียงมอดูเลต ค่ารีแอคแตนซ์จะแปรเปลี่ยนไป ทำให้ความถี่ของออสซิลเลเตอร์เปลี่ยนแปลงด้วย



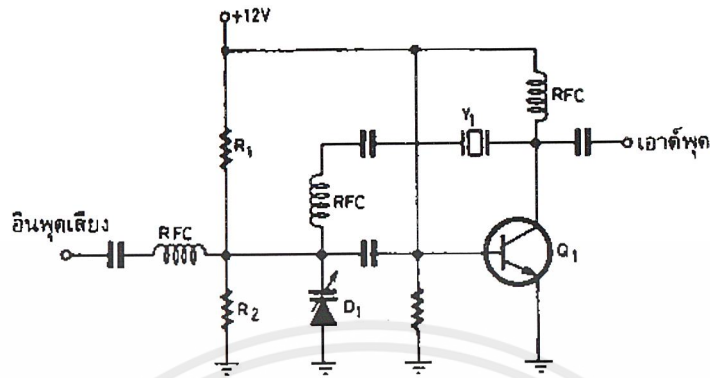
รูปที่ 5-8 วงจรรีแอคแตนซ์มอดูเลเตอร์

วงจรรีแอคแตนซ์มอดูเลเตอร์ ในรูปที่ ใช้ C_1 และ R_1 ต่อคร่อมวงจรแท่งค้ำของออสซิลเลเตอร์ ค่ารีแอคแตนซ์ของ C_1 มีค่าประมาณ 6 เท่า ของ R_1 ฉะนั้นเมื่อมองการต่อ R_1 กับ C_1 จึงเสมือนเป็นความจุล้วนๆ ฉะนั้นสัญญาณที่ป้อนแก่เกตของ Q_1 จะมีเฟสหน้าแรงดันออสซิลเลเตอร์อยู่ 90 องศา เทียบกับแรงดันออสซิลเลเตอร์ด้วยเช่นกัน ดังนั้นวงจรรวมจึงปรากฏเป็นความจุต่อขนานกับวงจรแท่งค้ำของออสซิลเลเตอร์

เนื่องจากวงจร FET ทำหน้าที่เสมือนตัวเก็บประจุ จึงสามารถควบคุมความถี่ของออสซิลเลเตอร์ได้ ถ้าสัญญาณเสียงเป็น 0 ค่าความจุจะอยู่ที่ ค่าความถี่กลาง ถ้าสัญญาณเสียงเป็น บวก กระแสตรงจะเพิ่ม และค่าความจุจะเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้ความถี่ออสซิลเลเตอร์ต่ำลง ในทำนองเดียวกัน ถ้าสัญญาณเสียงเป็น ลบ กระแส FET จะลดและความจุจะลดลงตามด้วย ความถี่ของออสซิลเลเตอร์จึงเพิ่มขึ้น ในวงจรประเภทนี้สามารถใช้ หลอดสูญญากาศแทน FET ทำเป็นวงจรรีแอคแตนซ์ได้

(3.2) มอดูเลเตอร์ใช้วาแรกเตอร์ - วงจรในรูปเป็นวงจรมอดูเลเตอร์อีกประเภทหนึ่ง ประกอบด้วยวาแรกเตอร์ไดโอด D_1 ใน วงจรเพียซออสซิลเลเตอร์ (Pierce oscillator) แร้งบังคับความถี่ (Y_1) สำหรับ R_1 กับ R_2 เป็นวงจรไบอัสให้แก่วาแรกเตอร์เพื่อให้มีค่าความจุ ให้ออสซิลเล

เตอร์อยู่ตรงความถี่กลางๆ เมื่อป้อนสัญญาณเสียงให้แก่ วาแรกเตอร์ แรงดันเสียงก็จะบวกลบกับไฟไบอัสทำให้ความจุเปลี่ยนแปลง และความถี่ของออสซิลเลเตอร์ก็เปลี่ยนแปลงไปด้วย



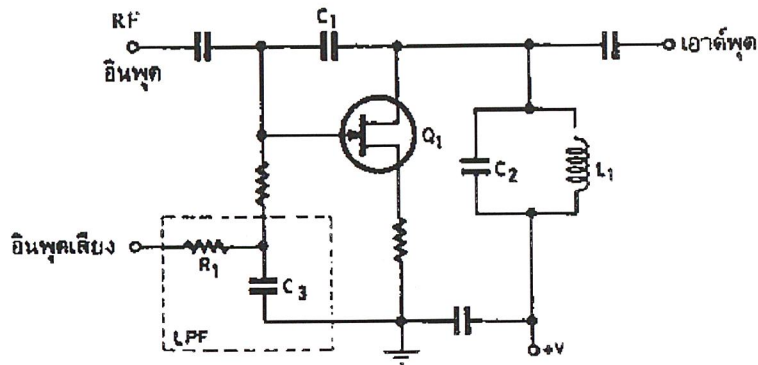
รูปที่ 5-9 วงจรมอดูเลเตอร์ใช้วาแรกเตอร์

เมื่อสัญญาณเสียงแกว่ง (Swing) หรือเปลี่ยนค่าไปทางบวก แรงดันไบอัสแบบกลับทางที่คร่อมวาแรกเตอร์จะเพิ่มขึ้น ความจุจะลดลง ทำให้ความถี่ออสซิลเลเตอร์สูงขึ้นเมื่อสัญญาณเสียงแกว่งไปทางลบ ไฟไบอัสกลับทางคร่อมวาแรกเตอร์ก็จะลดลง ความจุของวาแรกเตอร์จะมากขึ้นทำให้ความถี่ของออสซิลเลเตอร์ลดลง

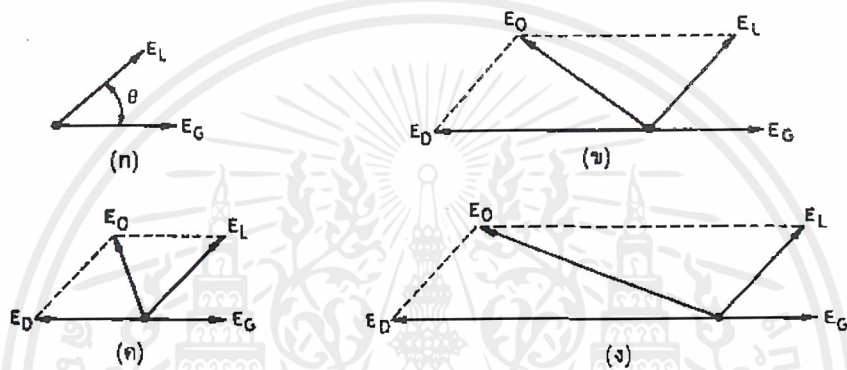
ถ้าสัญญาณเป็นโทนเสียง 1000 Hz ความถี่ของออสซิลเลเตอร์ จะแกว่งไปมาระหว่างความถี่กลางด้วยอัตรา 1000 ครั้งต่อวินาที (อัตราเบี่ยงเบนนั่นเอง) อัตราการเบี่ยงเบนความถี่จะเท่ากับความถี่ของสัญญาณเสียง ถ้าแอมพลิจูดของสัญญาณเสียงเพิ่มขึ้น ช่วงเปลี่ยนแปลงความจุของวาแรกเตอร์จะกว้างมากขึ้น นั่นคือช่วงความถี่เบี่ยงเบนกว้างขึ้น มอดูเลเตอร์ชนิดนี้ได้รับความนิยมแพร่หลายมากเพราะสะดวกและมีเสถียรภาพดี

(3.3) เฟสมอดูเลเตอร์ (Phase modulator) - เฟสมอดูเลเตอร์ใช้วิธีการมอดูเลตแบบเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณพาหะ (นิยมเรียกว่า FM โดยอ้อม หรือ Indirect FM) ในรูป สัญญาณพาหะ RF ที่ป้อนมาให้วงจรออสซิลเลเตอร์นี้เข้าที่ ขาเกต ของ Q_1 และผ่าน C_1 ไปสู่วงจรเทงก์ L_1C_2 ด้วย ดูรูปที่ 5-11(ก) แรงดันเทงก์ E_L นำหน้าแรงดันเกต E_G อยู่เป็นมุมเท่ากับ θ เนื่องจากมีการเลื่อนเฟสหลังจากผ่านตัวเก็บประจุ C_1 สัญญาณ RF อีกส่วนหนึ่ง ซึ่งถูกขยายด้วย FET เนื่องจากสัญญาณ EG ป้อนที่เกิด ออกมาที่วงจรเดรนเป็น ED จะมีเฟสตรงข้ามกับ E_G E_D เป็นแรงดันที่ปรากฏที่เดรนของ Q_1 และนำหน้า E_G อยู่ 180 องศา(มีการกลับเฟส) ดูรูปที่ 5-11(ข) ดังนั้น แรงดันเอาต์พุต E_o จึงเท่ากับผลรวมเวกเตอร์ E_D กับ E_L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-10 เฟสมอดูเลเตอร์ใช้ FET



รูปที่ 5-11 การมอดูเลตทางเฟสซึ่งเขียนแสดงด้วยเวกเตอร์

เมื่อป้อนสัญญาณเสียงเข้าที่ Q_1 แรงดันไบอัสจะเปลี่ยนทำให้อัตราขยายของวงจรเปลี่ยนด้วยฉะนั้น E_D ก็จะเปลี่ยนแปลงทำให้เอาท์พุท E_O เปลี่ยนแปลงด้วย สังเกตว่า E_O นั้นเปลี่ยนแปลงทั้งเฟสและแอมพลิจูด ดู รูปที่ 5-11(ค) และ (ง) ดังนั้นวงจรเฟสมอดูเลเตอร์จึงทำหน้าที่เป็นทั้งมอดูเลเตอร์ทั้งเฟสและแอมพลิจูด การที่จะบังคับให้แอมพลิจูดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงทำได้โดยใช้วงจรขยายคลาซ C ทำให้ส่วนที่เป็น AM ถูกกำจัดไปเนื่องจากการขลิบยอด (Clip) แต่ส่วนที่มอดูเลตทางเฟส หรือ PM(Phase modulation) ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงแม้สัญญาณจะถูกขลิบก็ตาม

เนื่องจากสัญญาณที่ถูกมอดูเลตจากวงจรเฟสมอดูเลเตอร์ไม่มีผลต่อวงจรแทรกซ์มากนัก ดังนั้นเสถียรภาพความถี่ของเฟสมอดูเลเตอร์จึงค่อนข้างดีกว่าวิธีการ FM โดยตรง (Direct FM) แต่มีข้อเสียตรงที่ไม่สามารถมอดูเลตให้มีช่วงความถี่ที่เบี่ยงเบนกว้างๆได้ ฉะนั้นวงจรเฟสมอดูเลเตอร์ชนิดนี้จึงมักนิยมใช้ในพวกเครื่องรับส่งวิทยุแบนด์แคบ มากกว่าที่จะนำไปใช้ในเครื่องรับวิทยุกระจายเสียงซึ่งเป็นแบนด์กว้าง

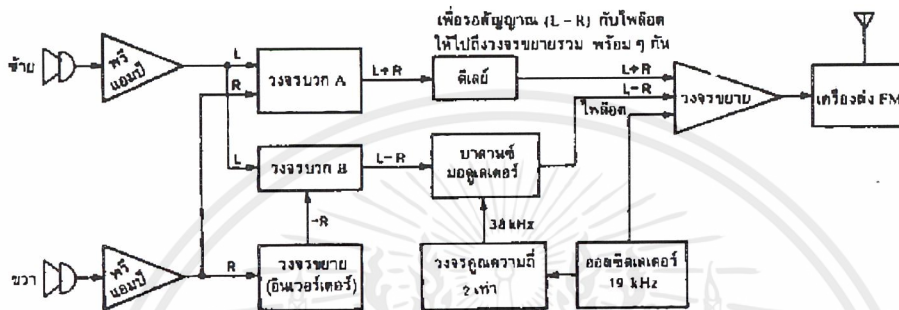
4. วงจรคูณความถี่ (Multiplier) – เพื่อเพิ่มความถี่ให้สูงขึ้นให้เท่ากับความถี่ของสถานี FM ที่จะส่งกระจายเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. วงจรขยายกำลัง (PA :Power amplifier) – ทำหน้าที่เพิ่มระดับความแรงของสัญญาณให้แรงมากขึ้นพอที่จะส่งต่อไปสายอากาศเพื่อแพร่คลื่นความถี่ออกสู่อากาศในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เครื่องส่งวิทยุ FM สเตอริโอมัลติเพล็กซ์

เครื่องส่งชนิดนี้จะมีส่วนของวงจรมัลติเพล็กซ์เพิ่มเข้ามา จากวงจรส่ง FM แบบโมโนพิจารณารูปประกอบ



รูปที่ 5-12 เครื่องส่งวิทยุ FM สเตอริโอมัลติเพล็กซ์

ในส่วนของวงจรมัลติเพล็กซ์เพื่อทำให้เป็นสัญญาณสเตอริโอ อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าภาคเข้ารหัสสเตอริโอ (Stereo encoder) ประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

1. วงจรรวมสัญญาณ A (L+R Adder) – จะรับสัญญาณจากด้าน ซ้าย(L) และด้าน ขวา(R) มารวมกันเป็นสัญญาณเสียงเดียวเรียกว่าสัญญาณโมโน (Mono signal)

2. วงจรถับเฟสสัญญาณ (180° Phase inverter) – จะรับสัญญาณเสียงด้าน R เข้ามา กลับเฟสสัญญาณเสียงไป 180° จากสัญญาณเสียงปกติ สัญญาณที่ผ่านวงจรถับเฟสออกไปจะกลายเป็น -R เพื่อไปสู่วงจรรวมสัญญาณ L-R ต่อไป

3. วงจรรวมสัญญาณ B (L-R Adder) – จะรับสัญญาณเสียงด้าน -R กับ L มารวมกัน จะได้สัญญาณเสียงออกมาเป็น L-R หรือเป็นสัญญาณผลต่าง และถูกส่งต่อไปยังวงจรมัลติเพล็กซ์

4. วงจรถ่ายความถี่ 19 KHz (19 KHz Oscillator) – โดยใช้ Crystal เป็นตัวกำเนิด เราจะเรียกความถี่นี้ว่า “สัญญาณไฟลิต” ซึ่งเป็นความถี่ที่สำคัญที่จะทำให้การส่งและการรับในระบบ FM สเตอริโอมัลติเพล็กซ์ ทำงานได้ถูกต้องและสมบูรณ์ จะถูกส่งออก 2 ทาง คือ ส่งไปเข้าวงจรรวมสัญญาณทั้งหมดและส่ง ไปเข้าวงจรตัวคูณความถี่ 2 เท่า 38 KHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

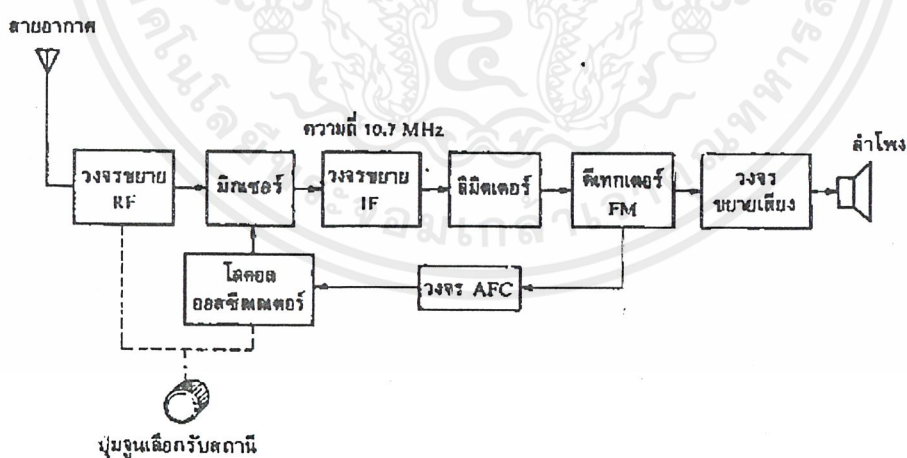
5. วงจรทวีคูณความถี่ 2 เท่า (Doubler) – คือ วงจรคูณความถี่จากที่กล่าวมาแล้วนั่นเอง แต่ถ้าเป็นการคูณความถี่ 2 เท่า เราจะเรียกอีกอย่างว่า Doubler ทำหน้าที่เพิ่มความถี่สัญญาณ ใพล็อต 19 KHz ให้เป็นสัญญาณพาหะรอง 38 KHz ไปเข้าวงจรผสมคลื่นแบบสมดุลย์

6. วงจรผสมคลื่นแบบสมดุลย์ (Balance modulator) – วงจรนี้จะนำสัญญาณ (L-R) และสัญญาณพาหะย่อย 38 KHz มาผสมกันแบบ AM และกำจัดคลื่นพาหะทิ้งไปเหลือเพียงไซด์แบนด์ด้านสูง (USB) : $+(L-R)$ และ ไซด์แบนด์ด้านต่ำ (LSB) : $-(L-R)$ เรียกรวมว่าสัญญาณ 38 KHz สัญญาณไซด์แบนด์ L-R จะถูกส่งต่อไปยังวงจรรวมสัญญาณทั้งหมด

สัญญาณที่ได้จากวงจร 3 ส่วน ได้แก่ สัญญาณ (L+R) , (L-R) และ สัญญาณใพล็อต 19 KHz จะถูกนำไปรวมกันด้วยวงจรรวมสัญญาณทั้งหมดอีกครั้ง โดยสัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณเดี่ยว เราเรียกว่า “สัญญาณเบ็ดเสร็จสเตอริโอ” (Composite stereo signal) ต่อมาสัญญาณนี้จะถูกนำไปมอดูเลตแบบ FM โดยใช้พาหะหลักร่วมกัน และส่งออกทางสายอากาศ

5.2.2 เครื่องรับวิทยุ FM

เครื่องรับวิทยุ FM ในปัจจุบันนี้จะเป็นแบบซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ (Superheterodyne) หรือ เรียกสั้นๆว่า ซูเปอร์เฮท ลักษณะของแผนผังจะคล้ายคลึงกับเครื่องรับ AM แต่กระบวนการตีเทกจะแตกต่างกัน ส่วนประกอบที่สำคัญได้แก่



รูปที่ 5-13 บล็อกไดอะแกรมแสดงเครื่องรับวิทยุ FM แบบธรรมดา (Mono)

