การส่งสัญญาณ AM/FM ผ่านเส้นใยนำแสง

T031645

นายอนันต์ กาลกลั่นพจน์
นางสาวอัจฉรา บุญทวี

T031645

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2540

ป ท.
ส165ก
2540
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 31645
วัน, เดือน, ปี 19 พ.ค. 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIGNALING AM/FM VIA FIBER OPTIC LINK

MR. ANAN KANKLANPHOT

MISS ADCHARA BOONTAWEE

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the

Requirement for the Bachelor Degree of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1997

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ การส่งสัญญาณ AM/FM ผ่านเส้นใยนำแสง

โดย นายอนันต์ กาลกลั่นพจน์

นางสาวอัจฉรา บุญทวี

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้นับโครงงานพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

(รศ. สุรพล รักวิจัย)

คณะกรรมการโครงงานพิเศษ

..... ประธานกรรมการ

(ผศ.ดร. ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล)

..... กรรมการ

(ดร. วิริยะ ชูปวีณ)

..... กรรมการ

(อ.สุ่น จ่างประยูร)

..... กรรมการ

(อ. สาหร่าย คุณพงษ์)

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การส่งสัญญาณ AM/FM ผ่านเส้นใยนำแสง
โดย	นายอนันต์ กาลกลั่นพจน์
	นางสาวอัจฉรา บุญทวี
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล
ปีการศึกษา	2540

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้ กล่าวถึงการสร้างระบบการสื่อสารทางเดียวด้วยเส้นใยนำแสง เพื่อใช้ในการส่งสัญญาณ AM/FM ซึ่งในระบบที่ใช้ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนวงจรภาคส่งสัญญาณและส่วนวงจรภาครับสัญญาณ โดยสัญญาณ Analog จะถูกแปลงให้เป็นสัญญาณทางแสงในภาคส่ง ซึ่งอาศัยหลักการมอดดูเลทสัญญาณแบบ AM และ FMในการส่งข้อมูล สัญญาณแสงจาก LED จะถูกส่งผ่านเส้นใยนำแสงไปยังภาครับซึ่งมีโฟโตไดโอด เป็นตัวแปลงสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าอีกทีหนึ่ง จากนั้นจึงแยกสัญญาณข้อมูลออกด้วยวงจรดีเทคเตอร์ เพื่อขยายสัญญาณไปยังลำโพงต่อไปในกรณีที่จะส่งสัญญาณเสียงทางภาคส่งจะต้องมีส่วนของวงจรพรีแอมปลิไฟร์เพิ่มเติมมาเพื่อที่จะเปลี่ยนสัญญาณเสียงจากไมโครโฟนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าก่อน จากการทดลองพบว่าระบบทำงานได้ดีและเป็นไปตามทฤษฎีของ Analog Modulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Specail Project Title	Signaling AM/FM via Fiber Optic Link
Name	Mr. Anan Kanklanphot
	Miss Adchara Boontawee
Spacial Project Advisors	Assistant Professor. Dr. Sirisak TECHATHAWIKUL
Department	Applied Physics Ladkrabang
Academic Year	1997

Abstract

This special project is about the construction of One-way Fiber-Optic communication systems for signaling AM/FM. The system is composed of two parts, namely transmitter and receiver. Original Analog signal is converted into light signal by using modulation techniques, i.e. AM or FM. Each technique gives rise to current to modulate the LED for output. The light signal is transmitted via a fiber optic link to the photodiode that converts optical energy into usable electrical signals again. After demodulation and then audio amplifying, The audio signal is coupled to a loudspeaker. Moreover, test results show that the system works well and they are also is good agreement with the modulation theory.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำโครงงานพิเศษ เรื่องการส่งสัญญาณ AM/FM ผ่านเส้นใยนำแสงนี้ ถ้าจะเป็นประโยชน์แก่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังแล้ว ผู้จัดทำโครงงานพิเศษ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้คอยเป็นห่วงเป็นใย และให้การสนับสนุนการศึกษามาโดยตลอดและขอขอบคุณอาจารย์ผู้แนะนำให้คำปรึกษา เพื่อให้โครงงานนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ดังมีรายนามดังต่อไปนี้

ผศ.ดร. ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษ

อาจารย์ธวัชชัย ขาวประเสริฐ ผู้อนุเคราะห์เครื่องพิมพ์

คุณสมบัติ หมื่นพัน ,คุณชนพล อินเที่ยง , คุณอนุสรณ์ ศรีอนันต์,

คุณอนันตชัย นัยจิตร, คุณอำนาจ เจนจิโรจน์พิพัฒน์, คุณนรา ทัพเพชร ,

คุณประพันธ์ คงธนสุนทร,คุณสุคารัตน์ แก้วแท้, คุณวรดา ทรัพย์จรัสแสง ,

คุณวรวิทย์ เมษรักษาวนิช,คุณจิตตกานต์ ไชยปัญญา, คุณนารีมล ทองศรีคำ,

คุณยุพวรรณ ธำรงศิลป์ ,คุณจีรเมศ ผ่องจิตร ที่สนับสนุนการทำโครงงาน

และเพื่อนๆ ทุกคนที่ไม่ได้กล่าวนามที่คอยให้ความช่วยเหลือในการทำโครงงานครั้งนี้มาโดยตลอดคณะกรรมการทุกท่านที่ช่วยตรวจและแก้ไขรายงานที่เป็นฉบับสมบูรณ์นี้และสุดท้าย ความช่วยเหลือที่ได้รับจากภาควิชาที่ได้ให้ยืมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่างๆขณะทำการทดลอง จนทำให้โครงงานพิเศษนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ทางผู้จัดทำขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

อนันต์ กาลกลั่นพจน์

อัจฉรา บุญทวี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาไทย ..... ก

บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาอังกฤษ ..... ข

กิตติกรรมประกาศ ..... ค

สารบัญตาราง ..... ง

สารบัญรูป ..... จ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 คุณสมบัติพิเศษต่างๆของการสื่อสารเส้นใยนำแสง 1

1.2 การเชื่อมต่อของเส้นใยนำแสง 2

1.3 หลักการทั่วไปของการสื่อสารทางเดียว 2

1.3.1 หลักการภาคส่ง 3

1.3.2 เส้นใยนำแสง 3

1.3.3 หลักการภาครับ 4

บทที่ 2 ทฤษฎีการมอดดูเลทเบื้องต้น

2.1 หลักการมอดดูเลชัน 5

2.2 หลักการมอดดูเลชันแบบแอมปลิจูดมอดดูเลชัน 6

2.3 มอดดูเลชันอินเด็กซ์และเปอร์เซ็นต์ของการมอดดูเลทสัญญาณแบบ AM.. 9

2.4 วงจรการมอดดูเลตแบบAM 11

2.4.1วงจรไดโอด 12

2.4.2 วงจรเฟ็ท 14

2.4.3 วงจร PIN ไดโอด 15

2.5 การดีมอดดูเลทสัญญาณ AM

2.5.1 ไดโอดดีเทคเตอร์ 17

2.6 หลักการมอดดูเลทแบบ FM 19

2.7 มอดดูเลชันอินเด็กซ์และเปอร์เซ็นต์การมอดดูเลทสัญญาณ

ของสัญญาณ FM 21

2.8 การดีมอดดูเลทสัญญาณ FM 22

2.8.1 วิธีเฟสล็อคลูป 22

2.8.2 วิธีวงจรแยกพัลส์ 26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

2.8.3 วิธีควอดเดรเจอร์ดีเทคเตอร์....28

บทที่ 3 การสื่อสารด้วยเส้นใยแสง

3.1 วิวัฒนาการของการสื่อสารด้วยแสง.... 31

3.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของการสื่อสารด้วยแสง.... 33

3.3 เส้นใยนำแสง.... 33

3.3.1 โครงสร้างพื้นฐานของเส้นใยนำแสง.... 33

3.3.2 การเคลื่อนที่ของแสงในเส้นใยนำแสง.... 34

3.3.3 การแตกกระจายของรูปสัญญาณจากเส้นใยนำแสง.... 37

3.3.4 ชนิดของเส้นใยนำแสง.... 38

3.4 ความสูญเสียของสัญญาณในระบบการสื่อสารด้วยแสง.... 41

3.5 แถบการส่งสัญญาณของเส้นใยนำแสง.... 42

บทที่ 4 ระบบออปโตอิเลคทรอนิคส์

4.1 แหล่งกำเนิดแสง.... 44

4.1.1 ช่วงทำงานของความยาวคลื่น.... 45

4.1.2 พลังงานและการเชื่อมต่อของแสง.... 46

4.1.3 แหล่งกำเนิดแสง LED 46

4.1.4 แหล่งกำเนิดเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์.... 50

4.1.4.1 การปล่อยแสงด้วยการกระตุ้น.... 50

4.1.4.2 Population Inversion.... 51

4.1.4.3 การจัดรูปลำของเลเซอร์.... 52

4.1.5 ความแตกต่างของแหล่งกำเนิด.... 53

4.1.6 ความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอด.... 54

4.1.7 สเปกตรัมของเลเซอร์.... 54

4.1.8 Fiber Transmission windows.... 55

4.2 วงจรขับ

4.2.1 การออกแบบตัวส่งแสง.... 56

4.2.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของตัวส่งแสง.... 56

4.2.3 การออกแบบตัวส่งแสงโดยใช้ LED อย่างง่าย....59

4.2.4 การออกแบบตัวส่งแสงโดยใช้เลเซอร์ไดโอดอย่างง่าย....60

4.3 อุปกรณ์รับแสง....61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

4.3.1 พีเอ็นโฟโต้ไดโอด 62
4.3.2 พีไอเอ็นโฟโต้ไดโอด 64
4.3.3 อะวาลานซ์โฟโต้ไดโอด 65
4.4 คุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง 66
4.5 วงจรอุปกรณ์รับแสง 68
4.5.1 วงจรรับแสงแบบโฟโต้ไดโอด 69
4.5.2 วงจรรับแบบอะวาลานซ์ไดโอด 69
บทที่ 5 การออกแบบวงจรที่ใช้ในโครงงาน 69
5.1 วงจรทางภาคส่ง
5.1.1 วงจรปลีแอมปลิไฟร์ 72
5.1.2 วงจร Amplitude Modulation :AM 73
5.1.3 วงจรมอดดูเลทแบบ FM 74
5.1.4 วงจรขับ 75
5.2 วงจรภาครับ 76
5.2.1 ภาครับก่อนขยาย 76
5.2.2 วงจรขยาย 77
5.2.3 วงจรดีมอดดูเลทของสัญญาณ AM แบบไดโอดดีเทคเตอร์ 78
5.2.4 วงจรดีมอดดูเลทของสัญญาณ FM แบบ PLL 79
5.2.5 วงจรทางภาคขยายเสียง 81
บทที่ 6 การดำเนินการและผลการดำเนินงาน
6.1 วงจรทางภาคส่ง 82
6.1.1 ผลการทดลองของแหล่งกำเนิด AM และ FM 82
6.1.2 ผลการทดลองขอลวงจรส่ง AM และ FM 85
6.2 วงจรทางภาครับ
6.2.1 ผลการทดลองของวงจรรับ 86
6.2.2 ผลการทำงานทางวงจรขยาย 87
6.2.3 ผลการทำงานของวงจรดีมอดดูเลท 88
บทที่ 7 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง
7.1 วงจรภาคส่ง 91
7.2 วงจรภาครับ 91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

7.3 วิจารณ์ผลการทดลอง 92

ภาคผนวก ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ทางอิเลคทรอนิคส์

เอกสารอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ค่าไซด์แบนด์และดัชนีการมอดดูเลท 21