1. วงจรขยาย RF (RF Amplifier) – ทำหน้าที่รับสัญญาณวิทยุในย่าน FM 88 MHz-108 MHz เข้ามาและเลือกรับสัญญาณ FM เพียงสถานีเดียว พร้อมทั้งขยายสัญญาณนั้นให้แรงขึ้น เพื่อส่งต่อไปเข้าภาคมิกเซอร์ ดังนั้นในการเลือกอุปกรณ์มาใช้ในวงจรขยายจะต้องหาอุปกรณ์ที่ให้การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอบสนองความถี่ในย่าน FM ได้และต้องขยายความถี่ในช่วงที่กว้างของ FM ได้ (AM มีแบนด์วิท 10KHz , FM มีแบนด์วิท 200 KHz)

2. **วงจรมิกเซอร์ (Mixer)** – ทำหน้าที่ผสมสัญญาณที่ได้จากภาคขยาย RF และ สัญญาณ OSC จากภาคโคลลอสซิลเลเตอร์ สัญญาณที่ออกจากภาคนี้จะมีทั้งหมด 4 ความถี่ ซึ่งได้แก่ 2 ความถี่ จากอินพุตที่เข้ามา ส่วนอีก 2 ความถี่ คือ ความถี่ผลต่าง (OSC-RF)=IF=10.7 MHz และ ความถี่ผลบวก (OSC+RF)

ความถี่ที่วงจรมิกเซอร์ IF ให้ความถี่ผ่านความถี่เดียวคือ 10.7 MHz ไม่ว่าภาคขยาย RF หรือ ภาค OSC จะผลิตความถี่ขึ้นมาเท่าไรก็ตาม

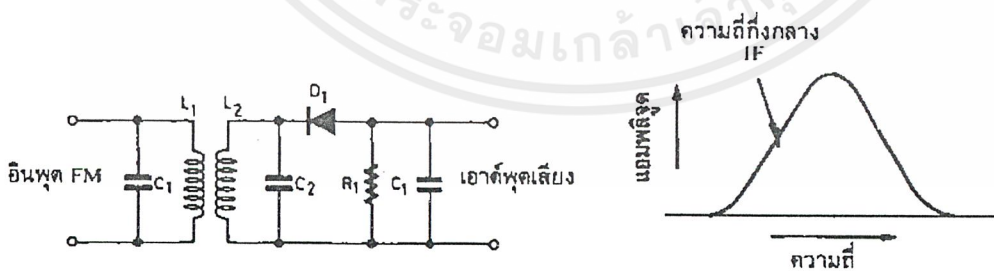
3. **วงจรโคลลอสซิลเลเตอร์ (Local oscillator)** – ทำหน้าที่ผลิตแรงดันคงที่ขึ้นมา ความถี่ที่ผลิตขึ้นจะสูงกว่าความถี่ที่รับเข้ามาจาก ภาคขยาย RF อยู่ 10.7 MHz (เท่ากับความถี่ IF)

4. **ภาคขยายไอเอฟ (IF Amplifier)** – ทำหน้าที่ขยายความถี่ IF ให้มีระดับความแรงมากขึ้น รวมทั้งทำให้แอมพลิจูดของคลื่นคงที่ไม่ผิดเพี้ยน

5. **ภาคดีเทกเตอร์หรือดีมอดูเลเตอร์ (FM Detector, Demodulator)** – ทำหน้าที่แยกสัญญาณเสียงออกจากความถี่ IF ในระบบวิทยุ FM สัญญาณเสียงจะผสมกับคลื่นพาหะ โดยสัญญาณเสียงทำให้คลื่นพาหะเปลี่ยนความถี่สูงขึ้นหรือต่ำลง

วงจรมิกเซอร์มีอยู่หลายชนิด ได้แก่

(5.1) **สโลปดีเทกเตอร์ (Slope detector)** - วงจรมิกเซอร์ FM ที่ง่ายที่สุดเรียกว่า วงจรสโลปดีเทกเตอร์ (Slope detector) ดังรูป ใช้วงจรรีโซแนนซ์ 2 ชุด คือ L_1C_1 กับ L_2C_2 จนให้การตอบสนองเป็นลักษณะเส้นโค้งตาม รูปที่ 5-15 จะเห็นว่าการจูนของเส้นโค้งไม่ได้จูนความถี่กลางไว้ที่ยอดของเส้นโค้ง แต่ในความถี่กลางจะอยู่ในส่วนไหล่ลาดหรือสโลปของเส้นโค้ง



รูปที่ 5-14 วงจรสโลปดีเทกเตอร์

รูปที่ 5-15 เส้นโค้งผลตอบสนองต่อความถี่

สมมติว่าสัญญาณอินพุต IF ความถี่กลางๆป้อนเข้ามา สัญญาณเอาต์พุตจะมีแอมพลิจูดอยู่ที่ค่าเฉลี่ย เมื่อผ่านการดีเทกที่ไดโอด D_1 ถ้าสัญญาณ IF มีความถี่สูงขึ้น แอมพลิจูดที่ดีเทกได้จะสูงขึ้น

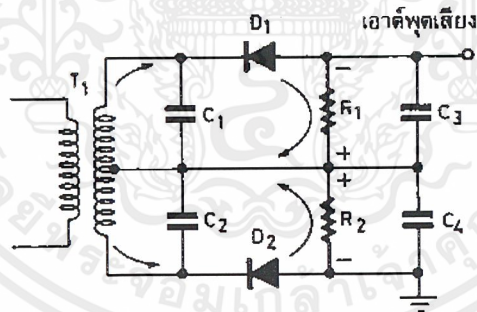
ดังลักษณะเส้นโค้ง เมื่อสัญญาณ IF มีความถี่ต่ำลง แอมพลิจูดที่ป้อนให้ไดโอดและดีเทก ออกมา ได้สัญญาณที่มีค่าน้อยลง

สรุปได้ว่าเมื่อความถี่ของสัญญาณ IF เปลี่ยนแปลง (เป็นสัญญาณ FM) เอาท์พุทที่ได้จะมีแอมพลิจูดเปลี่ยนแปลงตามความถี่ การดีเทกวิธีนี้เสมือนเปลี่ยนสัญญาณ FM ให้เป็นสัญญาณ AM เสียก่อนแล้วจึงดีเทกสัญญาณ AM ด้วยดีเทกเตอร์ซึ่งใช้ไดโอดธรรมดา

วิธีดีมอดแบบนี้เราต้องพิจารณาเส้นโค้งผลตอบสนองความถี่ของวงจรขยาย IF ก่อนหน้าวงจรสโลปดีเทกเตอร์ด้วย โดยปกติการจูนเบี่ยงไปจากความถี่เรโซแนนซ์ทำให้อัตราขยายภาครับไม่ได้เต็มที่ (เพราะไม่ได้จูนที่ยอด) นอกจากนี้ความเป็นลิเนียร์ของส่วนลาด (สโลป) ของเส้นโค้งในการเปลี่ยนสัญญาณ FM เป็น AM ก็ไม่ค่อยจะเป็นเส้นตรง วงจรชนิดนี้จึงไม่ได้รับความนิยม

(5.2) ดีเทกเตอร์ชนิดดับเบิลจูน (Double-tuned Detector) – วงจรดีเทกเตอร์ชนิดดับเบิลจูนประกอบด้วยวงจรจูน 2 ชุดเช่นกัน พิจารณาจากรูป กล่าวคือ ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง T_1 จะแยกเป็น 2 ชุด ชุดที่อยู่เหนือจุดกลางจะจูนกับ C_1 ให้ความถี่เรโซแนนซ์สูงกว่าความถี่ IF เล็กน้อย ส่วนชุดที่อยู่ใต้จุดกลางจะจูนกับ C_2 ให้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ IF เล็กน้อย

เมื่อสัญญาณ IF ป้อนเข้าที่อินพุท สมมติว่า IF มีความถี่อยู่กลาง วงจรเรโซแนนซ์ทางด้านทุติยภูมิ ทั้ง 2 ชุด จะไม่จูนกับเรโซแนนซ์ที่ความถี่นี้ (เพราะวงจรเรโซแนนซ์ทั้ง 2 ชุดนี้จูนเบี่ยงไปจากความถี่ IF ทางบวกและลบ) ไดโอด D_1 และ D_2 จะนำกระแสเท่าๆกัน เกิดแรงดันตกคร่อม R_1 และ R_2 ในทิศทางตรงข้ามทำให้เอาท์พุทเป็น 0



รูปที่ 5-16 ดีเทกเตอร์ชนิดดับเบิลจูน

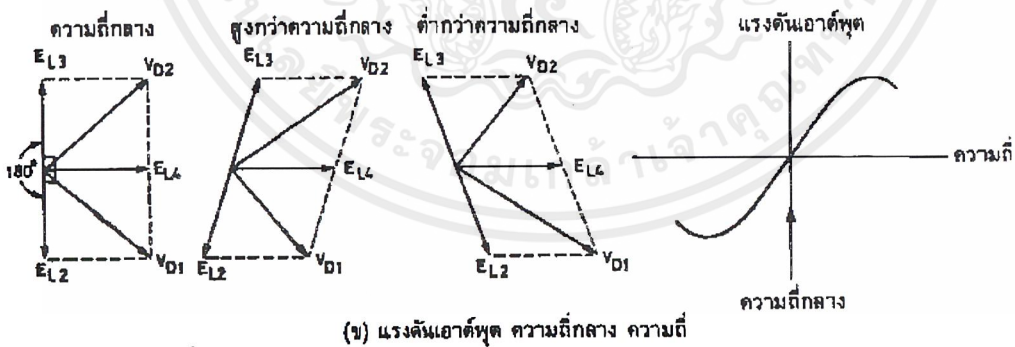
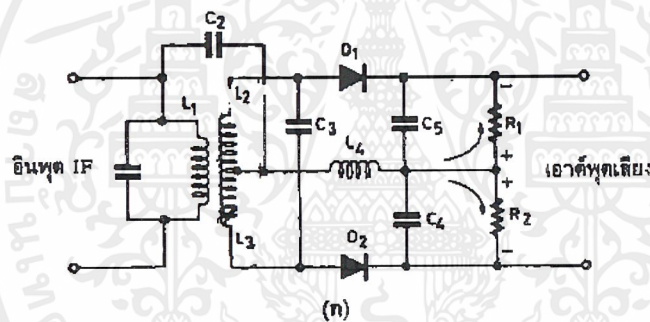
ถ้าสัญญาณ IF มีความถี่สูงกว่าความถี่กลาง สัญญาณจะเข้าใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ของ วงจรจูนชุดบน ฉะนั้นสัญญาณในวงจรจูนชุดบนจะแรง ไดโอด D_1 จะนำกระแสมากกว่าและจะทำให้แรงดันคร่อม D_1 จะมากกว่า D_2 แรงดันคร่อม R_1 เอาท์พุทที่ได้จะมีค่าลบ เพราะแรงดันคร่อม R_1 เป็นลบมีค่ามากกว่าแรงดันที่คร่อม R_2 ซึ่งเป็นบวก

เมื่อพาหะมีความถี่ต่ำกว่าความถี่กลาง สัญญาณจะเข้าใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรชุดล่าง ไดโอด D_2 จะรับสัญญาณแรงกว่า D_1 D_2 จึงนำกระแสมากกว่า D_1 ทำให้แรงดันตกคร่อม R_2 ซึ่งเป็น

บวกเทียบกับกราวด์ มีค่ามากกว่าแรงดันคร่อม R_1 ผลลัพธ์จึงได้แรงดันค่าบวก จะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของสัญญาณเสียง ที่มอดูเลตมาในสัญญาณ FM

ข้อเสียของวงจรดิฟเฟอเรนเชียลชนิดดับเบิลจูนก็คือ การจูนของวงจรโซแนนซ์ที่ 2 วงจรจะต้องสัมพันธ์กันและเที่ยงตรง ถ้าหากวงจรจูนชุดใดชุดหนึ่งผิดไปเล็กน้อย สัญญาณเสียงจะผิดเพี้ยนไปมากทำให้ ทำการปรับจูนได้ยาก

(5.3) ฟอสเตอร์-ซีลีย์ดิสคริมิเนเตอร์ (Foster-Seeley discriminator) – วงจรฟอสเตอร์-ซีลีย์ดิสคริมิเนเตอร์ ดังรูป เป็นวงจรที่แพร่หลายมาก สัญญาณ IF ซึ่งมีความถี่เบี่ยงเบน 75 KHz (ด้วยอัตราเบี่ยงเบนเท่ากับสัญญาณเสียง) ป้อนเข้าที่วงจรจูน L_1C_1 ด้านเอาต์พุตประกอบด้วย ไดโอดและวงจร RC ทำหน้าที่ดีเทกคล้ายๆกับวงจรดับเบิลจูนที่ได้กล่าวมาแล้ว เมื่อไดโอดทั้งคู่นำกระแสเท่ากัน แรงดันที่ปรากฏตกคร่อม R_1 และ R_2 จะเท่ากันและตรงข้ามกัน จึงหักล้างกันและได้เอาต์พุตเป็น 0 แต่ถ้าไดโอด D_1 นำกระแสมากกว่า D_2 เอาต์พุตจะได้ค่าเป็นบวก และถ้าไดโอด D_2 นำกระแสมากกว่า D_1 เอาต์พุตจะได้ค่าเป็นลบ



รูปที่ 5-17 วงจรฟอสเตอร์-ซีลีย์ดิสคริมิเนเตอร์

สัญญาณที่ทำให้ไดโอดนำกระแสได้มากน้อยก็คือสัญญาณ IF ที่ป้อนเข้ามาที่อินพุต ผ่านหม้อแปลงซึ่งประกอบด้วยขดลวดปฐมภูมิ L_1 และขดลวดทุติยภูมิ L_2 กับ L_3 แรงดันที่ปรากฏคร่อม L_2 กับ L_3 จะมีเฟสตรงข้ามกัน (ต่างกัน 180 องศา) แรงดันคร่อม $L_2(E_{L2})$ เป็นตัวควบคุมการนำ

กระแสของไดโอด D_1 ส่วนแรงดันคร่อม $L_3(E_{L3})$ เป็นตัวควบคุมการนำกระแสของไดโอด D_2 อย่ำ
 ลึ่มว่ำ E_{L2} กับ E_{L3} มีแอมพลิจูดเท่ากันแต่เฟสตรงข้าม

นอกจากนี้สัญญาณ IF ถ่ายทอดผ่านเข้ามาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงโดยผ่านทาง C_2
 ต่อกับ L_4 อีกด้วย แรงดันที่ปรากฏของ L_4 ทำหน้าที่ควบคุมการนำกระแสของไดโอดทั้ง 2 ตัว การ
 ถ่ายทอดผ่าน C_2 มายัง L_4 ทำให้แรงดันที่ปรากฏคร่อม $L_4(E_{L4})$ จะมีเฟสต่างจากแรงดัน E_{L2} และ E_{L3}
 อยู่ 90 องศา ในขณะที่สัญญาณ IF อยู่ที่ความถี่กลาง กล่าวคือ E_{L4} มีเฟสนำหน้า E_{L3}
 อยู่ 90 องศา ในขณะที่สัญญาณอยู่ที่ความถี่กลาง แต่ E_{L4} มีเฟสหลัง E_{L2} อยู่ 90 องศา

การนำกระแสของไดโอด D_1 จะขึ้นอยู่กั บ E_{L3} และ E_{L2} ส่วนการนำกระแสของไดโอด D_2
 จะขึ้นอยู่กั บ E_{L3} และ E_{L4} เนื่องจาก E_{L2} กับ E_{L3} ต่างเฟสกัน 180 องศา และที่ความถี่กลาง E_{L4} จะต่าง
 เฟสกับทั้ง E_{L2} และ E_{L3} อยู่ 90 องศา ฉะนั้นที่ความถี่กลาง E_{L4} เมื่อรวมกับ E_{L2} จะเท่ากับ E_{L4} รวมกับ
 E_{L3} ทำให้ไดโอด D_1 กับ D_2 นำกระแสเท่ากัน เกิดแรงดันหักล้างได้เอาที่พุทเป็น 0

ที่ความถี่กลาง วงจรเรโซแนนซ์ (ทางด้านทุติยภูมิ) จะเป็นเฉพาะตัวด้านทาน (เพราะรีแอก
 แตนซ์ X_L กับ X_C จะหักล้างกันพอดี) เมื่อความถี่สูงขึ้น X_L จะมากกว่า X_C ฉะนั้นเฟสของ E_{L2} กับ
 E_{L3} จะเลื่อนไป แต่ทั้ง 2 ก็ยังรักษาเฟสเป็นตรงข้ามกัน (180 องศา) อยู่เสมอ E_{L2} จะเลื่อนเฟสเข้าหา
 E_{L4} และ E_{L3} จะเลื่อนเฟสหนี E_{L4} นั่นคือ E_{L2} กับ E_{L4} จะเสริมกัน แต่ E_{L3} กับ E_{L4} จะหักล้างกัน ผลก็
 คือ D_1 จะนำกระแสมากกว่า D_2 เอาที่พุทที่ได้จะมีค่า บวก เมื่อสัญญาณ IF แกว่งไปทางบวก (สูงกว่า
 ความถี่กลาง) ซึ่งสอดคล้องกับความถี่ที่จูนได้ของชุดบน

ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ X_C จะมีค่ามากกว่า X_L เฟสของ E_{L2} กับ E_{L3} จะเลื่อนไป
 ในลักษณะที่ E_{L3} เสริมกับ E_{L4} ทำให้ D_2 นำกระแสมากกว่า D_1 ทำให้เกิดเอาที่พุทเป็นค่าลบทุกครั้ง
 ที่สัญญาณ IF แกว่งไปทางลบ (ต่ำกว่าความถี่กลาง) ทำนองเดียวกันกับชุดบนแต่จูนให้มีความถี่ต่ำ
 กว่าความถี่กลาง

ถ้าสัญญาณที่มอดูเลตบน IF เป็นโทนเสียง มีความถี่ 1000 Hz สัญญาณ IF จะแกว่งไปมา
 ระหว่างความถี่กลางไปทางบวกและลบด้วยอัตรา 1000 ครั้งต่อวินาที เอาที่พุทจากวงจรดีสคริมิเน
 เตอร์จะเกิดเป็นสัญญาณรูปซายน์ ซึ่งเป็นค่าบวกและลบด้วยอัตรา 1000 Hz นั่นคือ วงจรดีสคริมิ
 เตอร์ คีมอดสัญญาณที่มอดูเลตคืนกลับมาได้เหมือนสัญญาณเดิม