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์แสง 68

ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบตัวรับแสงชนิดต่างๆ 71

ตารางที่ 6.1 แสดงค่าเอาท์พุทที่ได้จากการส่งโดยสายลวดทองแดง..... 91

ตารางที่ 6.2 แสดงค่าเอาท์พุทที่ได้จากการส่งโดยเส้นใยนำแสง..... 93

****

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการทำงานของภาคส่ง 3
รูปที่ 1.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของภาครับ 4
รูปที่ 2.1 แอมปลิจูดมอดดูเลชัน 7
รูปที่ 2.2 สัญญาณอินพุทและสัญญาณเอาท์พุทของแอมปลิจูดมอดดูเลเตอร์..... .. 9
รูปที่ 2.3 แสดงการผิดเพี้ยนของเอ็นเวลโลปที่เกิดจาก overmodulation ซึ่งแอมปลิจูดของสัญญาณข้อมูล V_m มากกว่าแอมปลิจูดของสัญญาณคลื่นพาห์ V_c.... 10
รูปที่ 2.4 สัญญาณ AM แสดงแอมปลิจูดพีคทั้ง V_{max} และ V_{min} 10
รูปที่ 2.5 กราฟแสดงการตอบสนองตามกฎกำลังสอง..... 12
รูปที่ 2.6 วงจรสร้างสัญญาณ AM โดยไดโอด..... 13
รูปที่ 2.7 รูปสัญญาณ AM ที่เกิดจากไดโอดมอดดูเลเตอร์ 14
รูปที่ 2.8 วงจร FET ที่ใช้สร้างสัญญาณ AM..... 15
รูปที่ 2.9 วงจรมอดดูเลชันโดยใช้ PINไดโอด..... 16
รูปที่ 2.10 การดีมอดดูเลชันสัญญาณ AM..... 18
รูปที่ 2.11 วงจรดีมอดดูเลชันโดยวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น..... 19
รูปที่ 2.12 การมอดดูเลชันแบบ Frequency Modulation..... 20
รูปที่ 2.13 พื้นฐานของ PLL 22
รูปที่ 2.14 อินพุทและเอาท์พุทของเฟสดีเทคเตอร์..... 23
รูปที่ 2.15 ลักษณะของ VCO 24
รูปที่ 2.16 เฟสล็อคลูปและการเพิ่มและลดของเฟสเซอร์ของสัญญาณอินพุท..... 25
รูปที่ 2.17 วงจรดีมอดดูเลทสัญญาณ FM แบบการแยกพัลส์เฉลี่ย..... 27
รูปที่ 2.18 รูปคลื่นจากวงจร pulse- averaging discrimation 28
รูปที่ 2.19 วงจรดีมอดดูเลทแบบควอดเดรเจอร์ดีเทคเตอร์..... 29
รูปที่ 2.20 รูปสัญญาณจากวงจรควอดเดรเจอร์ดีเทคเตอร์..... 30
รูปที่ 3.1 แสดงการทำงานของโฟโตโฟน..... 32
รูปที่ 3.2 แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของระบบการสื่อสารเส้นใยแสง..... 33
รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเส้นใยแสง..... 34
รูปที่ 3.4 การหักเหของแสง..... 35
รูปที่ 3.5 การหักเหของแสงผ่านแท่งแก้วตัน..... 36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 3.6 การเคลื่อนที่ของแสงภายในแท่งแก้ว....36
รูปที่ 3.7 การเดินทางของแสงภายในเส้นใยนำแสง.... 38
รูปที่ 3.8 ดัชนีการหักเหแสงของเส้นใยนำแสงชนิดดัชนีขั้นบันได.... 39
รูปที่ 3.9 ดัชนีการหักเหแสงของเส้นใยนำแสงชนิดดัชนีรูปมน.... 40
รูปที่ 3.10 แนวทางของแสงในแกนเส้นใยนำแสงชนิดดัชนีรูปมน.... 40
รูปที่ 3.11 การสูญเสียจากการโค้งงอเส้นใยนำแสง.... 42
รูปที่ 4.1 แสดงชื่อเรียกและชนิดต่างๆของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.... 44
รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างความกว้างของสเปกตรัมของ LED และ เซมิคอนดัคเตอร์เลเซอร์.... 45
รูปที่ 4.3 การส่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงสู่เส้นใยนำแสง.... 46
รูปที่ 4.4 ลักษณะการทำงานของ LED 47
รูปที่ 4.5 ระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำ.... 48
รูปที่ 4.6 ลักษณะการส่งแสงของ LED.... 49
รูปที่ 4.7 การปล่อยแสงของ LED แบบ edge-emitter diode 50
รูปที่ 4.8 แสดงไดอะแกรมของการปล่อยแสงแบบต่างๆ.... 51
รูปที่ 4.9 พื้นฐานการเกิดเซมิคอนดัคเตอร์เลเซอร์.... 52
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของกระแสขับกับกำลังของแสงที่ปล่อย.... 53
รูปที่ 4.11 Fiber Optic transmission windows.... 55
รูปที่ 4.12 ส่วนประกอบในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสง.... 57
รูปที่ 4.13 ส่วนเชื่อมต่อทางแสงของตัวส่ง.... 58
รูปที่ 4.14 วงจรขับอย่างง่ายสำหรับ LED Source.... 59
รูปที่ 4.15 วงจรขับของเลเซอร์ไดโอดแบบอนาล็อก.... 60
รูปที่ 4.16 วงจรขับเลเซอร์ไดโอดแบบดิจิตอล.... 61
รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะของ Depletion Zone.... 62
รูปที่ 4.18 แสดงลักษณะของ PN photodiode.... 63
รูปที่ 4.19 โครงสร้างของ PIN photodiode.... 64
รูปที่ 4.20 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสง.... 65
รูปที่ 4.21 โครงสร้างของอะวาลานซ์โฟโต้ไดโอด.... 66
รูปที่ 4.22 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้และกระแสโฟโต้.... 67
รูปที่ 4.23 บล็อกไดอะแกรมของวงจรรับแสง....68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 4.24 วงจรรับแสงของ PIN และ PN photodiode..... 69
รูปที่ 4.25 บล็อกไดอะแกรม PIN-FET receiver circuit..... 69
รูปที่ 4.26 วงจรรับแบบอะวานลานซ์โฟโต้ไดโอดอย่างง่าย..... 70
รูปที่ 5.1 แสดงวงจรปรีแอมปลิไฟล์..... 73
รูปที่ 5.2 วงจรมอดดูเลทแบบ AM 74
รูปที่ 5.3 แสดงวงจรมอดดูเลทแบบ FM.....75
รูปที่ 5.4 แสดงวงจรขับ LED ที่ใช้ในโครงงาน.....76
รูปที่ 5.5 แสดงวงจรก่อนภาคขยาย.....77
รูปที่ 5.6 วงจรขยายสัญญาณ.....78
รูปที่ 5.7 แสดงวงจรดีมอดดูเลทแบบ AM..... 78
รูปที่ 5.8 แสดงบล็อกไดอะแกรมของเฟสล็อคลูป..... 79
รูปที่ 5.9 แสดงวงจรดีมอดดูเลทสัญญาณ FM..... 80
รูปที่ 5.10 แสดงวงจรภาคขยายเสียง..... 81
รูปที่ 6.1 แสดงการจัดอุปกรณ์ทั้งหมดรวมไว้ด้วยกัน..... .82
รูปที่ 6.2 แสดงลักษณะรูปคลื่นของคลื่นพาห์ที่ 30 kHz. ขณะที่ยังไม่มีสัญญาณ
อินพุทเข้ามา..... 83
รูปที่ 6.3 แสดงลักษณะสัญญาณ AM ที่ความถี่อินพุท 500 Hz. แอมปลิจูด 6.0 Volts
เปอร์เซ็นต์การมอดดูเลทเป็น93.5.....84
รูปที่ 6.4 แสดงลักษณะสัญญาณ FM ที่ความถี่อินพุท 500 Hz.
แอมปลิจูด 7.0 Volts..... 84
รูปที่ 6.5 แสดงสัญญาณ AM ที่ออกจาก LED ก่อนเข้าเส้นใยนำแสง..... 85
รูปที่ 6.6 แสดงสัญญาณ FM ที่ออกจาก LED ก่อนเข้าเส้นใยนำแสง..... 85
รูปที่ 6.7 แสดงสัญญาณ AM ที่รับจากวงจรรับ..... 86
รูปที่ 6.8 แสดงสัญญาณ FM ที่รับจากวงจรรับ..... 87
รูปที่ 6.9 แสดงลักษณะสัญญาณ AM ที่ถูกขยายขึ้น..... 87
รูปที่ 6.10 แสดงลักษณะสัญญาณ FM ที่ถูกขยายขึ้น..... 88
รูปที่ 6.11 แสดงลักษณะสัญญาณข้อมูลที่ได้จากการใช้ไดโอดดีเทคเตอร์ดีมอดดูเลท
สัญญาณ AM..... 88
รูปที่ 6.13 แสดงลักษณะสัญญาณข้อมูลที่ได้จากการใช้เฟสล็อคลูปดีมอดดูเลท
สัญญาณ FM..... 89

เอกสารนี้เป็นเอกสาร[illegible]ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

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

1.1 คุณสมบัติพิเศษต่างๆของการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง

ระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารด้วยสายเคเบิ้ลที่ทำด้วยโลหะ (Metalic Cable) แล้วข้อดีต่างๆที่เกิดจากคุณสมบัติของเส้นใยนำแสงเอง มีดังนี้

1. ให้แบนด์วิธที่กว้างกว่า (Greater Bandwidth) การใช้คลื่นพาห์ที่มีความถี่สูงในระบบสื่อสาร ทำให้แบนด์วิธ (Bandwidth) ของสัญญาณกว้างมากขึ้นด้วย เพราะเส้นใยนำแสง (Fiber Optic) ขึ้นกับคลื่นพาห์ที่มีความถี่อยู่ในช่วง 10^{13}- 10^{14} Hz เมื่อเปรียบเทียบกับความถี่วิทยุซึ่งมีความถี่ 10^{6}-10^{8} Hz แล้วจะเห็นว่าแบนด์วิธของสัญญาณกว้างขึ้นถึงประมาณ 10^{6} เท่า

2. ขนาดเล็กและน้ำหนักเบา (Small Size and Light Weight) เส้นใยนำแสงเพียงเส้นเดียวสามารถแทนคู่สายทองแดงขนาดใหญ่ๆแต่ละคู่ได้ เช่น สายเคเบิ้ลทางโทรศัพท์ที่มี 1,000 คู่สาย มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7-10 เซนติเมตร สามารถใช้เส้นใยนำแสงเพียงเส้นเดียวมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตรได้ในการส่งจำนวนช่องสัญญาณที่เท่ากัน

3. การสูญเสียต่ำ (Low Attenuation) เส้นใยนำแสงมีค่าการสูญเสียเนื่องจากมี Attenuation น้อยกว่าสายคู่ (Twisted Wire) หรือโคแอกเซียลเคเบิล (Coaxial Cable)

4. ไม่ถูกรบกวนโดย EMI (Freedom From EMI) เนื่องจากเส้นใยนำแสงไม่ได้สร้างจากเส้นลวดเหมือนสายเคเบิล แต่สร้างจากแก้ว (Glass) หรือซิลิกอน (Silicon) ซึ่งเป็นฉนวน ดังนั้นจึงไม่แผ่หรือถูกรบกวนโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro-Magnetic Interference : EMI) และไม่ต้องใช้เทคนิค หรือวิธีการชิลด์ (Shield) ที่มีราคาแพงหรือยุ่งยากเพื่อป้องกันการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. คงทนไม่ถูกรบกวนโดยสภาพดินฟ้าอากาศ (Ruggedness) แก้วหรือซิลิคอนมีความแข็งกว่าโลหะถึง 20 เท่า และซิลิคอนหรือแก้วก็เป็นธาตุเฉื่อย ดังนั้นสภาพแวดล้อมจึงมีผลน้อยกว่าแบบสายที่ทำด้วยโลหะ

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

7. ราคาถูกกว่า (Low Cost) ราคาของเส้นใยนำแสง ในปัจจุบันมีราคาต่ำลงเรื่อยๆในขณะที่ราคาของสายโลหะมีราคาเพิ่มขึ้น ในทางปฏิบัติทุกวันนี้ ราคาของการออกแบบระบบที่ใช้เส้นใยนำแสงมีราคาต่ำกว่าระบบแบบใช้โลหะ