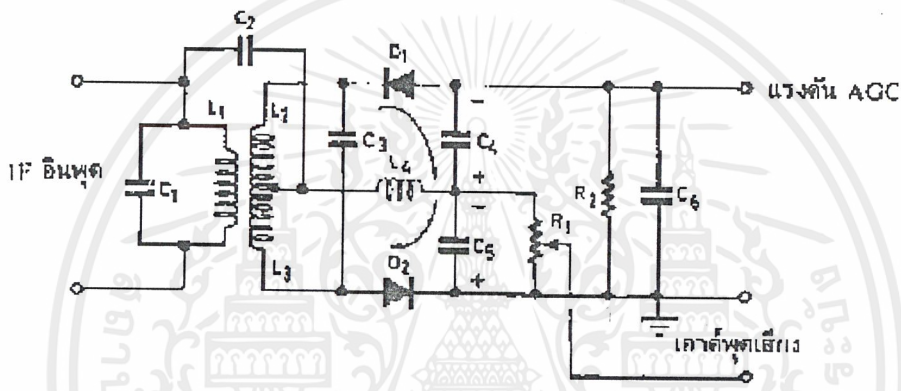
ข้อเสียของวงจรฟอสเตอร์-ซีลี่ยดีสคริมิเนเตอร์ ก็เหมือนกับวงจรคีมอด FM ที่กล่าวมาแล้ว
 ในตอนต้น กล่าวคือ มีความไวต่อการเปลี่ยนแอมพลิจูด ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีมีสัญญาณ FM ที่มี
 นอยส์มาจับบนสัญญาณนอยส์นี้จะถูกคิเทกและป้อนไปยังเอาที่พุทได้

อย่างไรก็ตามเราสามารถแก้ไขได้โดยการขลิบสัญญาณ FM ทางบวกและลบเพื่อรักษาแอมพลิจูดให้
 สม่ำเสมอ รวมทั้งกำจัดนอยส์ไปในตัวด้วย วงจรที่ทำหน้าที่กำจัดแอมพลิจูดหรือขลิบสัญญาณ FM
 นี้เรียกว่า วงจรลิมิตเตอร์ (Limiter) ดังนั้นก่อนที่สัญญาณ FM (ที่มีความถี่ IF) จะถูกคีมอด จะต้อง
 นำมาผ่านวงจรลิมิตเตอร์เสียก่อน เพื่อกำจัดนอยส์ที่ปะปนมาในแอมพลิจูดของสัญญาณ FM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(5.4) เรโซดิเทกเตอร์ (Ratio detector) – วงจรเรโซดิเทกเตอร์ (Ratio detector) นี้คล้ายคลึงกับวงจรฟอสเตอร์ - ซีลีย์คริสตริมินเตอร์มากแตกต่างกันตรงที่ไดโอด D_1 ต่อกลับทางกัน และเอาท์พุทออกจากกันคนละแห่งกับวงจรฟอสเตอร์-ซีลีย์คริสตริมินเตอร์ วงจรเรโซดิเทกเตอร์นี้เป็นวงจรที่ได้รับความนิยมมากเพราะเป็นวงจรที่ทำหน้าที่ลิมิตเตอร์ (จำกัดแอมพลิจูด) ในตัวด้วย จึงไม่ต้องเพิ่มวงจรมลิมิตเตอร์ ก่อนที่จะดีเทกแยกต่างหากอีก

การที่ไดโอด D_1 ต่อกลับทาง จะทำให้ไดโอดทั้งคู่ต่ออนุกรมคร่อมขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง การนำกระแสของไดโอดทั้งคู่ยังคงขึ้นอยู่กับแรงดันคร่อม L_2 กับ L_3 และ L_4 ที่ความถี่กลาง ไดโอดทั้งคู่จะนำกระแสเท่ากัน แต่ในกรณีนี้แรงดันที่ประจุแก่ C_4 และ C_5 จะต่ออนุกรม มิให้หักล้างกันดังเช่นวงจรคริสตริมินเตอร์



รูปที่ 5-18 วงจรเรโซดิเทกเตอร์

สังเกต C_6 ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุค่าสูง เพื่อรักษาแรงดันคร่อม R_2 ให้คงที่ (หลังจากที่ป้อนอินพุทแก่วงจรเรโซดิเทกเตอร์แล้ว แรงดันที่ประจุให้แก่ C_6 จะเป็นสัดส่วนกับค่าระดับความแรงของสัญญาณ FM โดยเฉลี่ย) นอกจากนี้แรงดันคร่อม C_4 กับ C_5 ก็จะคงที่ด้วย แรงดันนี้จะคงที่ถ้าสัญญาณ FM มีแอมพลิจูดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย (เช่น มินอยส์) นี่คือเหตุผลที่วงจรเรโซดิเทกเตอร์มีภูมิคุ้มทานนอยส์ภายในตัวเอง แรงดันคร่อม C_6 ยังใช้เป็นแรงดันไฟ AGC ได้อีกด้วย (เพราะแรงดันคร่อม C_6 เป็นสัดส่วนกับความแรงของสัญญาณ)

แรงดันคร่อม C_5 รวมกับแรงดันคร่อม C_4 จะเท่ากับแรงดันคร่อม C_6 ที่ความถี่กลางได้ โดยที่ D_1 และ D_2 จะนำกระแสเท่ากัน แรงดันคร่อม C ทั้งคู่จะเท่ากัน แรงดันคร่อม C_5 ต่อมาจาก R_1 (ซึ่งปรับค่าได้) ใช้เป็นแรงดันเอาท์พุท ซึ่งอาจมีไฟ DC ค่าลบปนออกมาด้วย

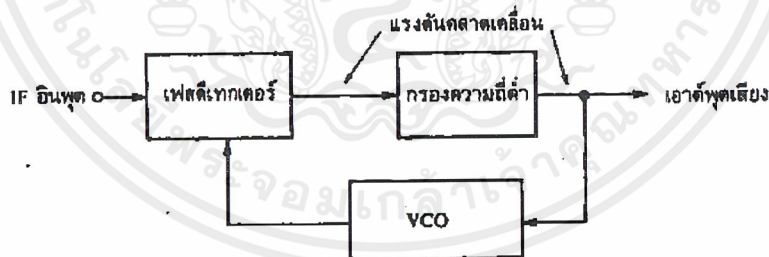
ไดโอด D_1 และ D_2 จะนำกระแสสวนกันน้อยสลับกัน เมื่อสัญญาณ IF แกว่งไปมาระหว่างความถี่กลาง ผลต่างของการนำกระแสไม่เท่ากัน จะปรากฏเป็นกระแสที่ไหลผ่าน L_4 เช่น เมื่อ D_1 นำกระแสมากกว่า D_2 แรงดันคร่อม C_4 จะมากกว่าแรงดันคร่อม C_5 แต่เนื่องจากแรงดันผลรวม (เท่ากับ

แรงดันคร่อม C_6) ถูกดึงเอาไว้ให้คงที่ ฉะนั้นแรงดันคร่อม C_5 จะต้องลดลง นั่นคือเอาท์พุทจะมีค่าลดลง

เมื่อไดโอด D_2 นำกระแสมากกว่า แรงดันคร่อม C_5 จะมีค่ามากกว่า ฉะนั้นเอาท์พุทจะมีค่าสูงขึ้นจะเห็นว่าแรงดันเอาท์พุทจะแกว่งไปค่าบวกหรือลบ ตามการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณ IF เช่น เมื่อความถี่ IF สูงขึ้น แรงดันเอาท์พุทจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความถี่ IF ลดลงแรงดันเอาท์พุทจะมีค่าลดลง

ข้อดีของวงจรรเรโซตีเทคเตอร์ก็คือ มีการจำกัดแอมพลิจูดไปในตัว และมีแรงดัน AGC ให้ต่อไปใช้ได้เลย ไม่ต้องใช้วงจรพิเศษเพิ่มเติมอีก

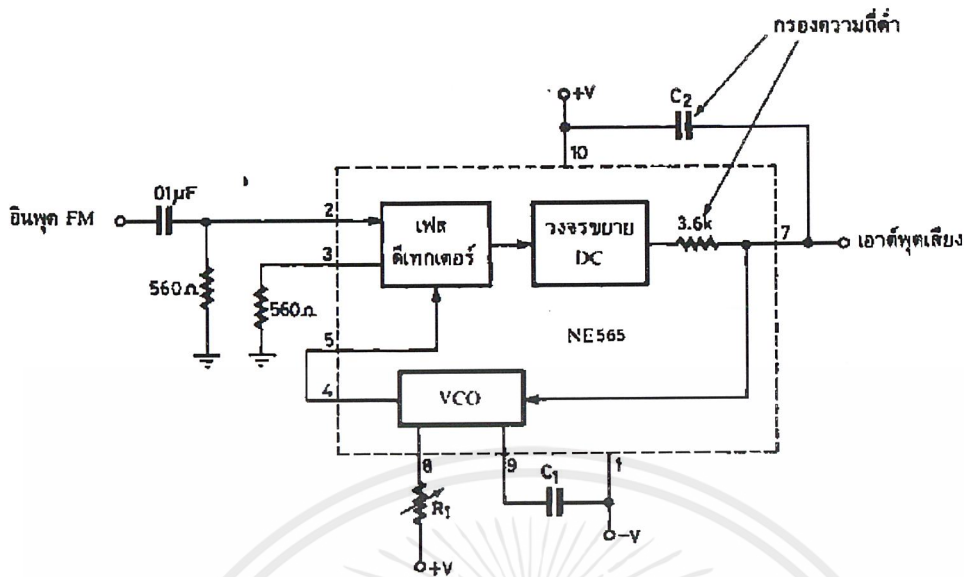
(5.5) วงจรมอดชูนิด PLL (Phase-Locked Loop detector) – เราสามารถใช้วงจรรเฟสล็อกลูป (Phase-locked loop หรือ PLL) ในการมอดชูนิดสัญญาณ FM ได้ดังรูป วงจร PLL นี้มักเป็นไอซีซึ่งใช้งานได้สะดวก วงจร PLL ประกอบด้วยเฟสดีเทกเตอร์ ฟิลเตอร์ชนิดโลพาส (ความถี่ต่ำผ่าน) และออสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน (Voltage Controlled Oscillator หรือ VCO) วงจร VCO นี้จะออสซิลเลตที่ความถี่อินพุท IF วงจรเฟสดีเทกเตอร์จะทำหน้าที่เปรียบเทียบความถี่ของสัญญาณอินพุทกับสัญญาณจาก VCO ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นแรงดันที่ความถี่ของ VCO คลาดเคลื่อนไปจากความถี่อินพุท เรียกว่า แรงดันคลาดเคลื่อน (Error voltage) แรงดันนี้มีค่าเป็นสัดส่วนกับผลต่างของความถี่อินพุทกับ VCO แรงดันนี้จะนำไปกรองโดยฟิเตอร์ชนิดโลพาสเพื่อกำจัดสัญญาณความถี่สูงๆ ที่ปะปนทิ้งไป ฟิเตอร์ดังกล่าวนิยมเรียกว่า ลูบฟิเตอร์ จะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของวงจรร PLL เช่น ช่วงความถี่ที่ลูบจะล็อก รวมทั้งช่วงเวลาที่ลูบใช้ในการล็อกความถี่กับอินพุท



รูปที่ 5-19 แผนผังของวงจรมอดชูนิดเฟสล็อกลูป (PLL)

แรงดันที่คลาดเคลื่อนหลังจากกรองความถี่ด้วยโลพาสฟิเตอร์แล้ว จะนำไปควบคุมความถี่ของ VCO ตัวอย่างเช่น เมื่อความถี่ของอินพุทเปลี่ยนไปทางบวก(สูงขึ้น) แรงดันคลาดเคลื่อนจะเกิดในที่เอาท์พุทของเฟสดีเทกเตอร์ แรงดันนี้จะถูกกรองและนำไปบังคับ VCO ให้ออสซิลเลตที่ความถี่สูงเพิ่มตามความถี่อินพุท เมื่อสัญญาณอินพุทที่ป้อนเข้ามาเป็นสัญญาณ FM VCO จะพยายามเปลี่ยนความถี่ตามการเบี่ยงเบนไปจากความถี่กลางของสัญญาณ FM ฉะนั้นแรงดันคลาดเคลื่อนก็จะเป็นสัญญาณที่มอดูเลต (หลังจากเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณอินพุทกับ VCO แล้ว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-20 เฟสล็อกที่ใช้ IC

ตัวอย่างของไอซีซิกเนติกส์ เบอร์ NE565 ดังรูปที่ 5-20 ซึ่งเป็น PLL จะเห็นว่า $R_1 C_1$ เป็นตัวกำหนดช่วงความถี่ทำงานของ VCO C_2 และตัวต้านทานภายใน 3.6 กิโลโอห์ม จะต่อกันเป็นฟิลเตอร์ชนิดโลพาสซ้อแตกต่างของวงจรมายกับแผนผังในรูป 5-19 ก็คือ ใน ไอซีจะมีวงจรมาย DC เพื่อขยายสัญญาณคลาดเคลื่อน (Error signal) ให้มากขึ้นก่อนที่จะป้อนไปให้ฟิลเตอร์ ข้อดีของวงจรมาย PLL ก็คือ มีคุณภาพดี ราคาประหยัด ใช้งานอุปกรณ์น้อย นอกจากนี้ยังไม่ต้องใช้หม้อแปลงและคอยล์ จึงไม่จำเป็นต้องมีการปรับจูนแต่อย่างใด

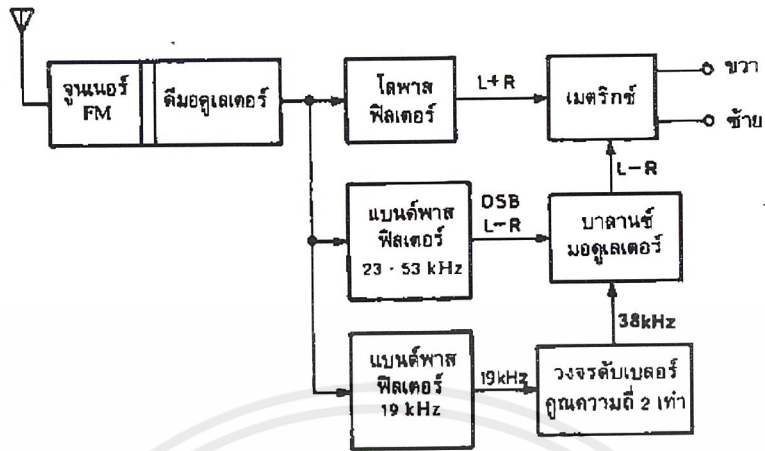
6. วงจร AFC (Automatic Frequency Control) – คอยควบคุมความถี่ OSC ให้ผสมกับความถี่ RF แล้วได้ความถี่ IF 10.7 MHz เนื่องจากในระบบ FM ความถี่ IF จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีสัญญาณเสียงด้าน + และด้าน - มาผสม AFC จะทำให้ได้สัญญาณ IF ที่ถูกต้อง AFC จะถูกส่งมาจากภาคดีเทกเตอร์และจะทำงานโดยอัตโนมัติ

7. ภาคขยายเสียง (AF Amplifier) - ทำหน้าที่ขยายเสียงที่ส่งออกมาจากภาคดีเทกเตอร์ให้มีระดับความแรงมากขึ้นแบบไม่ผิดเพี้ยนพอที่จะไปขับลำโพงให้มีเสียงออกมา

เครื่องรับวิทยุ FM สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์

เครื่องรับสเตอริโอประกอบด้วยจูนเนอร์ FM และวงจรมอดูเลเตอร์ เพื่อใช้ในการมอดูเลตสัญญาณมัลติเพล็กซ์ สัญญาณดังกล่าวจะถูกกรองแยกเอาแต่ละส่วนออกมาโดยใช้ฟิลเตอร์ชนิดโลพาสซ ซึ่งจะให้ความถี่ต่ำผ่านและกรองเอาสัญญาณ (L+R) ในย่าน 50Hz-15KHz และใช้ฟิลเตอร์

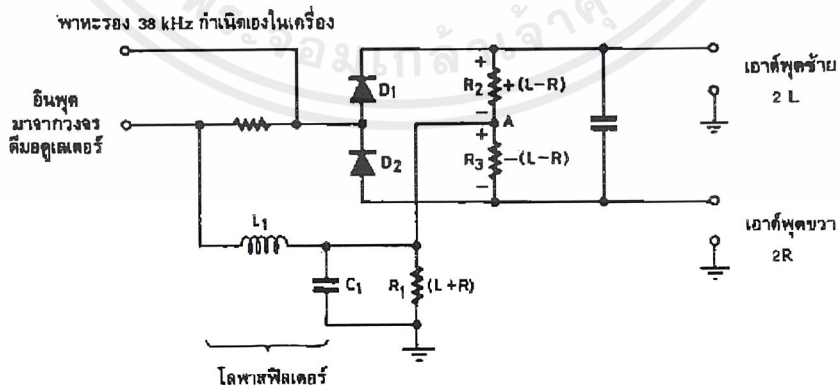
ชนิดแบนด์พาสเพื่อกรองสัญญาณ DSB ของสัญญาณ (L-R) ในย่านความถี่ 23-53 KHz ส่วนสัญญาณไฟลิต 19 KHz จะกรองโดยใช้ฟิลเตอร์ชนิดแบนด์พาส 19 KHz



รูปที่ 5-21 เครื่องรับวิทยุ FM สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์

สัญญาณไฟลิต 19 KHz จะผ่านการคูณ 2 กลายเป็นพาหะรอง 38 KHz ที่มีทั้งความถี่และเฟสสอดคล้องกับสัญญาณพาหะรองที่เครื่องส่ง หลังจากนั้นพาหะจะถูกป้อนไปยังวงจรมอดูเลเตอร์ (Balance Modulator) เพื่อทำการมอดูเลตจะได้สัญญาณ (L-R) ออกมา สัญญาณ (L+R) และ (L-R) ที่ได้จากวิธีการข้างต้นจะนำไปผสมกันที่วงจรมATRIX เพื่อบวกลบสัญญาณให้เกิดเป็นสัญญาณเสียงแชนแนล ซ้าย (L) และแชนแนลขวา (R) เพื่อแยกเสียงออกยังลำโพงแต่ละข้าง