1.2 การเชื่อมต่อของเส้นใยนำแสง

การเชื่อมต่อของเส้นใยนำแสงจะเชื่อมระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ สัญญาณที่เข้ามาอาจจะเป็นดิจิตอล หรือ อนาล็อกก็ได้ ข้อมูลเหล่านี้จะนำมาทำการมอดดูเลททางไฟฟ้าก่อน (Premodulated) ต่อจากนั้นจะถูกส่งไปยังแหล่งกำเนิดแสง เพื่อทำให้แสงที่ถูกขับออกมาเป็นแบบการมอดดูเลทบนความเข้มแสง (Intensity Modulation) ซึ่งตัวกำเนิดแสงที่ใช้ คือ LED หรือ Laser Diode โดยที่สัญญาณที่เข้ามาถ้าเป็นอนาล็อก ตัว LED หรือ Laser Diode จะเกิดการสว่างมากหรือสว่างน้อย ตามระดับความแรงของสัญญาณอนาล็อก แต่ถ้าสัญญาณที่เข้ามาเป็นดิจิตอล ตัว LED หรือ Laser Diode จะสว่างหรือดับ ขึ้นอยู่กับระดับของสัญญาณทางดิจิตอล คือ “1” หรือ “0” ซึ่งก็คือ ON หรือ OFF นั่นเอง สัญญาณแสงที่ได้จากตัว LED หรือ Laser Diode จะถูกส่งผ่านเข้าไปในเส้นใยนำแสง เมื่อแสงผ่านเข้าไปในเส้นใยนำแสงแล้วมักจะมีการลดทอน (Attenuation) และมีการบิดเบือนไปของสัญญาณ (Dispersion) ซึ่งทำให้แบนด์วิธ (Bandwidth) หรืออัตราการส่งถูกจำกัดไปด้วย ทำให้แสงที่ออกจากจุดปลายของสายเส้นใยนำแสง แสงที่จุดปลายนี้จะพุ่งเข้าสู่ตัวรับ (Detector) ซึ่งจะเป็นตัวเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าต่อไป

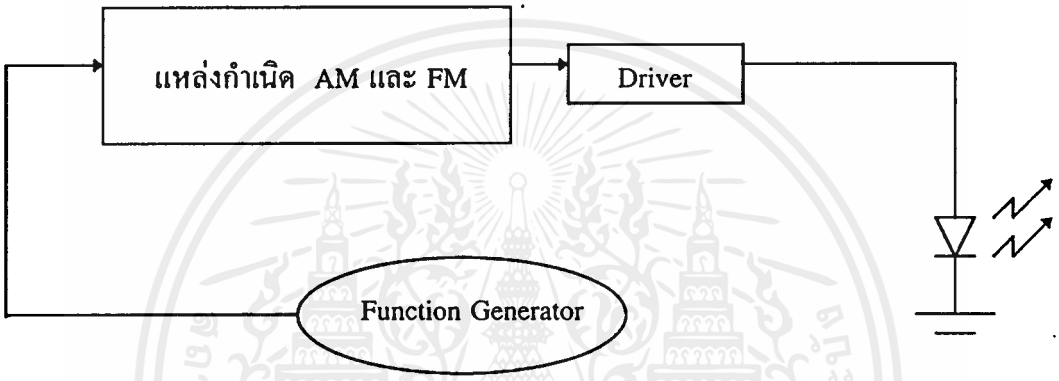
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงงานพิเศษ

เพื่อศึกษาเรียนรู้และเข้าใจในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง (Optical Fiber Communication system) โดยใช้สัญญาณ AM และ FM เป็นสัญญาณข้อมูลที่เราต้องการส่งเข้าไปในสายเส้นใยนำแสง ซึ่งจะสร้างวงจรที่กำเนิดสัญญาณ AM และ FM ให้แก่ระบบก่อน และศึกษาการทำงานของวงจรที่สร้างขึ้นและทั้งวงจรที่เกี่ยวกับเส้นใยนำแสง ซึ่งในโครงงานพิเศษนี้จะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนใหญ่ๆ ด้วยกัน คือ ภาคส่ง เส้นใยนำแสง และภาครับ ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.1 หลักการของภาคส่ง

เนื่องจากในโครงงานนี้เป็นการสื่อสารโดยใช้สัญญาณอินพุทที่เป็นแบบ อนาล็อก ดังนั้นจึงใช้ LED เป็นแหล่งกำเนิดแสง เพราะว่าพลังงานแสงที่มันทำให้ออกมามีความเป็นเชิงเส้นดีกว่า Laser Diode และในการนำมาใช้งานสามารถทำได้ง่ายกว่า Laser Diode ในส่วนของวงจรภาคส่งแสดงเป็นองค์ประกอบได้ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการทำงานของภาคส่ง

จากรูปที่ 1.1 แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมที่เป็นส่วนประกอบทางภาคส่ง ซึ่งสัญญาณความถี่ที่ให้กับแหล่งกำเนิดสัญญาณ AM และ FM นั้นจะใช้เป็นสัญญาณข้อมูลก่อนถูกมอดดูเลท สัญญาณที่ถูกมอดดูเลทแล้วจะออกมาจากส่วนแหล่งกำเนิดนี้ ซึ่งจะมีความถี่เปลี่ยนแปลงไปตามแอมปลิจูดของสัญญาณความถี่ที่ใส่เข้าไปในกรณีที่เป็นสัญญาณ FM หากเป็นสัญญาณ AM ความถี่ที่ใส่เข้าไปแอมปลิจูดจะยังคงที่ จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งไปยังวงจรขับ หรือ Driver เพื่อทำการมอดดูเลทสัญญาณทางไฟฟ้าเข้ากับสัญญาณแสง ทำให้ LED สว่างตามความเข้มของสัญญาณแล้วส่งแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสง

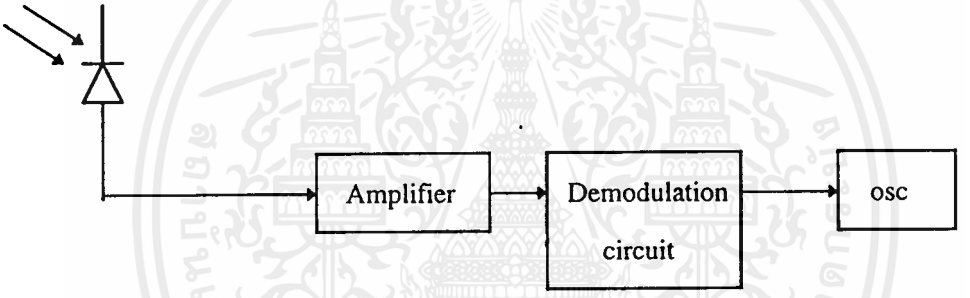
1.3.2 เส้นใยนำแสง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.3 หลักการของภาครับ

หน้าที่ของภาครับ คือเป็นตัวที่ทำการตรวจรับ (Detect) สัญญาณแสงที่ส่งผ่านออกมาจากเส้นใยนำแสงแล้วแปลงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า จากนั้นนำเข้าสู่วงจรแอมปลิไฟร์ขยายสัญญาณให้มีค่าแอมปลิจูดมากขึ้น จากนั้นนำเข้าสู่วงจรดีมอดดูเลทสัญญาณเพื่อถอดสัญญาณข้อมูลออกมา และวงจรกรองความถี่ต่ำ สัญญาณที่ได้จะแสดงทางออสซิลโลสโคป (oscilloscope) ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของภาครับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีการมอดดูเลทเบื้องต้น

สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ใช้ในการสื่อสารทางอิเลคทรอนิกส์คือการมอดดูเลชัน การมอดดูเลชัน เป็นกระบวนการของการนำสัญญาณข้อมูลที่จะส่งไปแปลงเป็นสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าความถี่เดิม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะส่งสัญญาณข้อมูลไปยังที่ใดที่หนึ่งในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยผ่านคลื่นวิทยุ โทรเลข(wire)หรือเคเบิลเส้นใยแสง (Fiber optic cable) ประโยชน์ของกระบวนการมอดดูเลชันที่สำคัญคือ ทำให้เกิดการย้ายสเปคตรัมของสัญญาณขึ้นและทำให้สัญญาณข้อมูลถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวนภายนอกน้อยลง ในระบบการสื่อสารทางอิเลคทรอนิกส์การมอดดูเลชันที่นิยมใช้มีหลาย แบบ เช่น AM (amplitude modulation) และ FM (frequency modulation)ความแตกต่างของกระบวนการมอดดูเลชันทั้งสองนั้นคือกระบวนการมอดดูเลชันแบบ AM นั้นเป็นการฝากสัญญาณไปกับขนาด (amplitude)ของคลื่นพาห์ เป็นการทำให้ขนาดคลื่นพาห์เปลี่ยนแปลงไปตามความแรงของสัญญาณข้อมูล โดยยังคงรักษาความถี่ของคลื่นพาห์นั้นให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา ส่วนกระบวนการมอดดูเลชันแบบ FM นั้นเป็นการฝากข้อมูลไปกับความถี่ของคลื่นพาห์ เป็นกระบวนการทำให้ความถี่ของคลื่นพาห์เปลี่ยนแปลงไปตามความแรงของสัญญาณข้อมูล โดยยังคงรักษาขนาดของคลื่นพาห์ให้มีค่าคงที่อยู่เสมอ อย่างไรก็ตามระบบมอดดูเลชันสามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภท คือ

1. ระบบมอดดูเลชันแบบอนาล็อก (analog modulation) ระบบนี้จะให้สัญญาณที่ถูกมอดดูเลท (modulated signal) เป็นสัญญาณที่มีค่าต่อเนื่องแบบอนาล็อก เช่น เอเอ็ม เอฟเอ็ม พีเอ็ม พัลส์มอดดูเลชันต่างๆ เป็นต้น

2. ระบบมอดดูเลชันแบบดิจิตอล (digital modulation) ระบบนี้จะให้สัญญาณที่ถูกมอดดูเลทเป็นสัญญาณที่มีค่าตัวเลขลงตัวแบบดิจิตอล เช่น พีซีเอ็ม เป็นต้น

2.1. หลักการมอดดูเลชัน (principle of Modulation)

สัญญาณข้อมูล เช่น สัญญาณเสียง สัญญาณภาพ หรือ ข้อมูลไบนารี ในบางครั้งสามารถทำการส่งได้โดยตรงจากจุดหนึ่งไปยังจุดอื่นๆโดยอาศัยตัวกลาง (medium) ในการส่ง เช่น การส่งสัญญาณเสียงโดยใช้ระบบสายในโทรศัพท์ การส่งสัญญาณภาพระหว่างจุดสองจุดโดยใช้สายโคแอกเซียล (coaxial cables) อย่างไรก็ตามที่ระยะทางไกลๆ การส่งสัญญาณโดยใช้สาย

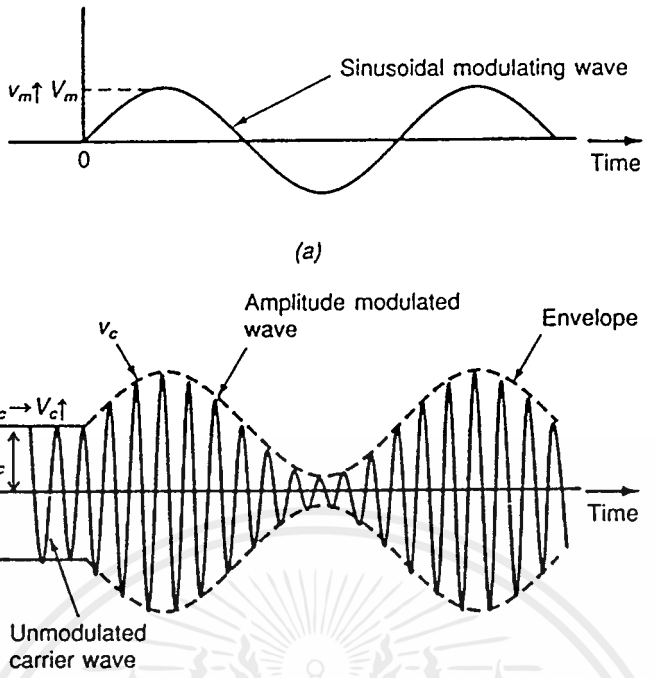
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคเบิลไม่สามารถทำได้ กรณีนี้จะใช้การสื่อสารทางวิทยุ (radio communication) ซึ่งการสื่อสารโดยวิธีนี้จะทำให้สามารถส่งข้อมูลไปได้ในระยะทางไกลมากขึ้นซึ่งจะต้องใช้สัญญาณที่มีความถี่สูงช่วยในการส่ง แต่เนื่องจากเราไม่สามารถที่จะทำการแปลงสัญญาณข้อมูลไปเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้โดยตรง เพราะต้องใช้สายอากาศ(antenna)ที่มีความยาวมากและทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างสัญญาณได้ ด้วยเหตุนี้จึงต้องทำการย้ายสัญญาณข้อมูลไปยังจุดที่มีความถี่สูงกว่า ซึ่งก็คือกระบวนการของการมอดดูเลทโดยการสร้างสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าซึ่งภายในมีสัญญาณข้อมูลเดิม การมอดดูเลชันอาจกล่าวได้ว่าเป็นกระบวนการของการแปลงคุณลักษณะของสัญญาณหนึ่งให้เข้ากันกับคุณลักษณะของสัญญาณอื่นๆ โดยส่วนใหญ่สัญญาณข้อมูลเช่นสัญญาณเสียง สัญญาณภาพ ข้อมูลไบนารี หรือสัญญาณข้อมูลอื่นๆตามปกติจะถูกแปลงเป็นสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าเดิม ซึ่งรู้จักกันดีว่าเป็นคลื่นพาห์(carrier) สัญญาณข้อมูลตามปกติเรียกว่า modulating signal และสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าซึ่งถูกมอดดูเลทเรียกว่า คลื่นพาห์ (carrier) หรือ modulated wave คลื่นพาห์ตามปกติเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ ในขณะที่สัญญาณข้อมูลเป็นได้ทั้งสัญญาณอนาล็อกและสัญญาณดิจิตอลโดยส่วนใหญ่ความถี่คลื่นพาห์จะมีค่าสูงกว่าความถี่สูงสุดของสัญญาณข้อมูล

2.2. หลักการมอดดูเลทแบบแอมปลิจูดมอดดูเลชัน (Amplitude Modulation : AM)

กระบวนการมอดดูเลชันแบบ AM เป็นการฝากข้อมูลไปกับขนาด(amplitude) ของคลื่นพาห์ เป็นการทำให้ขนาดของคลื่นพาห์เปลี่ยนแปลงไปตามความแรงของสัญญาณข้อมูล โดยยังคงรักษาความถี่ของคลื่นพาห์นั้นให้มีค่าคงที่อยู่ตลอดเวลา ดังรูปที่2.1 สังเกตได้ว่าความถี่คลื่นพาห์มีค่าคงที่ในระหว่างกระบวนการมอดดูเลชันแต่แอมปลิจูดจะเปลี่ยนแปลงให้เข้ากันกับสัญญาณข้อมูล การที่แอมปลิจูดของสัญญาณข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นเหตุทำให้แอมปลิจูดคลื่นพาห์ทั้งด้านบวกและด้านลบมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1. แอมปลิจูดมอดดูเลชัน (a) สัญญาณข้อมูล
(b) สัญญาณที่ถูกมอดดูเลทด้วยคลื่นพาห์

การย้ายสเปกตรัมของสัญญาณข้อมูลที่เกิดขึ้นในระบบ AM สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้คือ สมมติว่าทั้งสัญญาณข้อมูลและคลื่นพาห์เป็นสัญญาณรูปไซน์ทั้งคู่ คือ

คลื่นพาห์ $v_c = V_c \sin 2\pi f_c t$ --------- (1)

โดยที่ v_c แทนค่าของแรงดันที่เวลาใดๆใน 1 รอบ

V_c แทนค่า peak ของคลื่นไซน์ที่วัดจากศูนย์ถึงค่าแอมปลิจูดสูงสุดของสัญญาณด้านบวกหรือด้านลบ

f_c แทนความถี่ของคลื่นพาห์

t แทนคาบเวลา

ในทำนองเดียวกันสัญญาณข้อมูลสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

สัญญาณข้อมูล $v_m = V_m \sin 2\pi f_m t$ --------- (2)

โดยที่ f_m คือ ความถี่ของสัญญาณข้อมูล

จากรูปที่ 2.1 พบว่า สัญญาณข้อมูลจะใช้ค่าพีคของคลื่นพาห์ที่มากกว่าศูนย์เป็นจุดอ้างอิง เอ็นเวลโลป(envelope)ของสัญญาณข้อมูลจะเปลี่ยนแปลงสูงกว่าและต่ำกว่าแอมปลิจูดพีคของคลื่นพาห์ นั่นคือเส้นอ้างอิงที่ศูนย์ของสัญญาณข้อมูลจะตรงกันกับค่าพีคของคลื่นพาห์ที่ไม่ถูกมอดดูเลท(unmodulated carrier) ด้วยเหตุนี้แอมปลิจูดของคลื่นพาห์และสัญญาณข้อมูลจึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยทั่ว ไปแอมปลิจูดของสัญญาณข้อมูล(modulating signal) ควรจะน้อยกว่าแอมปลิจูดของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นพาห์ ถ้าแอมปลิจูดของสัญญาณข้อมูลมากกว่าแอมปลิจูดของคลื่นพาห์จะทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณ (distortion) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ข้อมูลที่จะส่งไปไม่ถูกต้อง สิ่งสำคัญสำหรับการมอดดูเลชันแบบ AM นั้นคือค่าพีคหรือแอมปลิจูดทางด้านบวกหรือด้านลบของสัญญาณข้อมูลจะต้องน้อยกว่าค่าพีคหรือแอมปลิจูดทางด้านบวกหรือด้านลบของคลื่นพาห์ จากการใช้สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับคลื่นพาห์และสัญญาณข้อมูล เราสามารถสร้างสมการใหม่สำหรับคลื่นที่ผ่านการมอดดูเลทแล้ว โดยในตอนแรกให้ค่าพีคของคลื่นพาห์เป็นจุดอ้างอิงสำหรับสัญญาณข้อมูล ค่าสัญญาณข้อมูลบวกหรือลบออกจากค่าพีคของคลื่นพาห์ ดังนั้นค่าพีคของเอ็นเวลโลปโวลเตจที่จุดสูงสุดหรือต่ำสุดสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$v_1 = V_c + v_m \qquad \text{---------- (3)}$$

แทน v_m จากสมการที่ (2) จะได้ว่า

$$v_1 = V_c + V_m \sin 2\pi f_m t \qquad \text{---------- (4)}$$

ซึ่งจากสมการจะได้ค่าของสัญญาณข้อมูลบวกกับค่าพีคของคลื่นพาห์ จากสมการพบว่าค่าของ v_1 คือ เอ็นเวลโลปของคลื่นพาห์ ดังนั้นเราสามารถเขียนค่าของคลื่นที่ผ่านการมอดดูเลท เป็น

$$v_2 = v_1 \sin 2\pi f_c t \qquad \text{---------- (5)}$$

แทนค่า v_1 จากสมการที่ (4) ลงในสมการที่ (5) จะได้ว่า

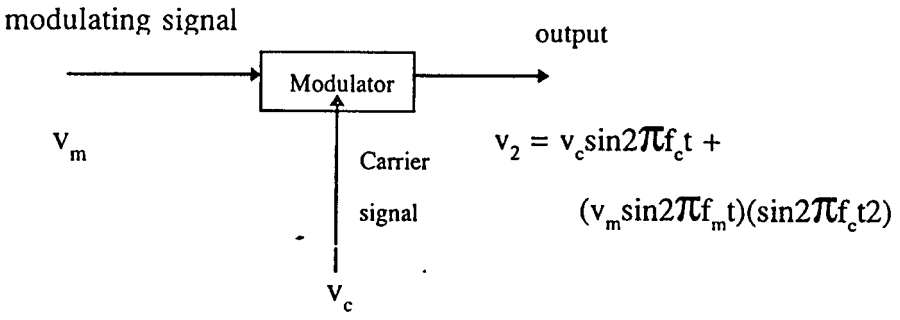
$$\begin{aligned} v_2 &= (V_c + V_m \sin 2\pi f_m t) \sin 2\pi f_c t \\ &= V_c \sin 2\pi f_c t + (V_m \sin 2\pi f_m t)(\sin 2\pi f_c t) \end{aligned} \qquad \text{--------- (6)}$$

Carrier + modulation × carrier

สมการนี้ประกอบด้วยสองส่วน โดยส่วนแรกคือคลื่นพาห์และส่วนที่สองคือคลื่นพาห์คูณกับสัญญาณข้อมูล ซึ่งในส่วนที่สองของสมการนี้คือคุณสมบัติของ AM นั่นเอง

วงจรที่ใช้สำหรับสร้าง AM เรียกว่า มอดดูเลเตอร์ (modulator) ซึ่งประกอบด้วยสัญญาณอินพุทสองสัญญาณ คือ สัญญาณคลื่นพาห์และสัญญาณข้อมูล และสัญญาณเอาท์พุทที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 สัญญาณอินพุทและสัญญาณเอาท์พุทของแอมปลิจูดมอดดูเลเตอร์

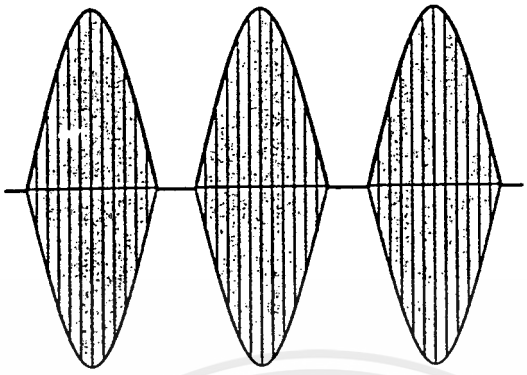
2.3 มอดดูเลชันอินเด็กซ์และเปอร์เซ็นต์ของการมอดดูเลทสัญญาณแบบ AM

การมอดดูเลทสัญญาณแบบ AM แรงดันของสัญญาณข้อมูล V_m จะต้องมีค่าน้อยกว่าแรงดันของคลื่นพาห์ V_c ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างแอมปลิจูดของสัญญาณข้อมูลและคลื่นพาห์จึงเป็นสิ่งสำคัญ ความสัมพันธ์นี้แสดงในเทอมของอัตราส่วนที่เรียกว่า ***มอดดูเลชันอินเด็กซ์ m*** (บางทีเรียกว่า modulation factor, modulation coefficient หรือ degree of modulation) โดยที่ m เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันสัญญาณข้อมูลต่อแรงดันคลื่นพาห์

$$m = \frac{V_m}{V_c} \qquad \text{.....(7)}$$

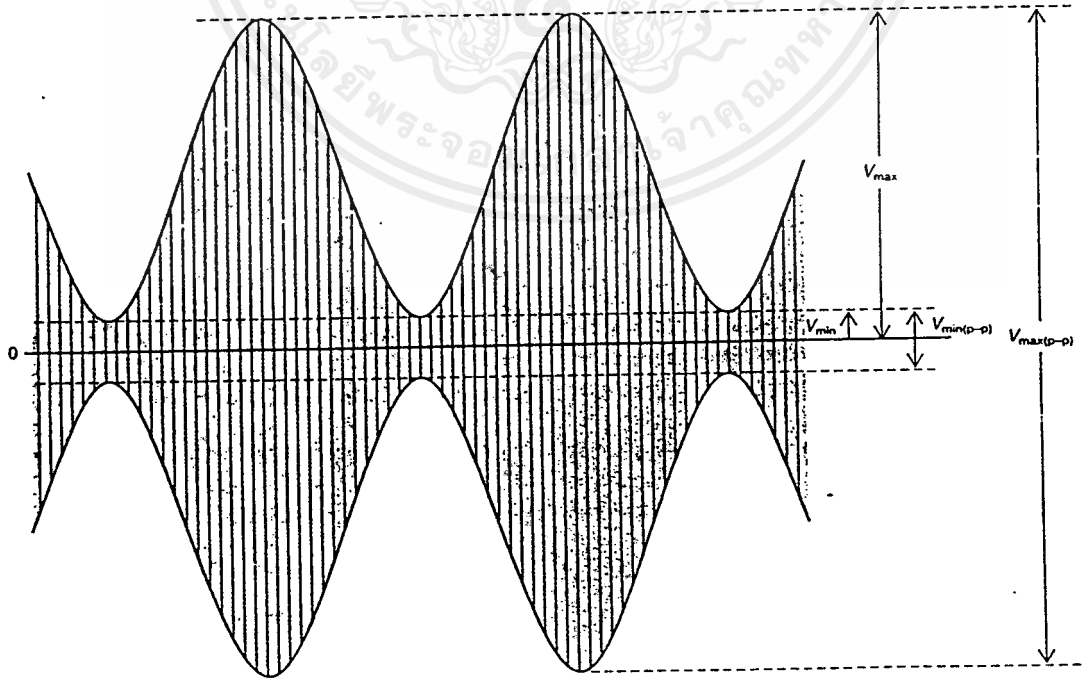
มอดดูเลชันอินเด็กซ์จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1 ถ้าแอมปลิจูดของแรงดันสัญญาณข้อมูล (modulating voltage) มีค่ามากกว่าแอมปลิจูดของแรงดันคลื่นพาห์ (carrier voltage) m จะมีค่ามากกว่า 1 ซึ่งจะทำให้เกิดการผิดเพี้ยน (distortion) ของสัญญาณขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ในที่นี้สัญญาณข้อมูลมอดดูเลทกับคลื่นพาห์ โดยแรงดันสัญญาณข้อมูลมีค่ามากกว่าแรงดันคลื่นพาห์ ซึ่งกรณีนี้เรียกว่า *overmodulation* สัญญาณที่ได้รับจะสร้างสัญญาณเอาท์พุทในรูปของเอ็นเวลโลป ซึ่งในกรณีนี้สัญญาณรูปไซน์ทางด้านลบจะถูกตัดออก แต่ถ้าแอมปลิจูดของสัญญาณข้อมูลน้อยกว่าแอมปลิจูดของคลื่นพาห์ จะไม่เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณ ในทางอุดมคติถ้า $V_m = V_c$ หรือ $m = 1$ จะได้สัญญาณเอาท์พุทที่มีค่ามากที่สุดที่ตัวรับ (receiver) โดยไม่ทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงการผิดเพี้ยนของเอ็นเวลโลปที่เกิดจาก overmodulation ซึ่งแอมปลิจูดของสัญญาณข้อมูล V_m มากกว่าแอมปลิจูดของสัญญาณคลื่นพาห์ V_c