การดีมัลติเพล็กซ์ (Demultiplex)



รูปที่ 5-22 วงจรแยกสัญญาณสเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ ออกเป็นเสียงข้างซ้ายและข้างขวา

จากรูป แสดงวงจรมัลติเพล็กซ์อย่างง่าย จะเห็นว่าเอาท์พุทจากมอดูเลเตอร์ FM จะแยกเป็น 2 ทาง ทางหนึ่งคือสัญญาณ (L+R) ผ่านฟิลเตอร์ชนิด โลพาส L_1C_1 เป็นแรงดันตกคร่อม R_1 และอีกทางหนึ่งคือสัญญาณ (L-R) ซึ่งเป็น DSB ความถี่ 38 KHz จะเข้าสู่จุดศูนย์กลางของไดโอด D_1D_2 ทำการตีเทกเป็นสัญญาณเสียง (L-R) เกิดแรงดันตกคร่อม R_2 และ R_3 เนื่องจากการต่อไดโอดเป็นไปในลักษณะที่ทำให้แรงดันคร่อม R_1 และ R_3 เทียบกับจุด A มีเฟสตรงข้ามกัน

ฉะนั้นแต่ละแขนแนลจะเป็นผลรวมของสัญญาณดังนี้

$$\text{แขนแนลซ้าย (L) : } +(L-R)+(L+R) = 2L$$

$$\text{แขนแนลขวา (R) : } -(L-R)+(L+R) = 2R$$

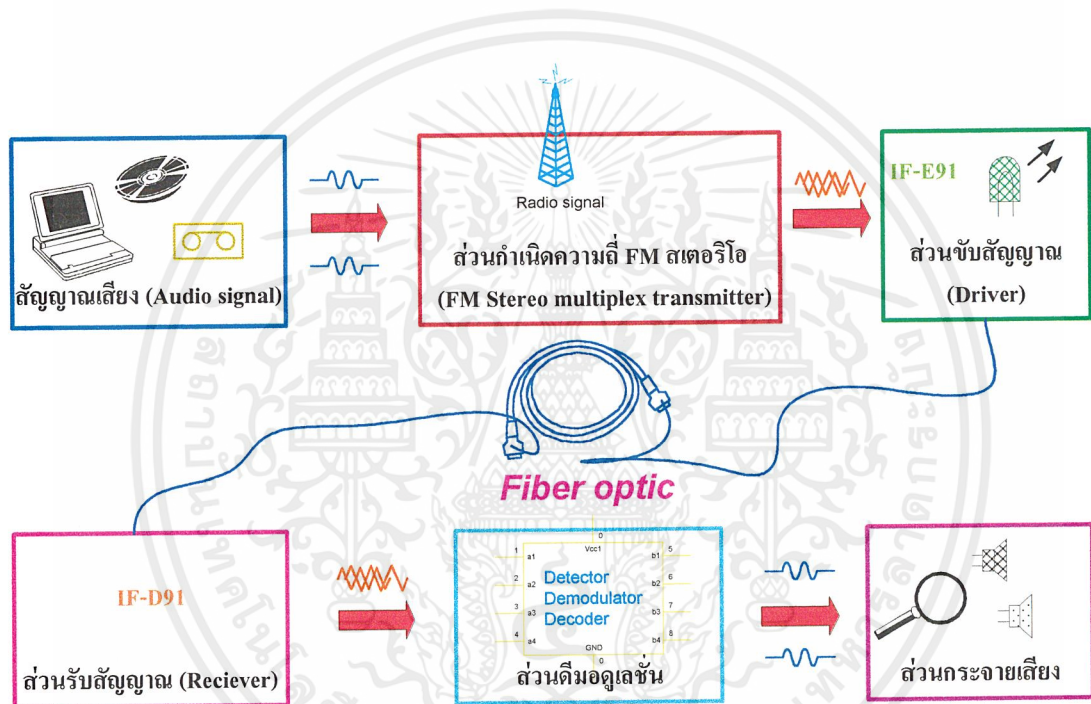
สัญญาณแขนแนลซ้ายกับขวาจะผ่านการขยายไปสู่ลำโพงข้างซ้ายและข้างขวาแยกเสียงให้เป็น สเตอริโอ



บทที่ 6

หลักการและแนวคิดในโครงการ

หลักการและแนวคิดของ การเชื่อมต่อสัญญาณ FM สเตอริโอโมดูลิเฟล็กซ์ เข้ากับเส้นใยแก้วนำแสงก็คือ การประยุกต์นำเอาระบบ FM สเตอริโอ ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ซึ่งส่งสัญญาณผ่านตัวกลาง คือ อากาศ มาปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงให้สามารถส่งสัญญาณ FM ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงได้ ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เนื่องจากช่วงการทำงานของเส้นใยแก้วนำแสง ค่อนข้างกว้าง โดยระบบทั้งหมดของโครงการสามารถสรุปอย่างคร่าวๆ เป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



รูปที่ 6-1 แผนผังแสดงระบบของโครงการทั้งหมด

6.1 สัญญาณเสียง

ส่วนนี้ก็คือ สัญญาณเสียง (AF:Audio frequency) ทั่วไป สามารถใช้แหล่งกำเนิดเสียงจาก เครื่องเล่นเทป ,เครื่องเล่น CD หรือ ซาวด์บ็อกซ์ อย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้ โดยสัญญาณต้องเป็นระบบสเตอริโอ คือ มีการแยกสัญญาณ ระหว่างแชนแนล ซ้าย(L) และ ขวา(R)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ส่วนกำเนิดความถี่ FM สเตอริโอ (FM stereo transmitter)

ส่วนนี้ทำหน้าที่นำสัญญาณเสียงจากแหล่งกำเนิดข้างต้น มาทำการผสมคลื่นทางความถี่หรือ Frequency Modulation โดยอาศัย คลื่นพาหะรอง (Subcarrier) , มัลติเพล็กซ์ และ ขยายสัญญาณ ลักษณะของสัญญาณ FM ที่ได้จะมีแอมพลิจูดคงที่ แต่ความถี่จะเปลี่ยนแปลงตามความถี่และแอมพลิจูดของสัญญาณเสียง ที่เข้ามาผสม

6.3 ส่วนขับสัญญาณ (Driver)

ส่วนขับสัญญาณจะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้า ให้เป็นสัญญาณแสง เพื่อส่งไปตามเส้นใยนำแสง

6.4 ส่วนรับสัญญาณ (Receiver)

ส่วนนี้จะรับสัญญาณแสงที่ผ่านมาจากเส้นใยแก้วนำแสงเพื่อเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่ง

- ส่วนขยายสัญญาณ ส่วนนี้จะรวมอยู่ภายในส่วนรับสัญญาณด้วย มีหน้าที่ทำให้สัญญาณไฟฟ้าที่ถูกแปลงออกมาจากสัญญาณแสง มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อให้ส่วนของคีมอดูเลชันทำงานได้

6.5 ส่วนคีมอดูเลชัน

สัญญาณไฟฟ้าที่ออกมาจากส่วนรับสัญญาณ ก็คือ สัญญาณ FM สเตอริโอ อยู่ แต่จะมีความผิดเพี้ยนไปบ้าง เนื่องจากสาเหตุหลายประการ สัญญาณดังกล่าวจะถูกนำมา คีมอดูเลชันให้เป็นสัญญาณเสียง ด้านซ้าย(L) และ ด้านขวา (R) โดยวงจรคีมอดูเลชันหรือ ดีเทกเตอร์ ในโครงการนี้ ใช้เป็นชนิด PLL หรือ Phase Lock Loop Detector

6.6 ส่วนกระจายเสียง

สัญญาณเสียงทั้ง 2 ด้าน จะถูกต่อเข้ากับลำโพง ซึ่งต้องผ่านภาคขยายสัญญาณเสียงก่อน เพื่อให้สัญญาณมีความแรงพอที่จะดังออกทางลำโพงได้

บทที่ 7

การออกแบบวงจรที่ใช้ในโครงการ

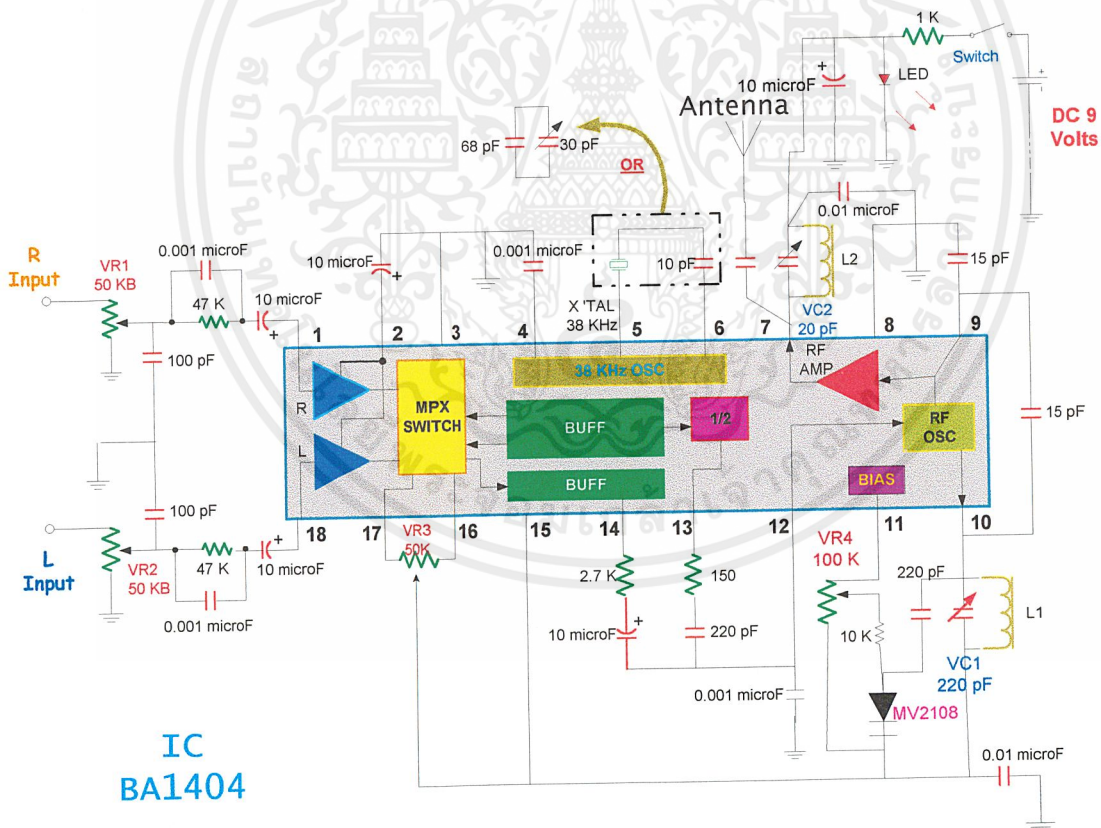
ในส่วนของวงจรที่ใช้ในโครงการนี้ สามารถแบ่งเป็นส่วนสำคัญได้ 2 ส่วนใหญ่ๆ ดังนี้

1. วงจรภาคส่ง (Transmitter circuit)
2. วงจรภาครับ (Receiver circuit)

ในบทที่ผ่านมา ได้สรุปถึงหน้าที่ของแต่ละส่วนอย่างคร่าวๆ เป็นบล็อกไดอะแกรมไปแล้ว ในส่วนนี้จะกล่าวถึงรูปวงจรที่ใช้จริง รวมทั้งหลักการการทำงานของแต่ละวงจร ดังต่อไปนี้

7.1 วงจรภาคส่ง

7.1.1 วงจรกำเนิดความถี่ FM สเตอริโอ (FM stereo transmitter)



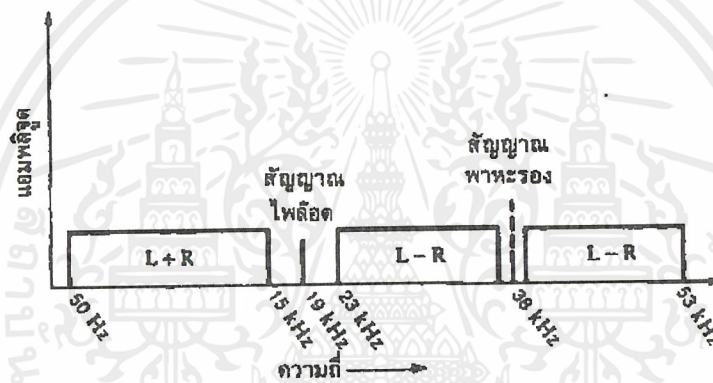
รูปที่ 7-1 วงจรกำเนิดความถี่ FM สเตอริโอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทำงานของวงจร ก็คือ สัญญาณเสียงจากแหล่งกำเนิดต่างๆ จะถูกป้อนเข้าที่ภาคขยายซ้ายและภาคขยายขวาโดยมีตัวปรับระดับสัญญาณให้มีความแรงเหมาะสม และผ่านวงจรปริเอมฟาซิสเพื่อยกผลระดับตอบสนองต่อความถี่สูง

สัญญาณทั้งซ้ายและขวาจะถูกป้อนให้ภาคมัลติเพล็กซ์สวิทช์ ที่ทำงานด้วยความถี่ 38 KHz ได้เป็นสัญญาณผลบวก (L+R) และผลต่าง (L-R) ซึ่งเป็นการมอดูเลตแบบ AM แบบกับ ความถี่ 38 KHz นั้นเอง คลื่นพาหะ 38 KHz จะถูกกำจัดออกไป ได้เป็นสัญญาณดับเบิลไซด์แบนด์โดยลำพังส่งให้ภาคบัฟเฟอร์ต่อไป

จากนั้นสัญญาณจะถูกผสมเข้ากับสัญญาณ 19 KHz ที่ได้ จากความถี่ 38 KHz หาก 2 ผลรวมของสัญญาณดับเบิลไซด์แบนด์กับ ความถี่ไฟลิต 19 KHz ได้เป็นสัญญาณผลรวมก็จะถูกมอดูเลตแบบ FM กับความถี่ชุดที่ 2 ซึ่งเป็นคลื่นพาหะหลัก แล้วถูกกรองและขยายที่ภาคขยายความถี่วิทยุ ส่งต่อไปยังสายอากาศเพื่อกระจายคลื่นต่อไป เราย้อนกลับไปพิจารณารูปที่ 5-5 อีกครั้ง



รูปที่ 5-5 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณในระบบสเตอริโอ มัลติเพล็กซ์

สัญญาณผลรวมที่ได้จากภาคมัลติเพล็กซ์เซอร์ สัญญาณ (L+R) จะครอบคลุมช่วงความถี่จาก 0-15 KHz สัญญาณดับเบิลไซด์แบนด์ที่ถูกกำจัดคลื่นพาหะย่อย 38 KHz จะครอบคลุมช่วงความถี่ 23-53 KHz ซึ่งเป็นสัญญาณ (L-R)

ความถี่สัญญาณไฟลิต 19 KHz จะถูกนำไปใช้ในการสร้างคลื่นพาหะย่อยที่เครื่องรับสำหรับตีมอดูเลตสัญญาณ (L-R) เพื่อให้ได้สัญญาณสเตอริโอที่ครบถ้วน

อุปกรณ์แต่ละตัวที่ประกอบขึ้นเป็นวงจรสามารถอธิบาย หน้าที่ได้ดังนี้

สัญญาณเสียงจะป้อนเข้ามาที่ VR1 และ VR2 และมี R และ C 2 ตัว เป็นวงจรปริเอมฟาซิสแต่ละข้าง สัญญาณที่ได้จะถูกป้อนเข้าที่ขา 1 และ 18 ของ IC ตามลำดับ

ตัวเก็บประจุ 10 μF ที่ขา 2 ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุบายพาสให้กับภาคขยายสัญญาณเสียงภายใน ซึ่งสัญญาณเสียงซีกซ้ายและซีกขวาจะถูกป้อนให้ภาคมัลติเพล็กซ์สวิทช์ โดยมี VR3 เป็นตัวควบคุมการแยกช่องซ้ายและขวาให้ดีที่สุด

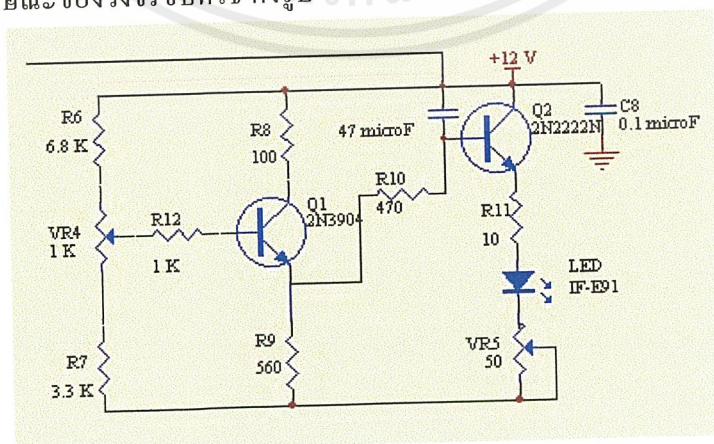
ภาคกำเนิดความถี่คลื่นพาหะย่อย 38 KHz ถูกควบคุมด้วยคริสตอล X'TAL ผลิตความถี่เดียวกันโดยต่อที่ขา 5 และ 6 ในส่วนนี้เราสามารถใส่ตัวเก็บประจุขนาด 68 pF ขนานกับทรินเมอร์ 30 pF ต่อคร่อมที่ตำแหน่งเดียวกันแทนได้ โดยใช้ OSC วัตความถี่ที่ขา 13 แล้วหมุนทรินเมอร์ ให้ได้ 19 KHz

สัญญาณจากภาคมัลติเพล็กซ์ที่เป็นผลบวก (L+R) และผลต่าง (L-R) จะผ่านบัฟเฟอร์ภายใน ป้อนออกมาที่ขา 14 เพื่อผสมกับความถี่ไฟลิตที่ขา 13 จากนั้นจึงป้อนสัญญาณผลรวมกลับเข้าไปที่ขา 12 เพื่อมอดูเลตทางความถี่แบบ FM โดยมีวงจรแท่งคออสซิลเลเตอร์ VC และ L เป็นตัวปรับความถี่ที่ขา 10