มอดดูเลชันอินเด็กซ์สามารถหาได้จากการวัดค่าของแรงดันสัญญาณข้อมูลกับค่าแรงดันคลื่นพาห์แล้วคำนวณหาอัตราส่วน อย่างไรก็ตามสัญญาณ AM ที่ปรากฏบนจอออสซิลโลสโคป เราสามารถคำนวณหาค่ามอดดูเลชันอินเด็กซ์ได้จากค่า V_{max} และ V_{min} ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สัญญาณ AM แสดงแอมปลิจูดพีค ทั้ง V_{max} และ V_{min}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพีคของสัญญาณข้อมูล V_m มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันพีคสูงสุดกับต่ำสุด ดังสมการ

$$V_m = \frac{V_{max} - V_{min}}{2} \quad \text{.....(8)}$$

จากรูปที่ 2.4 จะพบว่า V_{max} เป็นค่าพีคของสัญญาณในระหว่างการมอดดูเลทสัญญาณ ในขณะที่ V_{min} เป็นค่าต่ำสุดของ modulated wave ค่า V_{max} เป็นครึ่งหนึ่งของค่า $V_{max(p-p)}$ของสัญญาณ AM หรือ $V_{max\ (p-p/2)}$ และถ้าทำการลบค่า V_{min} ออกจากค่า V_{max} จะได้ค่า peak-peak ของสัญญาณข้อมูล (modlating signal) โดยครึ่งหนึ่งของค่า peak-peak คือค่าพีคที่ต้องการ

ค่าพีคของสัญญาณคลื่นพาห์ (carrier) V_c เป็นค่าเฉลี่ยของ V_{max} และ V_{min} โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$V_c = \frac{V_{max} + V_{min}}{2} \quad \text{.....(9)}$$

แทนค่าที่ได้ลงในสมการของมอดูเลชันอินเด็กซ์ จะได้ว่า

$$m = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max} + V_{min}} \quad \text{.....(10)}$$

โดยที่ค่า V_{max} และ V_{min} สามารถอ่านได้จากจอออสซิลโลสโคป และเมื่อทำการคูณค่ามอดดูเลชันอินเด็กซ์ด้วย 100 จะเรียกว่า เปอร์เซ็นต์ของการมอดดูเลท ขนาดของสัญญาณ AM โดยทั่วไปจะแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์การมอดดูเลทมากกว่าการแสดงในรูปของเศษส่วน จำนวนที่มากที่สุดของการมอดดูเลทโดยปราศจากการผิดเพี้ยนของสัญญาณจะมีค่าเท่ากับ 100% โดย V_c ต้องเท่ากับ V_m

2.4 วงจรการมอดดูเลทแบบ AM

ในการสร้างการมอดดูเลทแบบ AM มี 2 วิธีด้วยกัน โดยวิธีแรกเป็นการคูณสัญญาณคลื่นพาห์ด้วยอัตราขยายหรือ attenuation factor ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณข้อมูล วิธีที่สองเป็นการรวมแบบเชิงเส้นหรือเป็นการนำสัญญาณคลื่นพาห์และสัญญาณข้อมูลมาบวกกัน และทำการป้อนสัญญาณไปยังอุปกรณ์หรือวงจรที่ไม่เป็นแบบเชิงเส้น

สำหรับหลักการทำงานของวิธีแรกนั้นจะอาศัยสมการพื้นฐานของAM ดังนี้คือ

$$V_{am} = V_c \sin 2\pi f_c t + (V_m \sin 2\pi f_m t)(\sin 2\pi f_c t)$$

และเนื่องจากมอดดูเลชันอินเด็กซ์ มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m = V_m / V_c$$

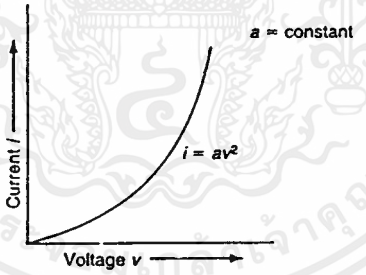
ดังนั้น $$V_m = mV_c$$

นำสมการดังกล่าวแทนลงในสมการข้างบน จะได้ว่า

$$V_{am} = \sin 2\pi f_c t \, (V_c + mV_c \sin 2\pi f_m t)$$

ซึ่งจากสมการดังกล่าว พบว่าสัญญาณ AM นั้นจะได้จากการคูณสัญญาณคลื่นพาห์ด้วยแฟคเตอร์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 บวกกับสัญญาณข้อมูลคลื่นไซน์ ถ้าสามารถสร้างวงจรที่มีอัตราขยาย หรือการลดทอน(attenuation)เปลี่ยนแปลงตามสัญญาณข้อมูล จะทำให้เราสามารถสร้างสัญญาณ AM ได้

ส่วนวิธีที่สองเป็นการรวมกันแบบเชิงเส้นระหว่างสัญญาณคลื่นพาห์กับสัญญาณข้อมูล ดังนั้นเราจะใช้แรงดันไฟฟ้าเพื่อที่จะเปลี่ยนกระแสในอุปกรณ์อิเลคทรอนิกส์ที่ไม่เป็นแบบเชิงเส้น เช่น FET (Field-effect transistor) ซึ่งกราฟที่แสดงกระแสที่เป็นสัดส่วนกับค่าแรงดันกำลังสองจะได้เป็นรูปพาราโบลา ซึ่งเรียกว่า การสนองตอบการทำงานแบบกฎกำลังสอง ซึ่งวงจรในวิธีที่ 2 นี้จะให้สัญญาณที่ไม่ต้องการมาด้วย เช่นจะเกิดสัญญาณฮาโมนิกที่ 2 ขึ้นพร้อมกับสัญญาณ AM ที่เกิดขึ้นแต่เราก็สามารถใช้วงจรกรอง (filter) กรองเอาสัญญาณนั้นออกไปได้



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงการตอบสนองตามกฎกำลังสอง

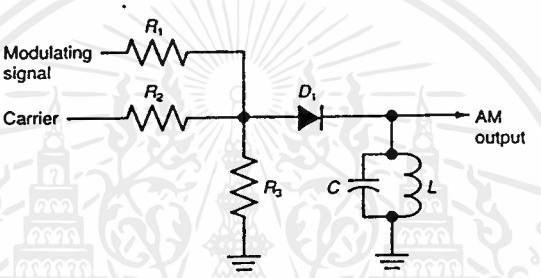
ไดโอดและไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (bipolar transistors) ต่างก็เป็นอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นทั้งคู่ แต่การตอบสนองต่อการทำงานไม่เป็นไปตามกฎกำลังสอง (square law) แต่ก็สามารถจะนำมาใช้สร้างสัญญาณ AM ได้ อุปกรณ์พวกนี้จะสร้างสัญญาณอื่นขึ้นมาด้วย คือ สัญญาณฮาโมนิกที่ 3 ซึ่งแตกต่างจากพวก FET แต่วงจรก็ยังสามารถที่จะกรองสัญญาณส่วนนี้ออกไปได้เหมือนเดิม จึงสามารถนำพวกไดโอดและไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์มาใช้ในการสร้างสัญญาณ AM ได้เช่นกัน

2.4.1 วงจรไดโอด (Amplitude Modulation with a Diode)

วิธีที่เก่าแก่ที่สุดและเป็นวิธีที่ง่ายสุดในการสร้างสัญญาณ AM แสดงดังรูปที่ 2.6 ซึ่งประกอบไปด้วยตัวต้านทานต่อเข้ากัน , วงจรไดโอดเรคติไฟล์ (diode rectifier) และวงจรแอลซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

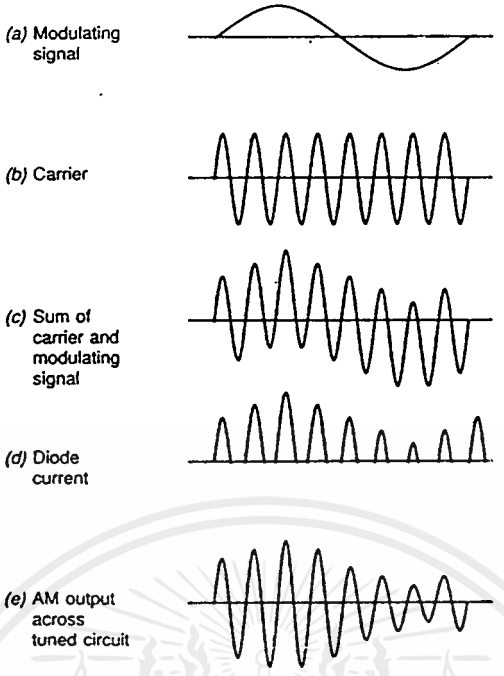
(LC circuit) สัญญาณคลื่นพาห์จะถูกป้อนเข้าขาตัวต้านทานซึ่งเป็นอินพุทอันหนึ่งและสัญญาณข้อมูลจะเข้าอีกอินพุทที่เหลือ สัญญาณที่รวมกันแล้วจะตกคร่อมตัวต้านทาน R_3 โดยรวมกันในวงจรของตัวต้านทานทำให้เกิดการรวมกันแบบเชิงเส้นซึ่งเป็นไปตามพีชคณิต ถ้าสัญญาณทั้งสัญญาณข้อมูลและคลื่นพาห์เป็นคลื่นรูปไซน์ (sine waves) รูปสัญญาณที่ตกคร่อมที่ R_3 จะเป็นไปตามรูปที่ 2.7c ซึ่งจะเห็นว่าสัญญาณคลื่นพาห์ขี่อยู่บนสัญญาณข้อมูล ซึ่งปรากฏการณ์นี้ไม่ใช่สัญญาณที่เป็น AM การมอดดูเลชันแบบนี้เป็นกระบวนการคูณ ไม่ใช่กระบวนการการบวกของสัญญาณ