ความถี่ของคลื่นพาหะหลักที่ขา 10 นอกจากจะใช้วิธีปรับเปลี่ยนความถี่ด้วย VC สามารถใช้วารีแคป D1 ร่วมกับ VR ในการปรับเปลี่ยนความถี่ได้ สัญญาณที่มอดูเลตสมบูรณ์แล้วจะถูกขยายขึ้นต้นภายใน IC เอง แล้วส่งออกมาที่ขา 7 มี VC และ L เป็นวงจรจูนเอาท์ ให้ได้เอาท์พุทที่มีกำลังสูงสุด

7.1.2 วงจรขับ (Driver)

วงจรขับในส่วนนี้จะทำหน้าที่รับสัญญาณที่ทำการมอดูเลตแบบ FM มาทำการมอดูเลตแบบอินเทนซิติ (Intensity modulation) คือ เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสง ที่มีขนาดความเข้มของแสงเปลี่ยนไปตามแอมพลิจูด และความถี่สัญญาณไฟฟ้าในวงจรนี้ใช้ Infrared LED เบอร์ IF-E91B เป็นตัวส่งให้มีความยาวคลื่นพีค (Peak wavelength) อยู่ในช่วง 880 nm และสามารถให้กำลังแสงได้ถึง 100 μ W ความต่างศักย์ที่ใช้ในการ Forward ให้ LED ทำงาน มีค่าประมาณ 1.7 V รายละเอียดอื่นๆ ดูได้จาก Data sheet พิจารณาวงจรขับสัญญาณอนาล็อก เราจะสามารถประมาณค่ากระแสในวงจรที่ต้องใช้ขับ LED ให้อยู่ในช่วง 30-50 mA เพราะในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขับ LED กับกำลังแสงที่ออกจาก LED จะเป็นเชิงเส้น (Linear) และให้กำลังทางแสงออกมา ได้เป็นลักษณะของวงจรขับที่ใช้ ดังรูป



รูปที่ 7-2 วงจรขับ LED (IF-E91B) ที่ใช้ในโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรภาคสุดท้ายเราเลือกใช้วงจรขับกระแสแบบ Common collector เนื่องจากไม่คำนึงถึงอัตราขยายแรงดันทางเอาต์พุท เพียงต้องการอัตราขยายกระแสที่ขับ LED ดังนั้นจึงเลือกใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N2222A เพราะสามารถตอบสนองความถี่ได้ถึง 400 MHz ให้กระแส I_C ได้สูงถึง 400 mA ส่วนวงจรภาคแรกคือวงจรขยายซึ่งสามารถปรับเปลี่ยน กระแสไบอัส ได้จากตัวต้านทานปรับค่าได้ VR_4 ทำให้กระแสอิมิตเตอร์ I_{E1} ที่ควบคุมกระแสเบส I_{B2} เปลี่ยน มีผลทำให้ระดับกระแสดีซี I_{DC} ให้มีค่าประมาณ 40 mA โวลเตจที่ตกคร่อม LED ไม่ให้มีค่ามากเกินไป ซึ่งอาจทำให้ LED เกิดความเสียหายได้ ส่วนตัวเก็บประจุ 47 μF จะทำหน้าที่คัปปลิงสัญญาณ FM ที่ถูกส่งออกมาจากวงจรกำเนิดความถี่ FM จากวงจรสามารถคำนวณหาค่ากระแสที่ผ่าน LED ได้ดังนี้

กำหนด $VR_4 = 1 K$ หา V_{th}

$$V_{th} = \frac{3.3 + 1}{3.3 + 1 + 6.6} \times 12$$

$$= 4.65 \text{ V}$$

หา V_{E1} โดยสมมติให้ I_{B1} มีค่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้

$$V_{E1} = V_{th} - V_{BE1}$$

$$= 4.65 - 0.7$$

$$= 3.95 \text{ V}$$

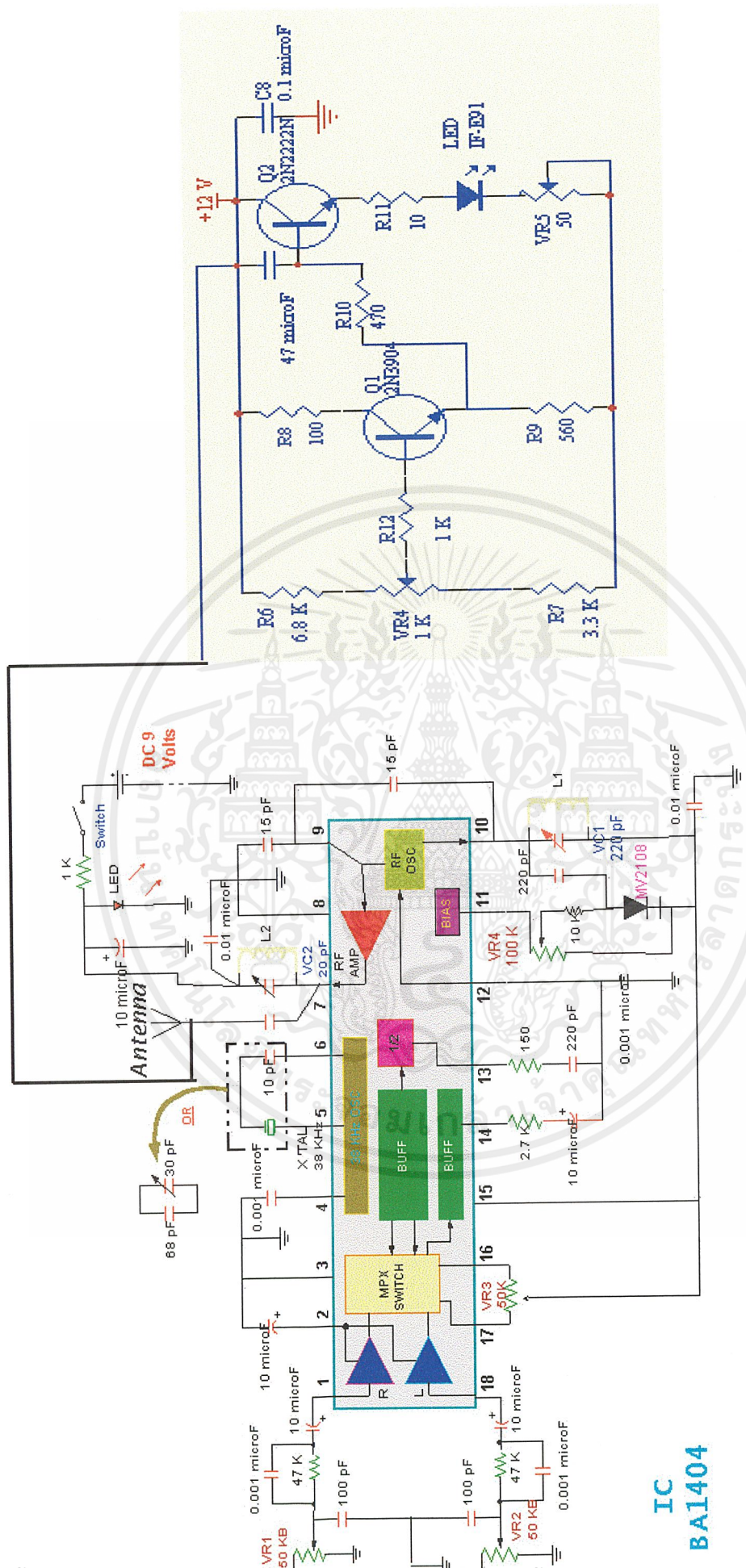
หา I_{DC} ที่ไบอัสตัว LED และให้ I_{BE} มีค่าน้อยมาก : $V_R = 30 \text{ Ohms}$

$$I_{DC} = \frac{V_{E1} - V_{BE1} - V_{LED}}{10 + 30}$$

$$= \frac{4.95 - 0.7 - 1.5}{10 + 30}$$

$$= 43.75 \text{ mA}$$

วงจรสมบูรณข์ของภาคส่งแสดงดังรูปที่ 7-3



รูปที่ 7-3 วงจรสมบูรณ์ของภาคส่ง

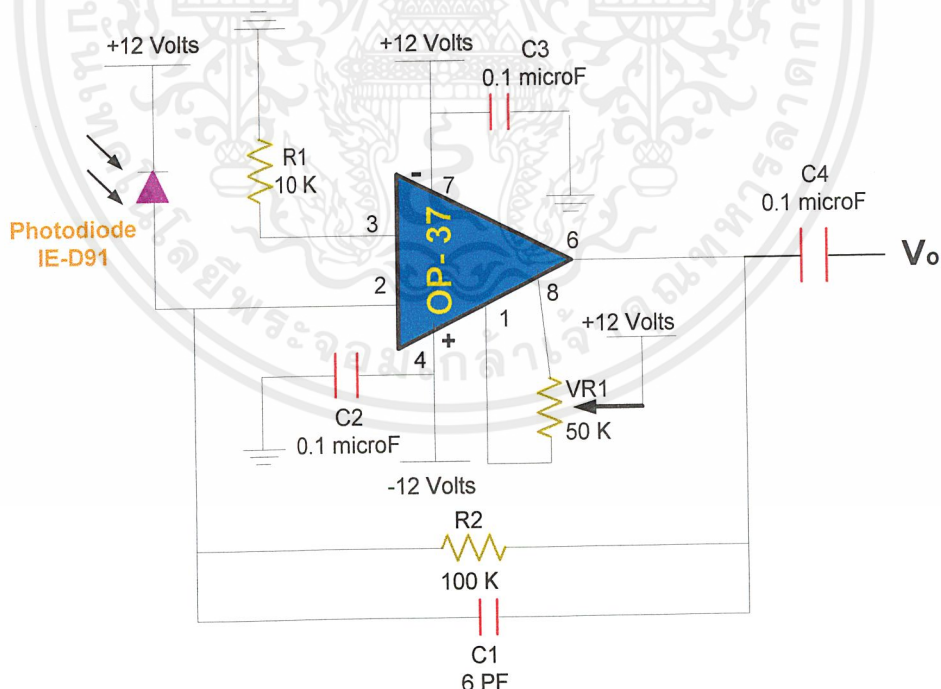
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 วงจรภาครับ

7.2.1 วงจรรับสัญญาณ

วงจรนี้ประกอบด้วยวงจรย่อยๆ ภายในอีก 2 ส่วน คือ

(1) ภาคก่อนขยายแบบทรานซิมพีแดนซ์ (Transimpedance) – พิจารณาการออกแบบทางภาครับ สิ่งแรกที่จะต้องคำนึงถึงก็คือ ระดับพลังงานต่ำสุดของสัญญาณที่สามารถรับได้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น คุณสมบัติของช่วงห่างความถี่ (Bandwidth) ของโฟโตไดโอด , ระดับ S/N (Signal-to-noise ratio) ของระบบ ในการออกแบบวงจรที่ใช้ในโครงการนี้ จะใช้ PIN โฟโตไดโอดทำงานอยู่ในโหมดโฟโตคอนดักทีฟ (Photoconductive) คือ ให้รีเวิร์สไบอัส แก่ไดโอด และทำการต่อวงจรแบบทรานซิมพีแดนซ์ หรือ วงจรแปลงกระแสเป็นความต่างศักย์ (Current-to-voltage) ข้อดีของวงจรแบบนี้ คือ มีสัญญาณรบกวนต่ำ เนื่องจากมีการป้อนกลับโดยใช้ความต้านทาน และมีการใช้งานได้ในย่านความถี่ที่สูงกว่าแบบอื่น มีความต้านทานขาออกน้อย ทำให้ภาคขยายต่อมาไม่ต้องดึงกระแสจากภาคก่อนขยายมาก ซึ่งจะลดสัญญาณรบกวนไปได้มาก และไม่จำเป็นต้องมีวงจรอีควอลไลเซอร์ (Equalizer) เพื่อปรับแต่งสัญญาณ ลักษณะของวงจรที่ใช้ในโครงการแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 7-4 วงจรภาคก่อนขยาย (Transimpedance)

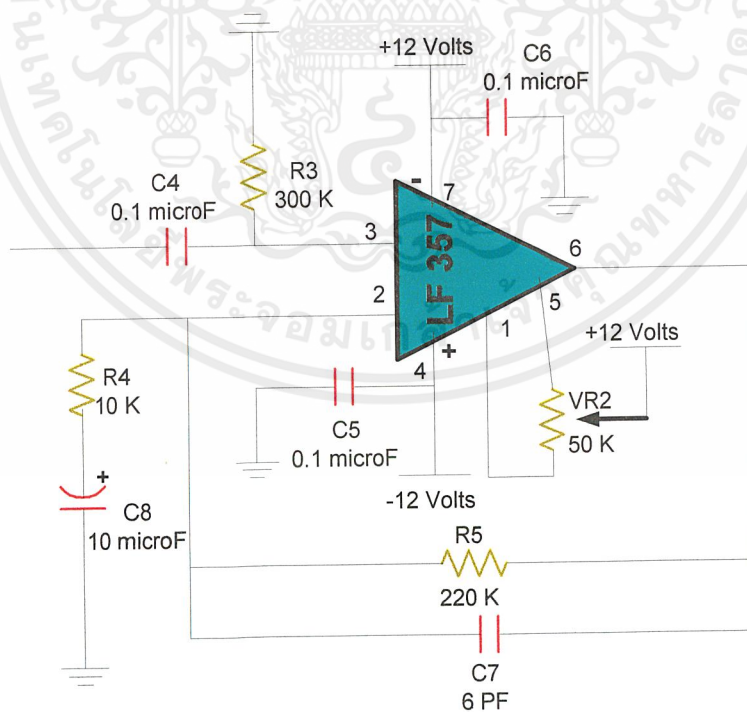
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โฟโตไดโอดที่ใช้ คือ เบอร์ IF-D91 โดยโฟโตไดโอดจะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณความเข้มของแสงที่รับได้ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งมีค่าไม่กี่ ไมโครแอมป์ ขาเอาต์ของโฟโตไดโอดจะต่อเข้ากับ IC เบอร์ OP-37 ซึ่งเป็นออปแอมป์ ชนิด Low noise precision high-speed มีแกนแบนด์วิดท์โปรดัคท์ เท่ากับ 63 MHz มีค่า CMRR 114 dB เราสามารถคำนวณหาความต่างศักย์ขาออกของภาคก่อนขยายได้ดังสมการ

$$V_o = I_p \times R_f$$

ตัวต้านทาน 10 K ที่ต่อเข้ากับขาอินอินเวอร์ทติ้ง ต่อไว้เพื่อช่วยให้กระแสขาเข้าไบอัสของวงจรมีความสมดุล ตัวเก็บประจุ 6 PF ที่ต่อขนานกับ R_f เพื่อให้วงจรขยายมีเสถียรภาพจากการเกิดออสซิลเลท ส่วนตัวเก็บประจุ 0.1 μF ที่ทำการดีคัปปลิ่งระหว่างไฟเลี้ยงของวงจร จะช่วยบายพาส (By-pass) สัญญาณรบกวนที่มาจากไฟเลี้ยงให้ลงกราวนด์

(2) ภาคขยายสัญญาณ – ในวงจรภาคก่อนขยายนั่นเราไม่สามารถทำให้ เกน (Gain) ของวงจรสูงมาก เนื่องจากวงจรขยายส่วนแรกต้องคำนึงถึงสัญญาณรบกวน เพราะกระแสที่รับจากโฟโตไดโอดธรรมดาจะมีค่าต่ำ จึงต้องออกแบบวงจรขยายภาคหลังให้มีอัตราขยายสูง อยู่ในระดับที่ต้องการเพื่อให้วงจรในภาคถัดมาสามารถที่จะทำการลือกความถี่หรือ โวลเตจที่เข้ามาทางขาอินพุทได้ วงจรขยายส่วนหลัง สามารถแสดงได้ดังรูป



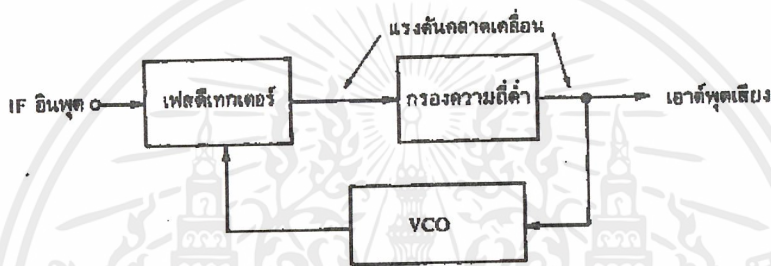
รูปที่ 7-5 วงจรขยายสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

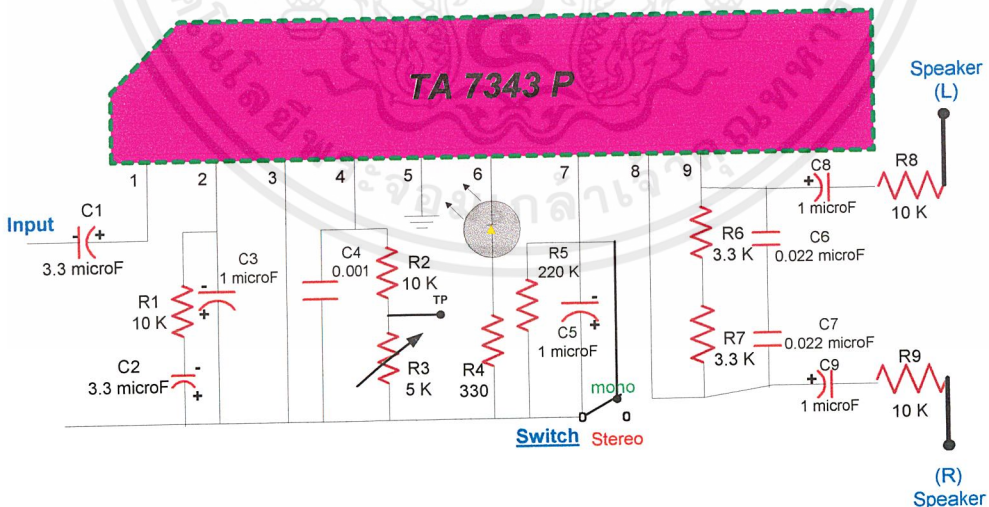
ภาคขยายเราใช้ออปแอมป์ เบอร์ LF357 ซึ่งทำงานได้ในย่านความถี่สูงใช้ขยายได้ในช่วงกว้างๆ ลักษณะของวงจรต่อเป็นแบบนอนอินเวิร์ทติ้ง มีอัตราขยายประมาณ 23 เท่า มี Cut-off low frequency ที่ความถี่ 16 Hz