รูปที่ 2.6 วงจรสร้างสัญญาณ AM โดยไดโอด

รูปสัญญาณที่ประกอบขึ้นจะถูกส่งเข้าไปในวงจรไดโอดเรคติไฟล์ซึ่งจะตอบสนองแบบเอ็กซ์โพเนลเชียล ไดโอดที่ต่ออยู่ในวงจรจะถูกไบอัสตรงด้วยสัญญาณครึ่งบวกจากสัญญาณอินพุทและในส่วนครึ่งลบจะถูกตัดออกและไม่ผ่านในตัวไดโอด กระแสที่ผ่านเข้าไปในตัวไดโอดนั้นจะเป็นกระแสด้านบวกซึ่งมีแอมปลิจูดเปลี่ยนแปลงไปตามแอมปลิจูดของสัญญาณข้อมูล ตามรูปที่ 2.7d เอาท์พุทที่ออกมานี้จะถูกป้อนไปยังวงจรแอลซี ที่ทำจากตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ทั้งตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมีความถี่ที่สอดคล้องกันที่ค่าความถี่ของคลื่นพาห์ โดยในแต่ละครั้งที่ไดโอดนำกระแสจะทำให้มีกระแสไหลผ่านในวงจรนี้ ทั้งตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานกันเป็นเหตุทำให้เกิดการออสซิลเลท (oscillate) ของสัญญาณหรือการแกว่งของสัญญาณขึ้น เพราะการเกิดการแกว่งของสัญญาณนี้เป็นเหตุทำให้วงจรแอลซีสร้างสัญญาณด้านลบโดยที่ค่าแอมปลิจูดของสัญญาณด้านบวกที่สูงก็จะทำให้เกิดแอมปลิจูดของสัญญาณด้านลบสูงไปด้วย หรือถ้าแอมปลิจูดของสัญญาณด้านบวกน้อยสัญญาณด้านลบที่เกิดขึ้นก็น้อยตามกันไปด้วย โดยที่รูปสัญญาณที่เกิดเป็นสัญญาณ AM แสดงดังรูปที่ 2.7e

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 รูปสัญญาณ AMที่เกิดจากไดโอดมอดดูเลเตอร์

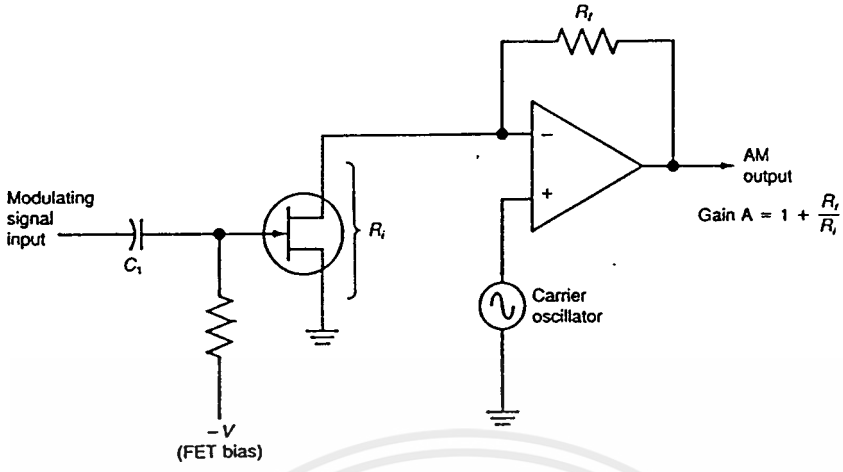
2.4.2 วงจรเฟ็ท (FET circuit to produce Amplitude Modulation)

นอกจากวงจรที่กล่าวมาแล้วยังมีวงจรที่สามารถใช้สร้างสัญญาณ AM ชนิดอื่นๆ อีก เช่น วงจรที่ใช้ FET ในการสร้างสัญญาณ AM ดังรูปที่ 2.8 ประกอบด้วยวงจรออปแอมป์ (operational amplifier) และตัว FET ซึ่งใช้ในการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน วงจรออปแอมป์ที่ต่อจะต่อสัญญาณคลื่นพาห์เข้าที่ขาบวก อัตราขยายของวงจรออปแอมป์นี้มีค่า ตามสมการ

$$\text{Gain} = 1 + R_f/R_i \qquad \text{.....(11)}$$

ค่าความต้านทานย้อนกลับ R_f เป็นค่าความต้านทานที่แน่นอน ซึ่ง R_i ค่าความต้านทานของตัว FET เอง ให้แรงดันไฟตรงค่าลบที่ขาเกทของ FET เพื่อทำให้เกิดเป็นไบอัสกลับ(revers bias) ระหว่างรอยต่อของเกทกับซอสซ์ (gate-source junction) และให้สัญญาณข้อมูลผ่านเข้าไปทางตัวเก็บประจุ C_i ให้แก่ขาเกท สัญญาณที่เอาท์พุทของออปแอมป์ออกมาจะเป็นสัญญาณ AM ซึ่งถ้าสัญญาณข้อมูลเป็นศูนย์ความต้านทานของ FET จะมีค่าคงที่ ดังนั้นจะมีแต่สัญญาณคลื่นพาห์ออกมาเท่านั้น ถ้าใส่คลื่นรูปไซน์ที่เป็นสัญญาณข้อมูลเข้าไป ความต้านทานของ FET จะเปลี่ยนแปลงโดยสัญญาณด้านบวกของสัญญาณข้อมูลจะมีผลให้ความต้านทานของ FET ลดลง และสัญญาณด้านลบของสัญญาณข้อมูลทำให้ความต้านทานของ FET เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของความต้านทานนี้เป็นผลให้อัตราการขยายของ FET ลดลง ทำให้มีสัญญาณ AM ออกมาทางเอาท์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

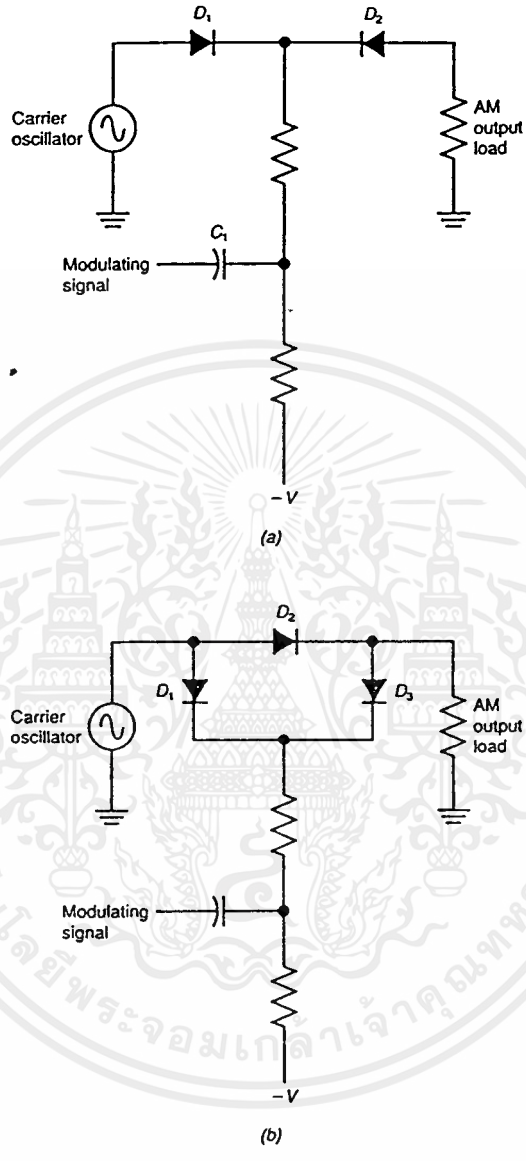


รูปที่ 2.8 วงจร FET ที่ใช้สร้างสัญญาณ AM

2.4.3 วงจร PIN ไดโอด (Amplitude Modulator using PIN diodes)

วงจรอีกแบบหนึ่งที่ใช้สร้างสัญญาณ AM โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานแสดงดังรูปที่ 2.9 วงจรเหล่านี้ใช้ PIN ไดโอดในการสร้างสัญญาณ AM โดย PIN ไดโอดทำจากรอยต่อของสารซิลิคอนออกแบบให้ใช้ในความถี่ประมาณ 100 MHz เมื่อต่อไบอัสตรงไดโอดเหล่านี้จะทำหน้าที่เหมือนตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ ค่าความต้านทานของไดโอดที่เปลี่ยนแปลงนี้จะเปลี่ยนแปลงเป็นไปอย่างเชิงเส้นกับจำนวนกระแสที่ไหลผ่านตัวมัน ถ้ากระแสมากค่าความต้านทานจะน้อยและเมื่อกระแสน้อยค่าความต้านทานจะมาก โดยใช้สัญญาณข้อมูลมาเปลี่ยนค่ากระแสของการไบอัสตรง ในรูปที่ 2.9a ใช้ PIN ไดโอด 2 ตัวต่อเข้าหากันดังรูปโดยถูกไบอัสตรงด้วยค่าแรงดันไฟลบที่คงที่ค่าหนึ่ง และให้สัญญาณข้อมูลเข้าไปโดยผ่านตัวเก็บประจุ C_1 ไฟสลับของสัญญาณข้อมูลจะขี่อยู่บนไฟตรงที่ไบอัส ดังนั้นจะเกิดการรวมกันขึ้น ซึ่งในกรณีนี้จะเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของ PIN ไดโอด โดยไดโอดเหล่านี้จะต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดคลื่นพาห์และโหลดของวงจร แรงดันไฟด้านบวกของสัญญาณข้อมูลจะลดค่าแรงดันไบอัสของ PIN ไดโอด ทำให้ความต้านทานของมันเพิ่มขึ้น ซึ่งผลนี้แอมปลิจูดของคลื่นพาห์จะถูกลดลงเมื่อตกคร่อมโหลด แรงดันไฟด้านลบของสัญญาณข้อมูลจะเป็นตัวเพิ่มแรงดันไบอัสเป็นผลทำให้ความต้านทานของตัวไดโอดนั้นลดลงทำให้แอมปลิจูดของคลื่นพาห์จะเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 วงจรมอดดูเลชันโดยใช้ PIN ไดโอด

การเปลี่ยนแปลงวงจรมอดดูเลชันของไดโอดแสดงในรูปที่ 2.9b ไดโอดจะถูกต่อเป็นวงจรพาย (pi-network) วงจรนี้จำเป็นต้องใช้เมื่อต้องการรักษาค่าของอิมพีแดนซ์ของวงจรให้คงที่ วงจรในรูป 2.9 ทั้งสองไดโอดจะมีการเปลี่ยนแปลงการลดทอนของสัญญานเมื่อสัญญาณข้อมูลเปลี่ยนแปลงซึ่งวงจรมอดดูเลชันที่กำลังพิจารณานี้จะต้องมีวงจรขยายสัญญาณเพื่อที่ทำการช่วยเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

แอมปลิจูดของสัญญาณ AM ด้วย วงจรมอดดูเลชันแบบ PIN ไดโอดนั้นใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นวิธีเดียวเท่านั้นที่ให้สัญญาณ AM อยู่ในช่วงความถี่ที่เป็นของไมโครเวฟ

2.5 การดีมอดดูเลทสัญญาณ AM (Amplitude Demodulator)

ดีมอดดูเลเตอร์ คือวงจรที่ทำหน้าที่รับเอาสัญญาณที่ผ่านการมอดดูเลทแล้วแปลงกลับให้เป็นสัญญาณข้อมูลดังเดิม ซึ่งรู้จักกันดีว่าเป็นดีเทคเตอร์ (detector) วงจรดีมอดดูเลเตอร์เป็นวงจรหลักในเครื่องรับสัญญาณวิทยุ

2.5.1 ไดโอดดีเทคเตอร์ (Diode detector)

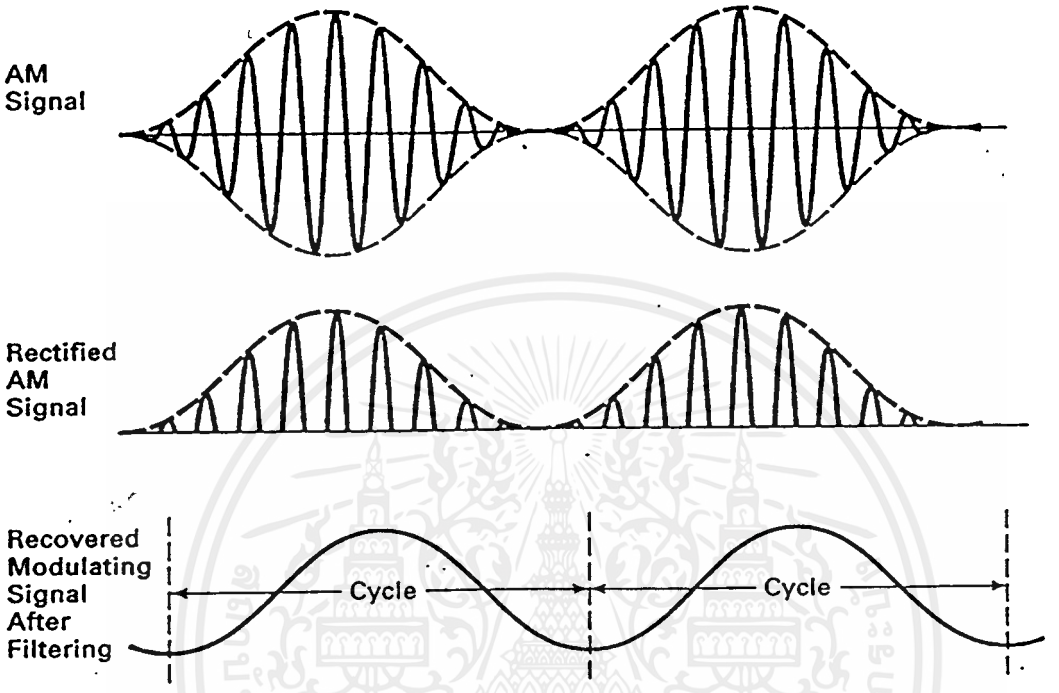
วงจรที่ใช้ในการดีมอดดูเลทสัญญาณ AM ซึ่งถือว่าง่ายที่สุดและใช้กันอย่างกว้างขวาง คือไดโอดดีเทคเตอร์ (diode detector) ดังแสดงในรูป 2.10 สัญญาณ AM จะถูกป้อนเข้าไปในวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นซึ่งประกอบด้วย D_1 และ R_1 ไดโอดจะเหนี่ยวนำกระแสก็ต่อเมื่อมีสัญญาณ AM ครึ่งคลื่นด้านบวกเกิดขึ้น ในระหว่างสัญญาณครึ่งคลื่นด้านลบไดโอดจะถูกไบอัสกลับและไม่มีกระแสไหลผ่านไดโอดนั้น ซึ่งเป็นผลทำให้แรงดันที่ตกคร่อม R_1 มีลักษณะเป็นชุดของพัลส์ด้านบวกที่มีแอมปลิจูดเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณข้อมูล

ในการที่จะทำให้ได้สัญญาณข้อมูลกลับคืนมาดังเดิมนั้น ทำได้โดยการต่อตัวเก็บประจุคร่อมตัวต้านทาน R_1 โดยค่าของตัวเก็บประจุที่นำมาต่อนั้นจะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำมากที่ความถี่คลื่นพาห์ ส่วนที่ความถี่ของสัญญาณข้อมูลจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงกว่ามาก ผลก็คือตัวเก็บประจุจะกรองเอาสัญญาณคลื่นพาห์ออก ดังนั้นจึงเหลือเพียงสัญญาณข้อมูลเดิม

สำหรับวิธีอื่นๆที่จะดูการทำงานของไดโอดดีเทคเตอร์คือ สมมติว่าตัวเก็บประจุชาร์จค่าพีคของพัลส์ผ่านเข้าไปในไดโอด เมื่อพัลส์ตกมาที่ศูนย์ ตัวเก็บประจุยังคงชาร์จอยู่แต่จะดิสชาร์จเมื่อผ่านเข้าไปในตัวต้านทาน R_1 ค่าไทม์คอนสแตนท์ (time constant) ของ C และ R_1 เมื่อเปรียบเทียบกับคาบของคลื่นพาห์ ผลก็คือตัวเก็บประจุจะดิสชาร์จในช่วงเวลาที่ไดโอดไม่เกิดการเหนี่ยวนำเท่านั้น เมื่อมีพัลส์ต่อไปเข้ามาตัวเก็บประจุจะทำการชาร์จค่าพีคของพัลส์อีกครั้งหนึ่ง เมื่อไดโอดคัทออฟตัวเก็บประจุจะดิสชาร์จอีกครั้งเข้าไปในตัวต้านทาน ผลก็คือรูปคลื่นที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะใกล้เคียงกันกับสัญญาณข้อมูลเดิม เนื่องจากตัวเก็บประจุจะชาร์จและดิสชาร์จทำให้สัญญาณที่ได้กลับคืนมานี้มีจำนวนของการริปเปิลเล็กน้อย ซึ่งเป็นเหตุทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณข้อมูล อย่างไรก็ตามเนื่องจากความถี่คลื่นพาห์ตามปกติจะมีค่าสูงกว่าความถี่สัญญาณข้อมูลมากซึ่งทำให้ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงค่าริปเปิลเหล่านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

31645

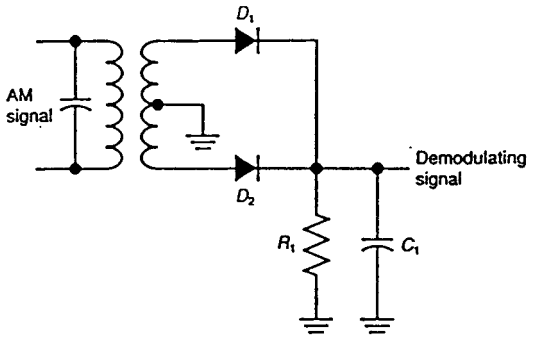


รูป 2.10 การดีมอดดูเลชันสัญญาณ AM

เอาท์พุทของดีเทคเตอร์คือสัญญาณข้อมูลเดิม เนื่องจากไดโอดดีเทคเตอร์จะนำเอาเอ็นเวลโลปของสัญญาณ AM ออกมาซึ่งก็คือสัญญาณข้อมูล ดังนั้นวงจรนี้อาจเรียกอีกอย่างว่า เอ็นเวลโลปดีเทคเตอร์ (envelope detector)

วงจรไดโอดดีเทคเตอร์สามารถทำให้ดีขึ้นได้โดยใช้วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นดังรูป 2.11 ในที่นี้จะใช้ไดโอด 2 ตัวและใช้หม้อแปลงที่มีด้านทุติยภูมิถูก center-tapped ไดโอด D_1 จะเหนี่ยวนำสัญญาณครึ่งคลื่นด้านบวก ในขณะที่ D_2 จะเหนี่ยวนำสัญญาณครึ่งคลื่นด้านลบ ไดโอดดีเทคเตอร์นี้จะสร้างค่าแรงดันเอาท์พุทเฉลี่ยที่มีค่าสูงกว่าและง่ายกว่าฟิลเตอร์มาก ค่าของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกำจัดสัญญาณคลื่นพาห์ออกจะมีขนาดเป็นครึ่งหนึ่งของค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นของไดโอดดีเทคเตอร์ ประโยชน์ที่ได้รับจากวงจรนี้คือความถี่ของสัญญาณข้อมูลจะสูงกว่าซึ่งจะทำให้ไม่เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณอันเนื่องมาจากค่าริปเปิลดังเช่นในวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.11 วงจรดีมอดดูเลชันโดยวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

2.6 หลักการมอดดูเลทแบบ FM (Freqeuncy Modulation)

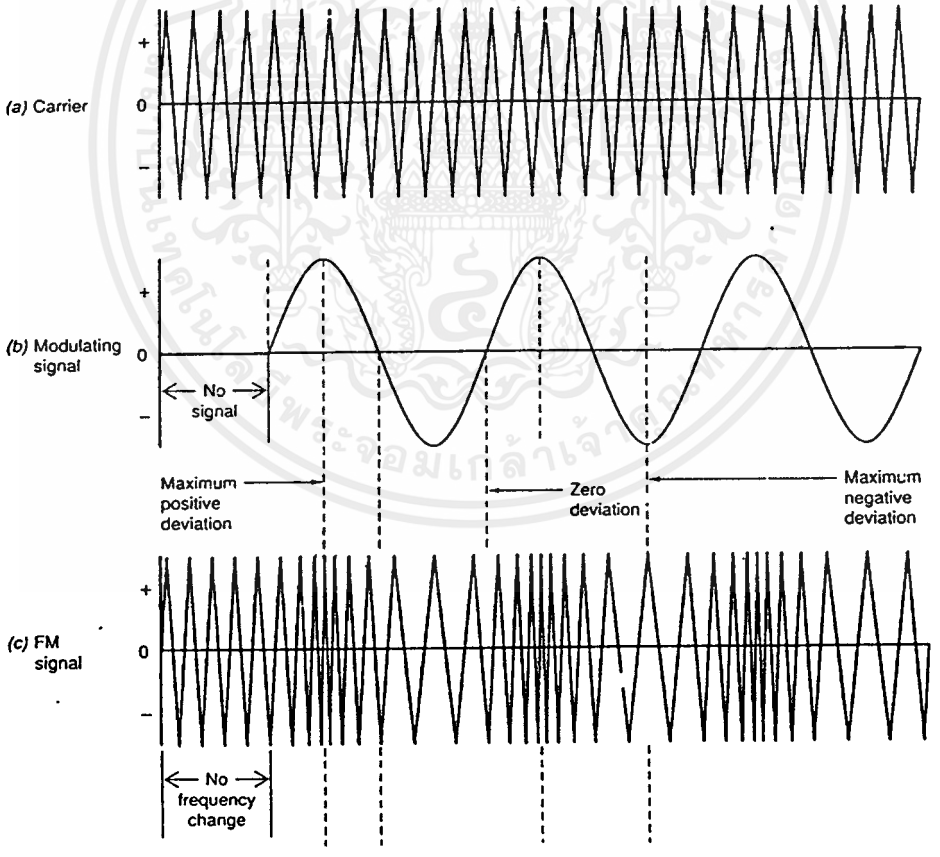
การมอดดูเลทสัญญาณแบบ FM แอมปลิจูดของคลื่นพาห์ (carrier) จะต้องคงที่ โดยที่ความถี่ของคลื่นพาห์จะเปลี่ยนแปลงโดยสัญญาณข้อมูล ซึ่งแอมปลิจูดของสัญญาณข้อมูลเปลี่ยนแปลง ความถี่ของคลื่นพาห์ก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วน โดยหากสัญญาณข้อมูลมีแอมปลิจูดเพิ่มขึ้น ความถี่ของคลื่นพาห์จะเพิ่มขึ้น ถ้าแอมปลิจูดของสัญญาณข้อมูลลดลงความถี่ของคลื่นพาห์จะลดลง โดยในทางกลับกันความสัมพันธ์นี้อาจดูได้จากทางปฏิบัติ หากสัญญาณข้อมูลลดลงจะทำให้ขนาดของคลื่นพาห์จะเพิ่มมากกว่าระยะเดิมของความถี่ที่เป็นตัวอ้างอิง และถ้าสัญญาณข้อมูลเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดของคลื่นพาห์ลดระยะจากเดิมลงมา สัญญาณข้อมูลมีแอมปลิจูดเปลี่ยนและความถี่ของคลื่นพาห์เปลี่ยนไปทั้งมากและน้อยกว่าความถี่ปกติ ก่อนการมอดดูเลชันจำนวนของความถี่ที่เปลี่ยนไปจะเปลี่ยนโดยสัญญาณข้อมูล โดยเรียกว่า การเบี่ยงเบนความถี่ (Frequency deviation) การเปลี่ยนแปลงความถี่จะมากที่สุดเมื่อขนาดแอมปลิจูดของสัญญาณข้อมูลมีมากที่สุด