7.2.2 วงจรดีมอดูเลต (FM demodulator, decoder or detector)

ในส่วนนี้จะทำหน้าที่ ดีมอดูเลตสัญญาณ FM ที่ได้มาจากภาคขยายสัญญาณของวงจรรับ เพื่อแปลงออกมาให้เป็นสัญญาณเสียงอีกครั้ง สัญญาณที่ออกจากวงจรนี้ออกมาในรูปแบบของสัญญาณอะนาล็อก หลักการทำงานของวงจรเฟสล็อกถูบ ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ “วงจรดีมอดูเลต FM สเตอริโอ” แต่จะขอยกแผนผังดังกล่าวขึ้นมาอีกครั้งเพื่อประกอบการอธิบาย



รูปที่ 7-6 แผนผังของวงจรดีมอดชนิด เฟสล็อกถูบ (PLL)



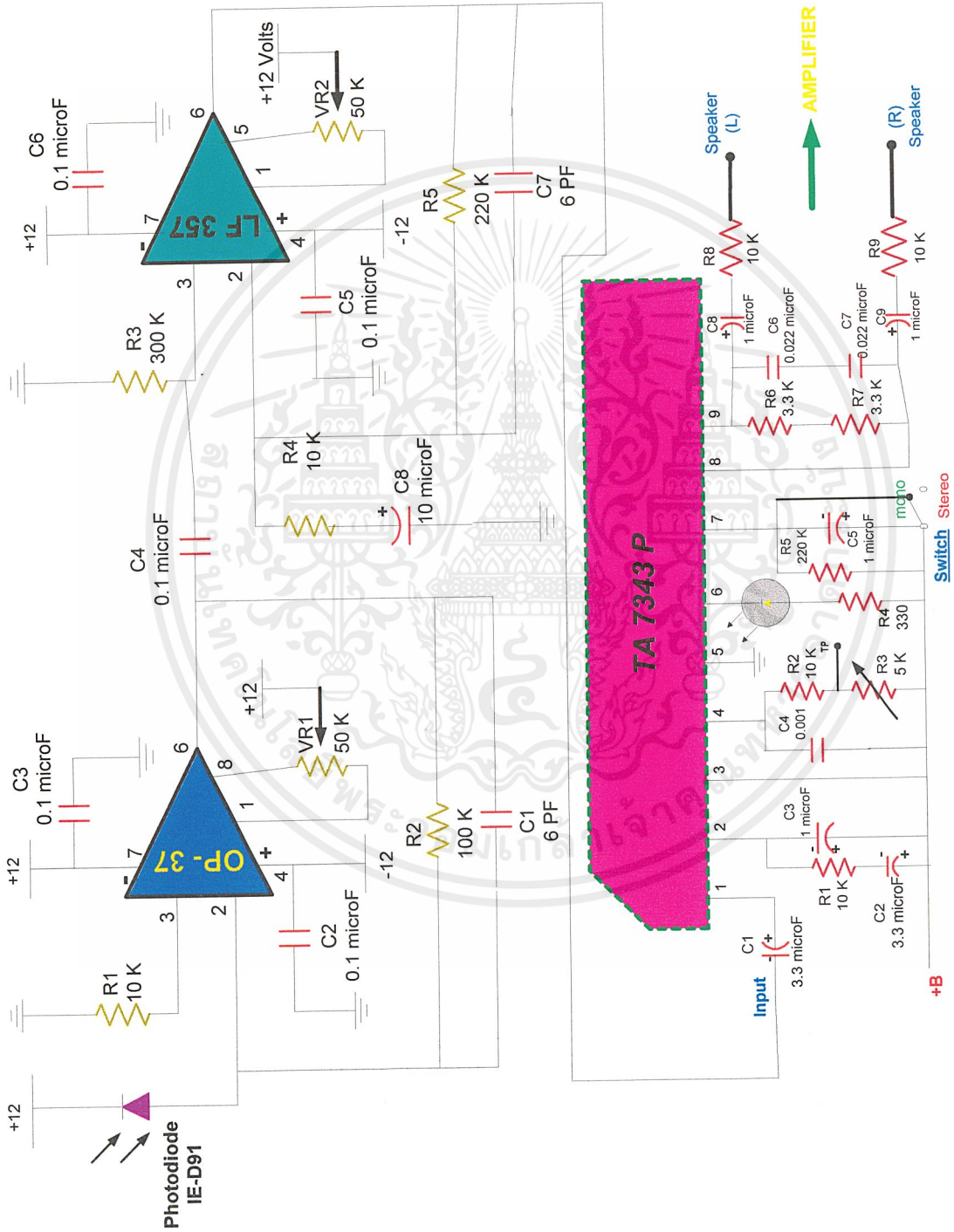
รูปที่ 7-7 วงจร FM สเตอริโอมัลติเพล็กซ์ ดีโคเดอร์แบบใช้ IC เฟสล็อกถูบเบอร์ TA7343 P

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโครงการาน ใช้ IC มัลติเพล็กซ์ แบบเฟสล็อกกรุป (PLL) เบอร์ TA 7343P เป็น IC มัลติเพล็กซ์ ชนิด 9ขา การทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้ดังนี้

ขา 1 ของ IC เป็นขาอินพุท สัญญาณที่ป้อนเข้ามามี 3 สัญญาณ คือ สัญญาณไฟลีด 19 KHz, (L+R) และ (L-R) ถูกผสมและหักล้างภายในตัว IC แบบ เฟสล็อกกรุป ขา 3 เป็นขาปรับแรงดันไฟบวก ขา 4 มี R_3 ปรับค่าให้วงจรกำเนิดความถี่ขึ้นมาให้ถูกต้อง โดยมีจุดทดสอบ (TP : Test point) ต่ออยู่ด้วย จะต้องวัดความถี่ให้ออกมาได้เท่ากับ 76 KHz ขา 5 เป็นกราวนด์ ขา 6 ควบคุม LED ให้ติดสว่างขณะรับสัญญาณเป็นสเตอริโอ และ LED จะไม่ติดเมื่อรับสัญญาณเป็นโมโน ขา 7 เป็นขาควบคุมการทำงานของ ICว่าจะทำงานเป็น โมโน หรือ สเตอริโอ ถ้าโยกสวิทช์ไปที่ตำแหน่ง โมโน IC มัลติเพล็กซ์ก็ไม่แยกเสียง ถ้าไม่โยกสวิทช์ก็จะเป็นตำแหน่งสเตอริโอ หลักการคือถ้ามีไฟ +B จ่ายให้ขา 7 IC จะทำงานเป็นโมโน ถ้าไม่มีไฟ +B ให้ขา 7 IC ก็จะทำงานเป็นสเตอริโอ ขา 8 เป็นขาสัญญาณเสียงด้านซ้าย (L) ออก ขา 9 เป็นขาสัญญาณเสียงด้านขวา (R) ออก สัญญาณเสียงที่ได้ออกมาจะมีความถี่ 38 KHz ผสมอยู่ด้วย จึงต้องใส่วงจรฟิลเตอร์ด้านซ้าย (R_7, C_7) และฟิลเตอร์ด้านขวา (R_8, C_8) เข้าไปด้วยเพื่อกำจัดสัญญาณความถี่ 38 KHz ทิ้งไป จึงส่งต่อสัญญาณด้าน L, ด้าน R ต่อไปยังภาคขยายเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7-8 วงจรสมมูลสเตอริโอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

ผลการทดลองและสรุปผล

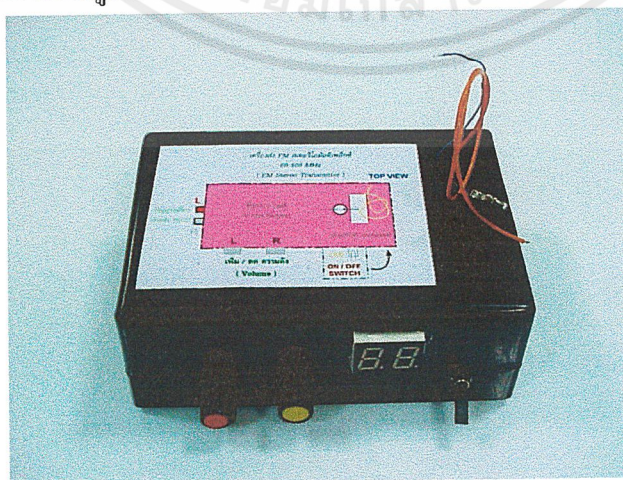
ในบทนี้จะกล่าวถึง ผลการทดลองที่ได้จากขั้นตอนต่างๆ ที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ผ่านมา ซึ่งจะประกอบด้วย ภาพวงจรสมบูรณ์ของวงจรทั้งหมด ภาพแสดงสัญญาณจากวงจรที่ใช้จริง และในตอนท้ายจะเป็นการสรุปผลและประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการนี้ทั้งหมด



รูปที่ 8-1 วงจรสมบูรณ์ของโครงการทั้งหมด

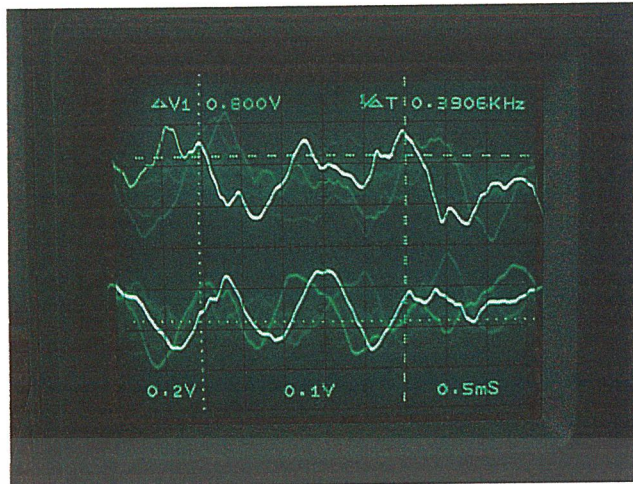
8.1 วงจรกำเนิดความถี่ FM สเตอริโอ (FM stereo transmitter)

ในส่วนของสัญญาณอินพุต ได้แก่ สัญญาณเสียง (Audio input) ทั้งช่องซ้ายและขวา สัญญาณเสียงที่ผ่านการมอดูเลตแบบ FM แล้ว จะออกทางเอาต์พุตของวงจร นอกจากนี้ได้แสดงถึง สัญญาณไฟถี่ 19 KHz ซึ่งถูกใช้ในการมอดูเลตสัญญาณ FM ให้ได้เป็นสัญญาณเสียงทั้ง 2 ช่องแบบสเตอริโออย่างสมบูรณ์

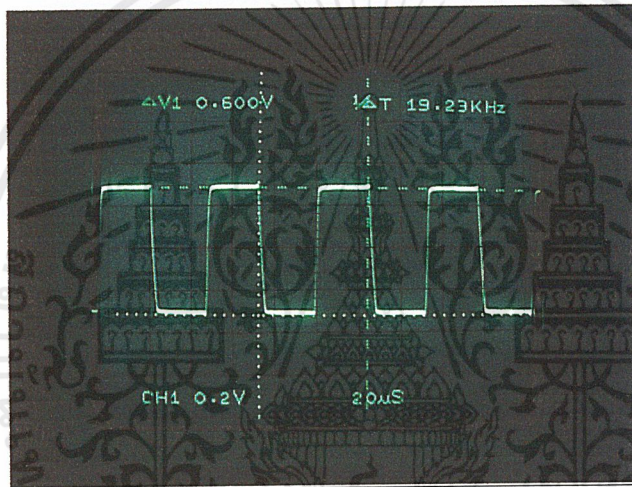


รูปที่ 8-2 เครื่องส่ง FM สเตอริโอ มัลติเพิล็กซ์

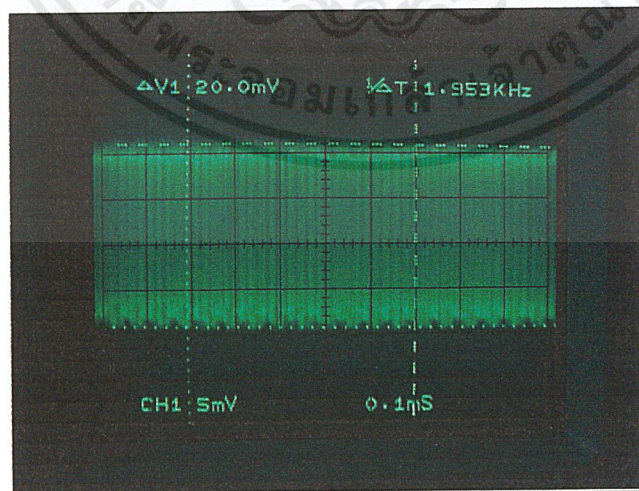
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8-3 สัญญาณเสียงช่องซ้าย (L) และขวา (R)



รูปที่ 8-4 สัญญาณไฟลิตความถี่ 19 KHz



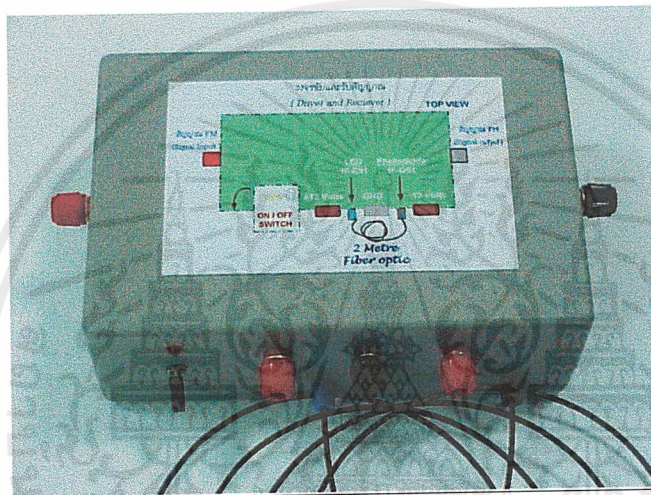
รูปที่ 8-5 สัญญาณ FM สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

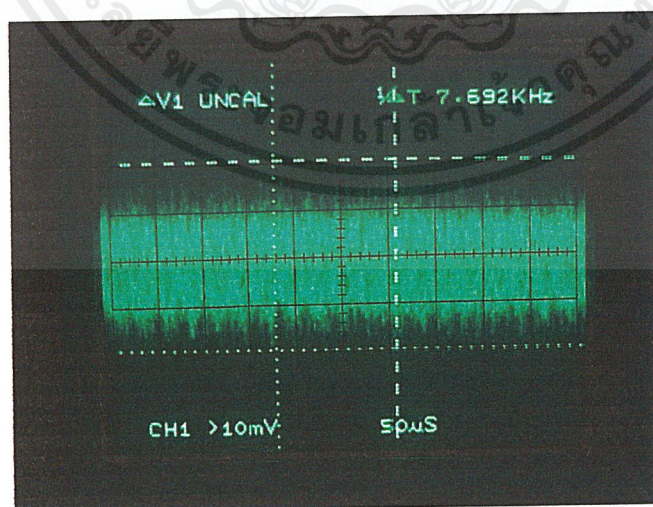
สัญญาณเสียงที่ผ่านการมอดูเลตแบบ FM แล้ว พบว่ามีแอมพลิจูดคงที่ แต่ความถี่จะเปลี่ยนไปซึ่งขึ้นอยู่กับ แอมพลิจูดของสัญญาณเสียง (ความดัง) และ ความถี่ (ความถี่-แหลม)

8.2 วงจรขับและวงจรับสัญญาณ

สัญญาณ FM ที่ได้จะเข้าสู่วงจรขับ ไปยังเส้นใยแก้วนำแสง และ ออกที่วงจรับสัญญาณ โดยขั้นต้นจะทดลองส่งสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมเข้าสู่วงจรขับสัญญาณ

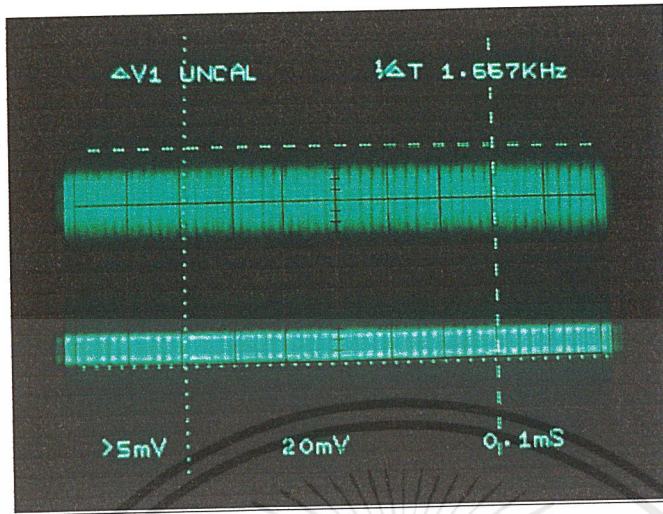


รูปที่ 8-6 วงจรขับและวงจรับสัญญาณ



รูปที่ 8-7 สัญญาณ FM สเตอริโอ ที่รับได้จากวงจรับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8-8 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณ FM สเตอริโอ ที่ได้จากวงจรภาคส่งและภาครับ โดยที่ เส้นบนคือ สัญญาณที่ได้จากภาครับและเส้นล่างคือ สัญญาณที่ได้จากภาคส่ง

8.3 วงจรดีมอดูเลต FM (FM Demodulator)



รูปที่ 8-9 วงจรดีมอดูเลตสัญญาณ FM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8-10 สัญญาณเสียงช่องซ้าย (L) และ ขวา(R) ที่ผ่านการติมอูเลตแล้ว

8.4 สรุปผลการทดลอง

ผลที่ได้จากโครงการนี้จะพบว่า วงจรแต่ละส่วนทำงานได้ตรงตามจุดประสงค์ที่วางไว้ คือสามารถที่จะส่งสัญญาณ FM สเตอริโอผ่านไปเส้นใยนำแสงและสามารถติมอูเลตสัญญาณให้เป็นสัญญาณเสียงได้ ถึงแม้ว่าสัญญาณเสียงที่ติมอูเลตออกมาแล้วจะมีสัญญาณรบกวนบ้าง ซึ่งอาจจะเป็นเพราะว่าอุปกรณ์บางชนิดยังไม่สมบูรณ์ เช่น สายสัญญาณ ฯลฯ ด้วยเหตุนี้ ถ้าเราต้องการปรับปรุงคุณภาพเสียง จึงต้องทำการเปลี่ยนอุปกรณ์บางชนิดให้มีคุณภาพมากขึ้น ซึ่งอาจจะใช้งบประมาณเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นในโครงการนี้จึงเป็นพื้นฐานเพื่อช่วยในการพัฒนาต่อไป



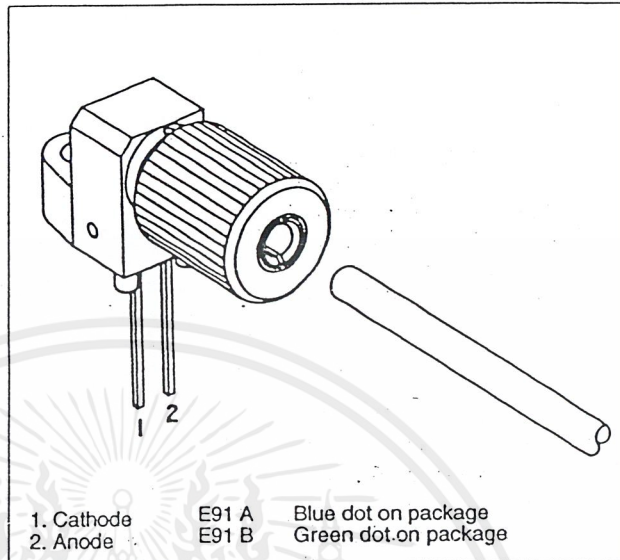
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FEATURES

- Mates with Standard, 1000 μm 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 μm 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}) $t \leq 10 \mu\text{sec}$	2 A	2 A

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

Parameter	Symbol	IF-E91A	IF-E91B	Unit
Peak Wavelength	λ_{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 ≤ 0.1 mm, 10 cm polished fiber, $I_F=100$ mA	Φ_{min}	50	100	μW
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	μs
Capacitance	C_0	25	25	pF
Forward Voltage ($I_F=50$ mA)	V_f	1.5 max	1.7 max	V
Temperature Coefficient, λ_{PEAK}	TC_λ	0.3	0.3	nm/K

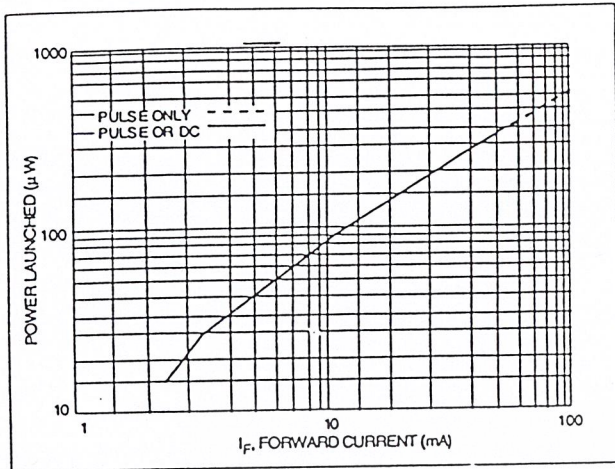


Figure 1. Normalized power launched versus forward current.

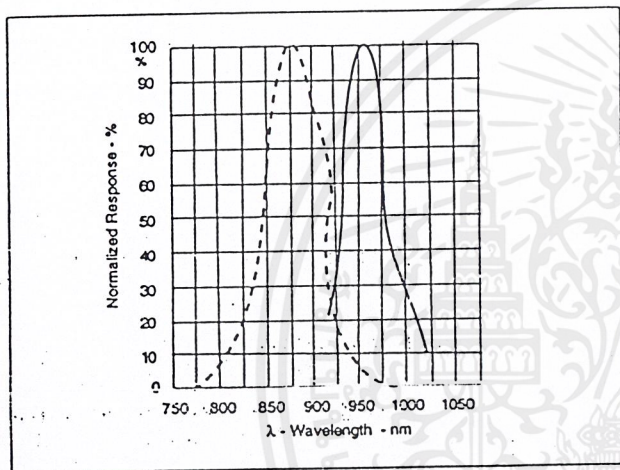
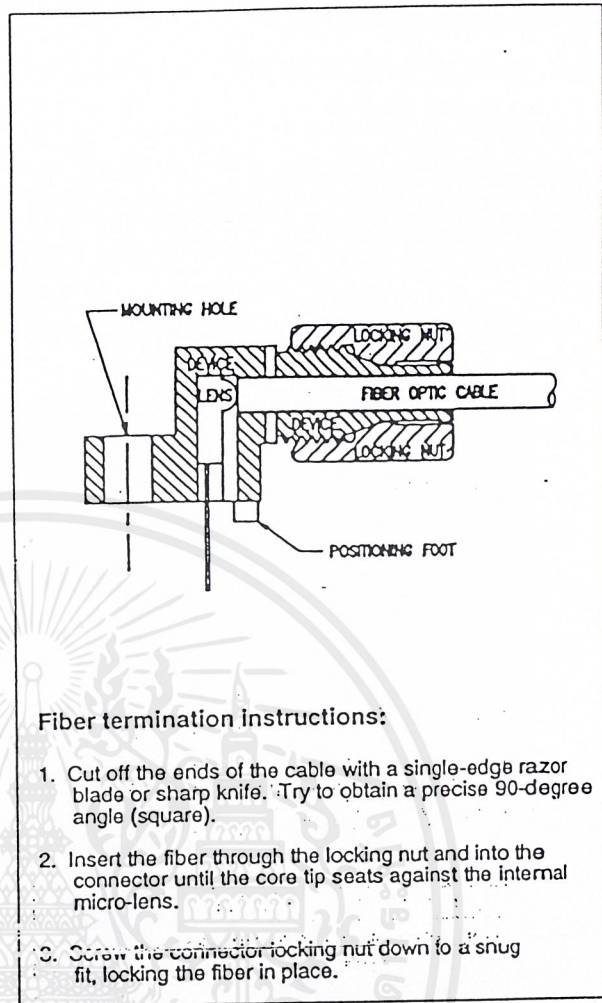


Figure 2. Typical spectral output versus wavelength.



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.

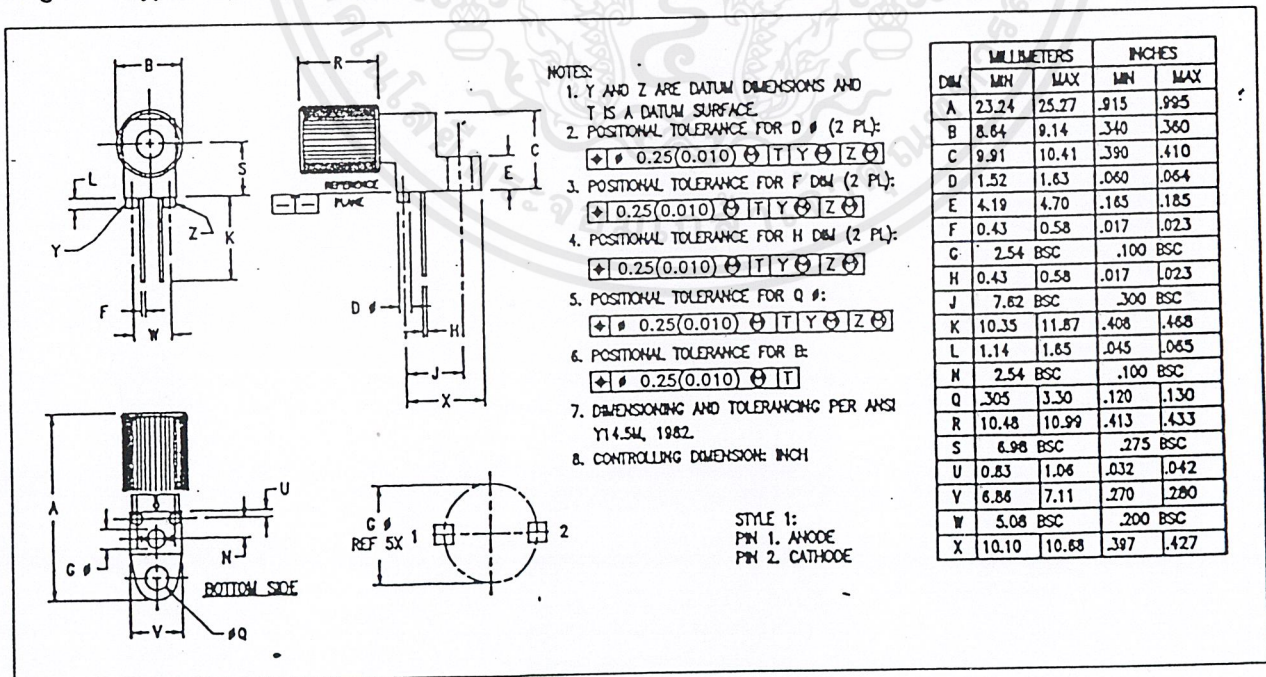


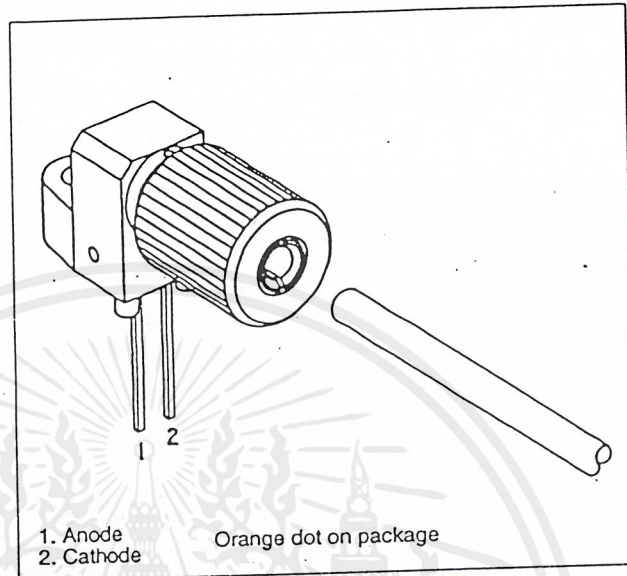
Figure 4. Case outline.

FEATURES

- Mates with Standard, 1000 μm 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



1. Anode
2. Cathode

Orange dot on package

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

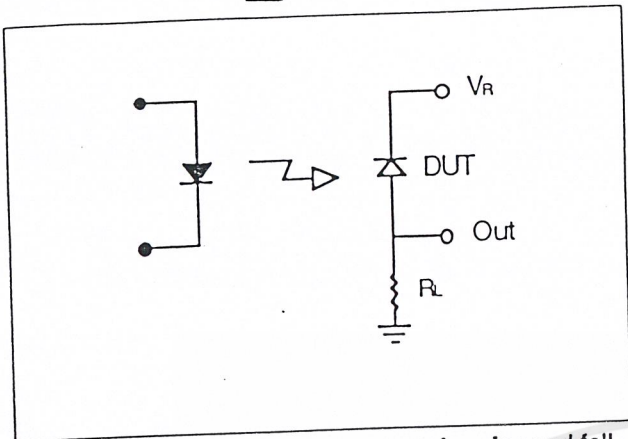


Figure 1. Circuit diagram for measuring rise and fall times.

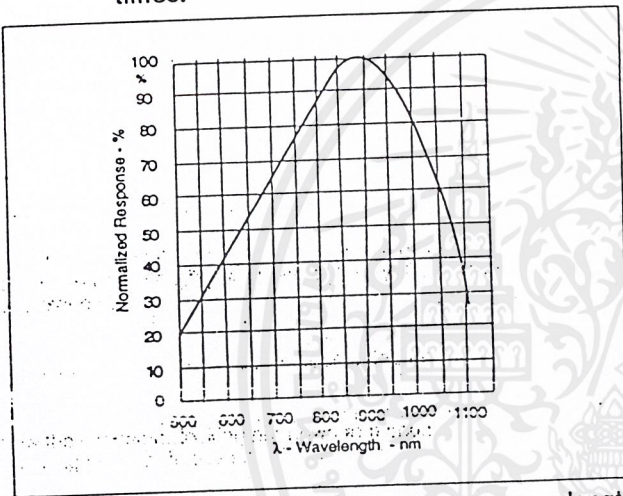
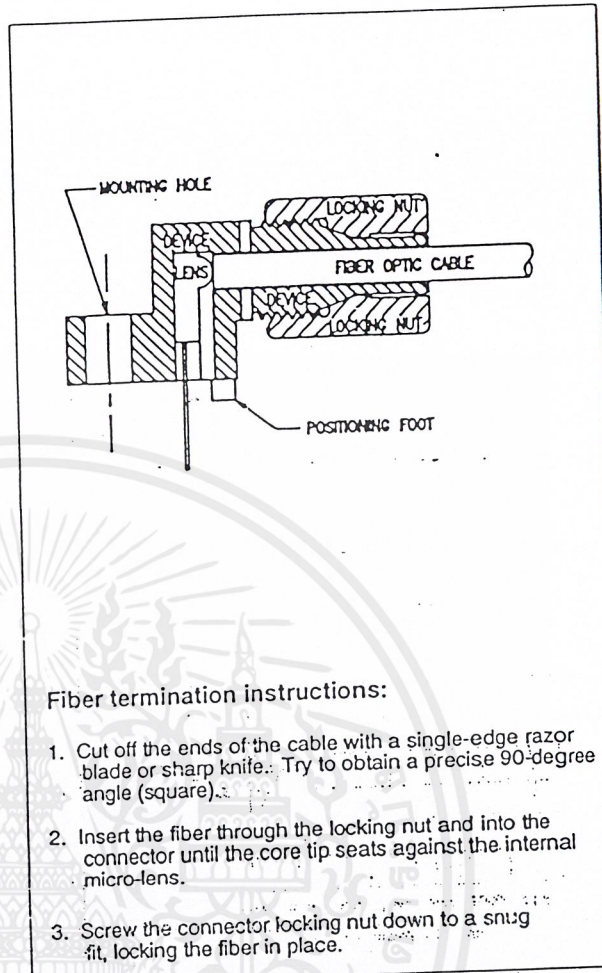


Figure 2. Typical detector response versus wavelength.



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.

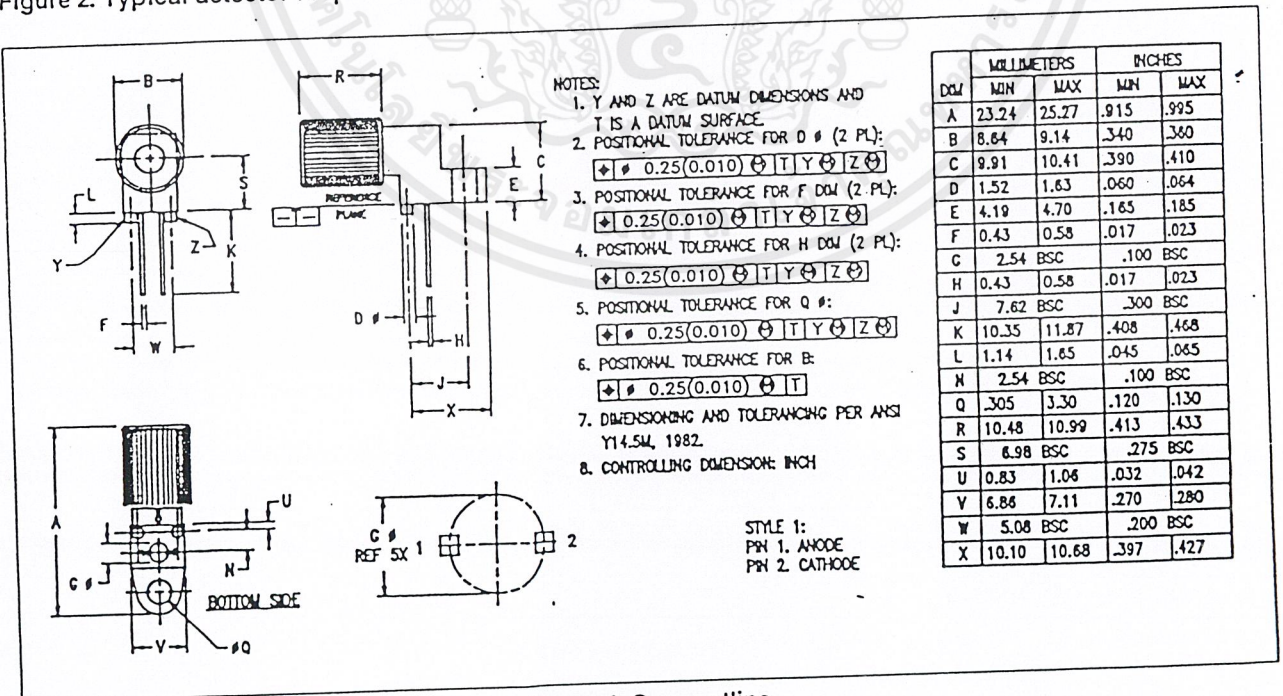


Figure 4. Case outline.



OP-37

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

Precision Monolithics Inc.

FEATURES

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

ORDERING INFORMATION

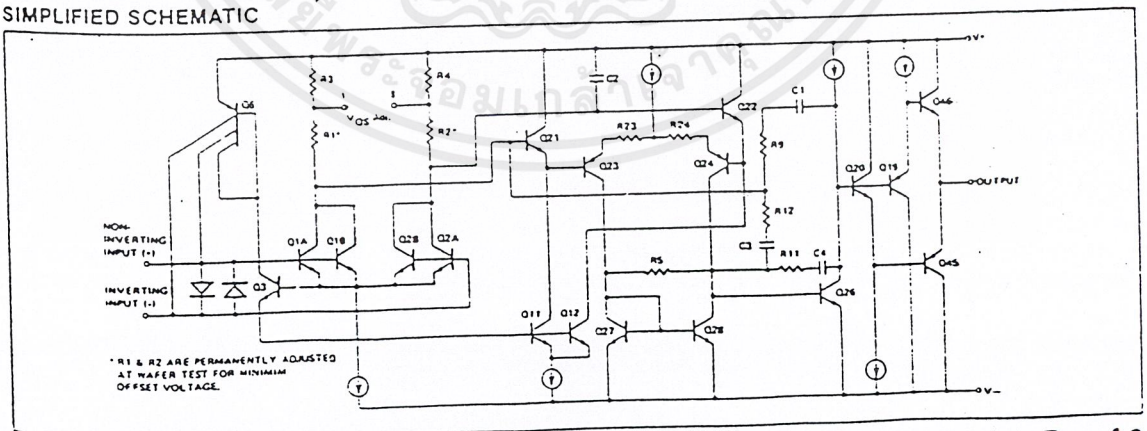
V_{OS} MAX (mV)	PACKAGE				OPERATING TEMPERATURE RANGE
	TO-99	CERDIP 8-PIN	PLASTIC 8-PIN	LCC 20-CONTACT	
25	OP37AJ	OP37AZ	-	-	MIL
25	OP37EJ	OP37EZ	OP37EP	-	IND/COM
50	OP37BJ	OP37BZ	-	OP37BRC/883	MIL
50	OP37FJ	OP37FZ	OP37FP	-	IND/COM
100	OP37CJ	OP37CZ	-	-	MIL
100	OP37GJ	OP37GZ	OP37GP	-	XIND
100	-	-	OP37GSTT	-	XIND

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

GENERAL DESCRIPTION

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

SIMPLIFIED SCHEMATIC

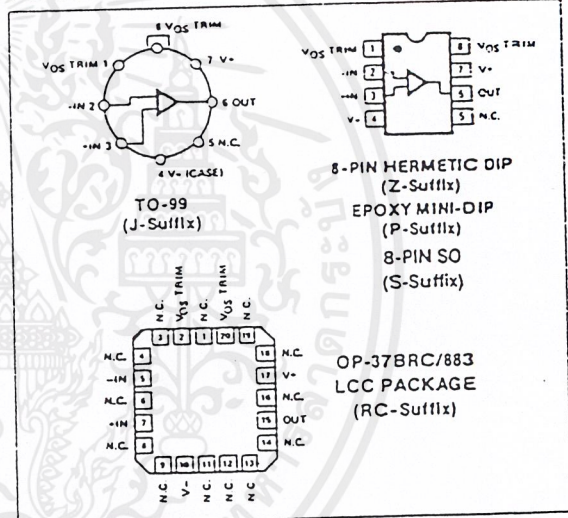


The OP-37 provides the low offset and drift of the OP-07 plus higher speed and lower noise. Offsets down to 25 μV and drift of 0.6 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ maximum make the OP-37 ideal for precision instrumentation applications. Exceptionally low noise ($e_n = 3.5\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 10Hz),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

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

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

PIN CONNECTIONS



OPERATIONAL AMPLIFIERS/BUFFERS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PSRR and CMRR exceed 120dB. These characteristics, coupled with long-term drift of 0.2µV/month, allow the circuit designer to achieve performance levels previously attained only by discrete designs.

Low-cost, high-volume production of the OP-37 is achieved by using on-chip zener-zap trimming. This reliable and stable offset trimming scheme has proved its effectiveness over many years of production history.

The OP-37 brings low-noise instrumentation-type performance to such diverse applications as microphone, tape-head, and RIAA phono preamplifiers, high-speed signal conditioning for data acquisition systems, and wide-bandwidth instrumentation.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Note 4)

Supply Voltage	±22V
Internal Voltage (Note 1)	±22V
Output Short-Circuit Duration	Indefinite
Differential Input Voltage (Note 2)	±0.7V
Differential Input Current (Note 2)	±25mA
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C

Operating Temperature Range

OP-37A, OP-37B, OP-37C (J, Z, RC)	-55°C
OP-37E, OP-37F (J, Z)	-25°C
OP-37E, OP-37F (P)	0°C
OP-37G (P, S, J, Z)	-40°C

Lead Temperature Range (Soldering, 60 sec) -----

Junction Temperature ----- -65°C

PACKAGE TYPE	θ _{JA} (NOTE 3)	θ _{Jc}
TO-99 (J)	150	18
8-Pin Hermetic DIP (Z)	148	16
8-Pin Plastic DIP (P)	103	43
20-Contact LCC (RC, TC)	98	38
8-Pin SO (S)	158	43

NOTES:

- For supply voltages less than ±22V, the absolute maximum is equal to the supply voltage.
- The OP-37's inputs are protected by back-to-back diodes. Resistors are not used in order to achieve low noise. If differential resistors are not used in order to achieve low noise, and if differential voltage exceeds ±0.7V, the input current should be limited to 25mA.
- θ_{JA} is specified for worst case mounting conditions, i.e., θ_{JA} device in socket for TO, CerDIP, P-DIP, and LCC packages; θ_{Jc} for device soldered to printed circuit board for SO package.
- Absolute maximum ratings apply to both DICE and package otherwise noted.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS at V_S = ±15V, T_A = 25°C, unless otherwise noted.

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	OP-37A/E			OP-37B/F			OP-37C/G		
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX
Input Offset Voltage	V _{OS}	Note 1.	—	10	25	—	20	60	—	30	100
Long-Term V _{OS} Stability	V _{OS} /Time	Notes 2, 3.	—	0.2	1.0	—	0.3	1.5	—	0.4	2
Input Offset Current	I _{OS}		—	7	35	—	9	50	—	12	—
Input Bias Current	I _B		—	±10	±40	—	±12	±55	—	±15	±25
Input Noise Voltage	e _{n-p}	0.1Hz to 10kHz Notes 3, 5.	—	0.08	0.18	—	0.08	0.16	—	0.09	0.15
Input Noise Voltage Density	e _n	f _O = 10Hz (Note 3)	—	1.5	5.5	—	1.5	5.5	—	3.8	8
		f _O = 30Hz (Notes 3, 6)	—	3.1	4.5	—	3.1	4.5	—	3.3	5
		f _O = 1000Hz (Note 3)	—	3.0	3.8	—	3.0	3.8	—	3.2	4
Input Noise Current Density	i _n	f _O = 10Hz (Notes 3, 6)	—	1.7	4.0	—	1.7	4.0	—	1.7	—
		f _O = 30Hz (Notes 3, 6)	—	1.0	2.3	—	1.0	2.3	—	1.0	—
		f _O = 1000Hz (Notes 3, 6)	—	0.4	0.6	—	0.4	0.6	—	0.4	—
Input Resistance — Differential-Mode	R _{IN}	Note 7.	—	3	—	—	2.5	—	—	2	—
Input Resistance — Common-Mode	R _{INCM}		—	—	—	—	—	—	—	—	—
Input Voltage Range	IVR		±11.0	±12.3	—	±11.0	±12.3	—	±11.0	±12.3	—
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	V _{CM} = ±11V	114	126	—	106	123	—	100	120	—
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	V _S = ±4V to ±18V	—	1	10	—	1	10	—	2	—
Large-Signal Voltage Gain	A _{VOC}	R _L ≥ 2kΩ, V _O = ±10V	1000	1800	—	1000	1800	—	700	1500	—
		R _L = 1kΩ, V _O = ±10V	800	1500	—	800	1500	—	400	1500	—
		R _L = 600Ω, V _O = ±1V, V _S = ±4V, Note 4	250	700	—	250	700	—	200	500	—
Output Voltage Swing	V _O	R _L ≥ 2kΩ	±12.0	±13.8	—	±12.0	±13.8	—	±11.5	±13.5	—
		R _L ≥ 600Ω	±10.0	±11.5	—	±10.0	±11.5	—	±10.0	±11.5	—
Slew Rate	SR	R _L ≥ 2kΩ, Note 4	11	17	—	11	17	—	11	17	—
Gain Bandwidth Prod.	GBW	f _O = 10kHz, Note 4	45	63	—	45	63	—	45	63	—
		f _O = 1MHz	—	40	—	—	40	—	—	40	—

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

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

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

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

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

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	OP-37E			OP-37F			OP-37G			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	V_{OS}		—	20	50	—	40	140	—	55	220	μV
Temperature Input Offset Drift	TCV_{OS} TCV_{OSn}	Note 2 Note 3	—	0.2	0.6	—	0.3	1.3	—	0.4	1.8	$\mu V/^\circ C$
Input Offset Current	I_{OS}		—	± 10	± 50	—	± 14	± 85	—	± 20	± 135	nA
Input Bias Current	I_B		—	± 14	± 50	—	± 18	± 95	—	± 25	± 150	nA
Input Voltage Range	IVR		± 10.5	± 11.8	—	± 10.5	± 11.8	—	± 10.5	± 11.8	—	V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$V_{CM} = 10V$	110	124	—	102	121	—	96	118	—	dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_S = \pm 4.5V$ to $\pm 18V$	—	2	15	—	2	16	—	2	12	$\mu V/V$
Large-Signal Voltage Gain	A_{VO}	$R_L \geq 2k\Omega, V_O = \pm 10V$	750	1500	—	700	1300	—	450	1000	—	V/mV
Output Voltage Swing	V_O	$R_L \geq 2k\Omega$	± 11.7	± 13.6	—	± 11.4	± 13.5	—	± 11.0	± 13.3	—	V

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

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

5 OPERATIONAL AMPLIFIERS/BUFFERS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LF155/155A/LF255/255A/LF355/355A/LF156/156A/LF256/256A/LF356/356A/LF157/157A/LF257/257A/LF357/357A/357B



LF155/LF156/LF157 Series Monolithic JFET Input Operational Amplifiers

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

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

Advantages

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

Applications

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

- Photocell amplifiers
- Sample and Hold circuits

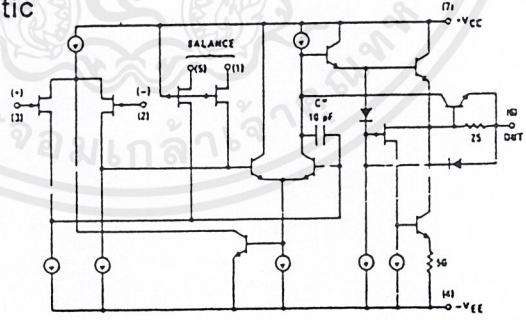
Common Features

(LF155A, LF156A, LF157A)	
■ Low input bias current	30 pA
■ Low Input Offset Current	3 pA
■ High input impedance	$10^{12} \Omega$
■ Low input offset voltage	1 mV
■ Low input offset voltage temp. drift	$3 \mu V/^{\circ}C$
■ Low input noise current	$0.01 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
■ High common-mode rejection ratio	100 dB
■ Large dc voltage gain	106 dB

Uncommon Features

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

Simplified Schematic



*3 pF in LF157 series.

TU/H/5646-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LF155/155A/LF255/LF355/355A/355B/LF156/156A/LF256/LF356/LF356A/356B/LF157/157A/LF257/LF357/357A/357B

DC Electrical Characteristics (Note 3) $T_A = T_j = 25^\circ\text{C}$ (Continued)

Symbol	Parameter	Conditions	LF155A/6A/7A			LF355A/6A/7A			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V_{CM}	Input Common-Mode Voltage Range	$V_S = \pm 15\text{V}$	± 11	+15.1 -12		± 11	+15.1 -12		V V
CMRR	Common-Mode Rejection Ratio		85	100		85	100		dB
PSRR	Supply Voltage Rejection Ratio	(Note 6)	85	100		85	100		dB

AC Electrical Characteristics $T_A = T_j = 25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 15\text{V}$

Symbol	Parameter	Conditions	LF155A/355A			LF156A/356A			LF157A/357A			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
SR	Slew Rate	LF155A/6A: $A_V = 1$, LF157A: $A_V = 5$	3	5		10	12		40	50		V/ μs V/ μs
GBW	Gain Bandwidth Product			2.5		4	4.5		15	20		MHz
t_s	Settling Time to 0.01%	(Note 7)		4			1.5			1.5		μs
e_n	Equivalent Input Noise Voltage	$R_S = 100\Omega$ $f = 100\text{ Hz}$ $f = 1000\text{ Hz}$		25 25			15 12		15 12			$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
i_n	Equivalent Input Noise Current	$f = 100\text{ Hz}$ $f = 1000\text{ Hz}$		0.01 0.01			0.01 0.01		0.01 0.01			$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
C_{IN}	Input Capacitance			3			3			3		pF

DC Electrical Characteristics (Note 3)

Symbol	Parameter	Conditions	LF155/6/7			LF255/6/7 LF355B/6B/7B			LF355/6/7			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V_{OS}	Input Offset Voltage	$R_S = 50\Omega$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ Over Temperature		3 5 7			3 5 6.5		3 5	10 13		mV mV
$\Delta V_{OS}/\Delta T$	Average TC of Input Offset Voltage	$R_S = 50\Omega$		5			5		5			$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
$\Delta\text{TC}/\Delta V_{OS}$	Change in Average TC with V_{OS} Adjust	$R_S = 50\Omega$, (Note 4)		0.5			0.5		0.5			$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ per mV
I_{OS}	Input Offset Current	$T_j = 25^\circ\text{C}$, (Notes 3, 5) $T_j \leq T_{HIGH}$		3 20 20			3 20 1		3 50 2	50 2		pA nA
I_B	Input Bias Current	$T_j = 25^\circ\text{C}$, (Notes 3, 5) $T_j \leq T_{HIGH}$		30 100 50			30 100 5		30 200 8	200 8		pA nA
R_{IN}	Input Resistance	$T_j = 25^\circ\text{C}$		10^{12}			10^{12}		10^{12}			Ω
A_{VOL}	Large Signal Voltage Gain	$V_S = \pm 15\text{V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_O = \pm 10\text{V}$, $R_L = 2\text{k}$ Over Temperature	50 25	200		50 25	200		25 15	200		V/mV V/mV
V_O	Output Voltage Swing	$V_S = \pm 15\text{V}$, $R_L = 10\text{k}$ $V_S = \pm 15\text{V}$, $R_L = 2\text{k}$	± 12 ± 10	± 13 ± 12		± 12 ± 10	± 13 ± 12		± 12 ± 10	± 13 ± 12		V V
V_{CM}	Input Common-Mode Voltage Range	$V_S = \pm 15\text{V}$	± 11	+15.1 -12		± 11	± 15.1 -12		+10	+15.1 -12		V V
CMRR	Common-Mode Rejection Ratio		85	100		85	100		80	100		dB
PSRR	Supply Voltage Rejection Ratio	(Note 6)	85	100		85	100		80	100		dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings

If Military/Aerospace specified devices are required, contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.
(Note 8)

	LF155A/6A/7A	LF155/6/7	LF355B/6B/7B LF255/6/7	LF355/6/7 LF355A/6A/7A
Supply Voltage	±22V	±22V	±22V	±18V
Differential Input Voltage	±40V	±40V	±40V	±30V
Input Voltage Range (Note 2)	±20V	±20V	±20V	±16V
Output Short Circuit Duration	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous
T_{jMAX}				
H-Package	150°C	150°C	115°C	115°C
N-Package			100°C	100°C
J-Package		150°C	115°C	115°C
M-Package			100°C	100°C
Power Dissipation at $T_A = 25^\circ\text{C}$ (Notes 1 and 9)				
H-Package (Still Air)	560 mW	560 mW	400 mW	400 mW
H-Package (400 LF/Min Air Flow)	1200 mW	1200 mW	1000 mW	1000 mW
N-Package		1260 mW	670 mW	670 mW
J-Package			900 mW	900 mW
M-Package			380 mW	380 mW
Thermal Resistance (Typical) θ_{JA}				
H-Package (Still Air)	160°C/W	160°C/W	160°C/W	160°C/W
H-Package (400 LF/Min Air Flow)	65°C/W	65°C/W	65°C/W	65°C/W
N-Package		100°C/W	130°C/W	130°C/W
J-Package			100°C/W	100°C/W
M-Package			195°C/W	195°C/W
(Typical) θ_{JC}				
H-Package	23°C/W	23°C/W	23°C/W	23°C/W
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C
Soldering Information (Lead Temp.)				
Metal Can Package				
Soldering (10 sec.)	300°C	300°C	300°C	300°C
Dual-In-Line Package				
Soldering (10 sec.)		260°C	260°C	260°C
Small Outline Package				
Vapor Phase (60 sec.)			215°C	215°C
Infrared (15 sec.)			220°C	220°C
See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.				
ESD tolerance (100 pF discharged through 1.5 k Ω)	1200V	1200V	1200V	1200V

DC Electrical Characteristics (Note 3) $T_A = T_j = 25^\circ\text{C}$

Symbol	Parameter	Conditions	LF155A/6A/7A			LF355A/6A/7A			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V_{OS}	Input Offset Voltage	$R_S = 50\Omega$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ Over Temperature		1	2 2.5		1	2 2.3	mV mV
$\Delta V_{OS}/\Delta T$	Average TC of Input Offset Voltage	$R_S = 50\Omega$		3	5		3	5	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
$\Delta TC/\Delta V_{OS}$	Change in Average TC with V_{OS} Adjust	$R_S = 50\Omega$, (Note 4)		0.5			0.5		$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ per mV
I_{OS}	Input Offset Current	$T_j = 25^\circ\text{C}$, (Notes 3, 5) $T_j \leq T_{HIGH}$		3	10 10		3	10 1	pA nA
I_B	Input Bias Current	$T_j = 25^\circ\text{C}$, (Notes 3, 5) $T_j \leq T_{HIGH}$		30	50 25		30	50 5	pA nA
R_{IN}	Input Resistance	$T_j = 25^\circ\text{C}$		10 ¹²			10 ¹²		Ω
A_{VOL}	Large Signal Voltage Gain	$V_S = \pm 15\text{V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_O = \pm 10\text{V}$, $R_L = 2\text{k}$ Over Temperature	50	200		50	200		V/mV V/mV
V_O	Output Voltage Swing	$V_S = \pm 15\text{V}$, $R_L = 10\text{k}$ $V_S = \pm 15\text{V}$, $R_L = 2\text{k}$	±12 ±10	±13 ±12		±12 ±10	±13 ±12		V V

บรรณานุกรม

1. Henry Zanger , Cynnthi Zanger , “Fiber Optic Communication and Other Application” , 1 st , Maxwell Macmillan
2. Joseph C. Palaif , “Fiber Optic Communication” , 2 nd , ed , Pacici – hall , Inc , 1988
3. รศ.ดร. ปรีชา ยูภาพิน , “เครือข่ายใยแก้วนำแสง” , หน้า 1 – 46