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

สัญญาณ FM จะแสดงได้ตามรูปที่ 2.12c ความถี่ปกติของคลื่นพาห์คือรูป 2.12a เป็นรูปคลื่นแบบไซน์ แต่ตามรูปเป็นแบบสามเหลี่ยมเพื่อง่ายต่อการแสดงการแบ่งแยกสัญญาณ ถ้าหากไม่มีสัญญาณข้อมูลเข้าไปความถี่ของคลื่นพาห์จะคงที่ตลอดเวลา สัญญาณข้อมูลแสดงตามรูป 2.12b เป็นคลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่ต่ำกว่า ซึ่งถ้าคลื่นรูปไซน์มาทางด้านบวก ความถี่ของคลื่นพาห์จะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วน เมื่อมาถึงจุดที่สัญญาณข้อมูลมีแอมปลิจูดสูงสุดความถี่จะเป็นความถี่ที่สูงที่สุด และถ้าสัญญาณข้อมูลลดลงความถี่ของคลื่นพาห์จะลดลงตาม เมื่อมาถึงจุดที่สัญญาณข้อมูลเป็นศูนย์ความถี่ของคลื่นพาห์จะมีค่าเท่ากับความถี่ของคลื่นพาห์ก่อนทำการมอดดูเลชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสัญญาณลงมาทางด้านลบ ความถี่ของคลื่นพาห์จะลดลงและจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมาถึงจุดพีคของรอบทางด้านลบ สัญญาณข้อมูลจะเพิ่มมาถึงจุดศูนย์ ความถี่จะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ดูจากรูป 2.12c คลื่นพาห์จะมีการหดตัวและคลายตัวได้โดยสัญญาณข้อมูล ถ้ากำหนดคลื่นพาห์มีความถี่ 50 MHz ถ้าพีคแอมปลิจูดของสัญญาณข้อมูลทำให้มีความถี่สูงสุด 200 kHz คลื่นพาห์จะมีความถี่เปลี่ยนทางขึ้นเป็น 50.2 M Hz และลดลง 49.8 MHz ผลรวมของการเปลี่ยนแปลงความถี่ 0.4 MHz คือ 400 Hz ดังนั้นความถี่ที่เปลี่ยนแปลงจะเป็นจำนวนการเลื่อนไปของคลื่นพาห์มากกว่าและน้อยกว่าความถี่คงที่(constant frequency) ดังนั้นเรียกได้ว่ามีการเปลี่ยนแปลง $\pm$ 200 Hz ซึ่งหมายความว่าสัญญาณข้อมูลเปลี่ยนแปลงสัญญาณคลื่นพาห์ทั้งทางบวกและทางลบจากความถี่คงที่ โดย 200 kHz ความถี่ของสัญญาณข้อมูลหาได้จากอัตราการเบี่ยงเบนนี้ แต่ที่มีเหตุการณ์ของจำนวนการเปลี่ยนแปลงซึ่งต้องเข้มงวดกับแอมปลิจูดของสัญญาณข้อมูลด้วย



รูปที่ 2.12 การมอดดูเลชันแบบ Frequency Modulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 มอดดูเลชันอินเด็กซ์และเปอร์เซ็นต์การมอดดูเลทของสัญญาณ FM

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

$$m = \frac{f_d}{f_m} \quad \text{.....(12)}$$

โดยที่ f_d คือ ค่าเบี่ยงเบนความถี่ (frequency deviation)

f_m คือ ความถี่สัญญาณข้อมูล (modulating frequency)

โดยที่ถ้าค่าเบี่ยงเบนความถี่สูงสุดและค่าความถี่สัญญาณข้อมูลสูงสุดใช้ในการหาดัชนีการมอดดูเลชัน หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อัตราส่วนค่าเบี่ยงเบน (deviation ratio)

แบนด์วิธของสัญญาณ FM ขึ้นอยู่กับดัชนีการมอดดูเลท ถ้าดัชนีการมอดดูเลทสูงแบนด์วิธของสัญญาณ FM ก็จะมีค่ากว้าง แบนด์วิธทั้งหมดของสัญญาณสามารถคำนวณหาได้ถ้าเราทราบค่าดัชนีการมอดดูเลท และรวมถึงตารางด้านล่างโดยคำนวณได้จากสมการ

$$BW = 2Nf_{max} \quad \text{.....(13)}$$

เมื่อ N เป็นจำนวนไซด์แบนด์

ตารางแสดงค่าไซด์แบนด์และดัชนีการมอดดูเลทที่ใช้ในสมการ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซนต์การมอดดูเลทของสัญญาณ FM ขึ้นอยู่กับค่าเบี่ยงเบนความถี่ที่เพิ่มหรือลดตามขนาดของแอมปลิจูดของสัญญาณข้อมูล ซึ่งเป็นไปตามสมการ

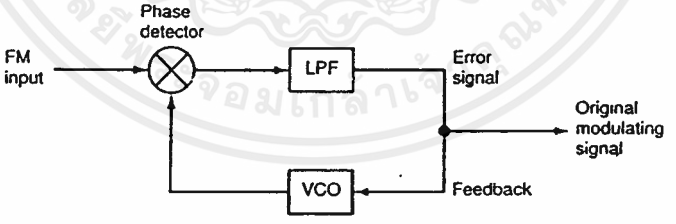
$$\text{เปอร์เซนต์การมอดดูเลท} = \frac{\text{ค่าเบี่ยงเบนความถี่คลื่นพาห์จริง}}{\text{ค่าเบี่ยงเบนความถี่คลื่นพาห์สูงสุด}} * 100$$

2.8 การดีมอดดูเลชันสัญญาณ FM (Freqeuncy demodulation)

วิธีที่ดีที่สุดสำหรับการดีมอดดูเลทสัญญาณ FM คือ phase-locked loop (PLL) คือ วงจรที่มีการควบคุมของความถี่หรือเฟส ซึ่งไม่ได้ใช้กับการดีมอดดูเลทสัญญาณความถี่เท่านั้น แต่มีการสร้างความถี่ขึ้นด้วย และมีการกรองสัญญาณและการตรวจจับสัญญาณเข้ามาร่วมในการทำงานของการดีมอดดูเลทสัญญาณด้วย

2.8.1 Phaes-locked loop(PLL)

PLL ทั้งหมดจะประกอบด้วยอุปกรณ์พื้นฐานดังแสดงในรูป 2.13 คือมี phase detector หรือ mixer ใช้ในการเปรียบเทียบสัญญาณอินพุท หรือสัญญาณที่อ้างถึงจากเอาท์พุทที่ออกมาจาก voltage-controlled oscillator (VCO) โดย VCO จะมีความถี่ที่แปรผันกับค่าของแรงดันไฟตรงจากวงจรกรองความถี่ต่ำ โดยที่จะอาศัยเอาท์พุทของ phase detector มาทำให้เกิดแรงดันไฟตรงจากวงจรกรองความถี่ต่ำโดยแต่ละส่วนทำงานดังนี้



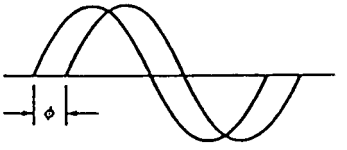
รูปที่ 2.13 พื้นฐานของ PLL

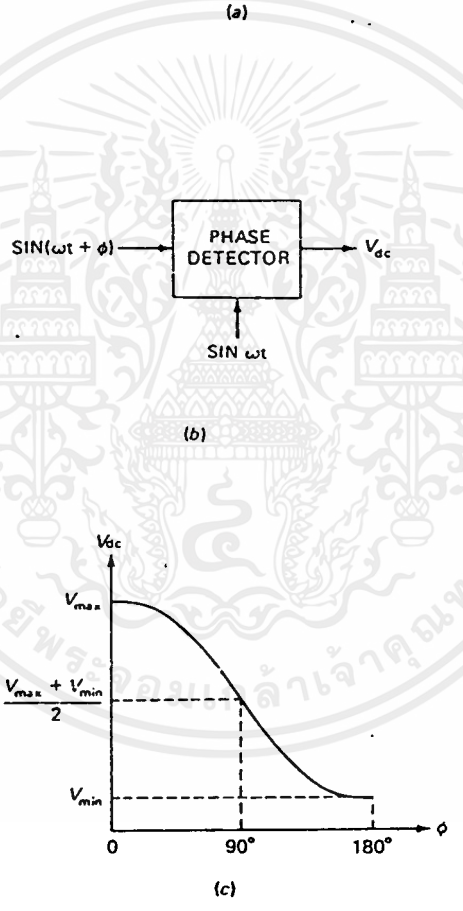
1). เฟสดีเทคเตอร์ (Phase Detector)

สมมติว่าเรามีมิกเซอร์(mixer) ที่มีความถี่ขาเข้าที่ 50 และ 50 kHz ดังนั้นความแตกต่างของความถี่เท่ากับศูนย์ ซึ่งเราแสดงโดยแรงดันไฟตรง (dc voltage) โดยค่าแรงดันไฟตรงจะออกมาต่อเมื่อความถี่ขาเข้ามีการเปรียบเทียบ เฟสดีเทคเตอร์เป็นอุปกรณ์สำหรับเปรียบเทียบความถี่ที่เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กัน เนื่องจากจำนวนของแรงดันไฟตรงขึ้นอยู่กับสถานะของมุม ϕ ระหว่างสัญญาณอินพุททั้งสอง โดยเฟสที่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นแรงดันไฟตรงก็มีการเปลี่ยนแปลงด้วย





รูปที่ 2.14 อินพุทและเอาท์พุทของเฟสดีเทคเตอร์

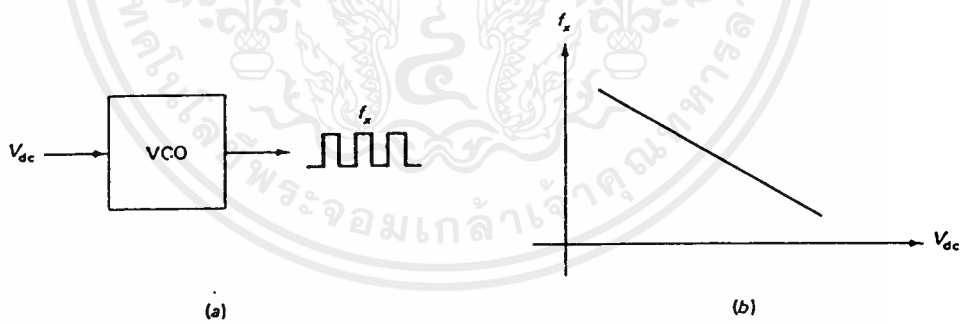
ในรูป 2.14a แสดงถึงสถานะของมุมระหว่างคลื่นไซน์ (sinusoidal signals) ทั้งสอง เมื่อสัญญาณนี้ผ่านเข้าไปในเฟสดีเทคเตอร์ ตามรูปที่ 2.14b จะได้แรงดันไฟตรงออกมาที่เอาท์พุทเป็นรูปแบบหนึ่งของเฟสดีเทคเตอร์ซึ่งมีแรงดันไฟตรงเป็นแรงดันเอาท์พุทซึ่งเปลี่ยนแปลงตามรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14c ถ้าความต่างมุม (phase angle) มีค่าเท่ากับศูนย์ แรงดันไฟตรงจะมากที่สุด และถ้าความแตกต่าง phase angle มีค่ามากขึ้นจาก 0-180 องศา ค่าของแรงดันไฟตรงจะลดลงจนถึงค่าต่ำที่สุด เมื่อค่าของ phase angle (ϕ) เป็น 90 องศา ค่าของแรงดันเอาท์พุทจะเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างค่าที่น้อยที่สุดและค่าที่มากที่สุด ถ้าสมมติว่าเฟสดีเทคเตอร์มีเอาท์พุทสูง 10 โวลต์ และค่าแรงดันไฟตรงเอาท์พุทน้อยสุดเท่ากับ 5 โวลต์ เมื่อมีสองสัญญาณที่มีเฟสตรงกัน แรงดันเอาท์พุทของเฟสดีเทคเตอร์จะมีค่าเท่ากับ 10 โวลต์ ถ้าสองสัญญาณมีเฟสต่างกัน 90 องศา แรงดันไฟตรงจะมีค่าเท่ากับ 7.5 โวลต์ เมื่อสองสัญญาณอินพุทมีความต่างเฟส 180 องศา แรงดันไฟตรงเอาท์พุทมีค่าเท่ากับ 5 โวลต์ คำตอบของข้อมูลนี้คือแรงดันเอาท์พุทจะลดลงเมื่อความต่างเฟสเพิ่มขึ้น

2). VCO (voltage-controlled-oscillator)

ความสำคัญเกี่ยวกับ VCO ที่น่าจะจำไว้คือ ค่าแรงดันไฟตรงอินพุทจะควบคุมให้เกิดความถี่เอาท์พุทออกมา ในการทดลองนี้ ถ้าเพิ่มแรงดันไฟตรงที่ควบคุมจะเป็นผลทำให้ความถี่เอาท์พุทของ VCO ลดลง ถ้าแรงดันไฟตรงในรูป 2.15a เพิ่มขึ้น ความถี่ของเอาท์พุทลดลง โดยที่แรงดันไฟตรงที่ควบคุมการกำเนิดความถี่ ตามปกติความถี่จะลดลงเป็นเชิงเส้นกับแรงดันไฟตรงที่เพิ่มขึ้น ดังรูป



รูปที่ 2.15 ลักษณะของ VCO

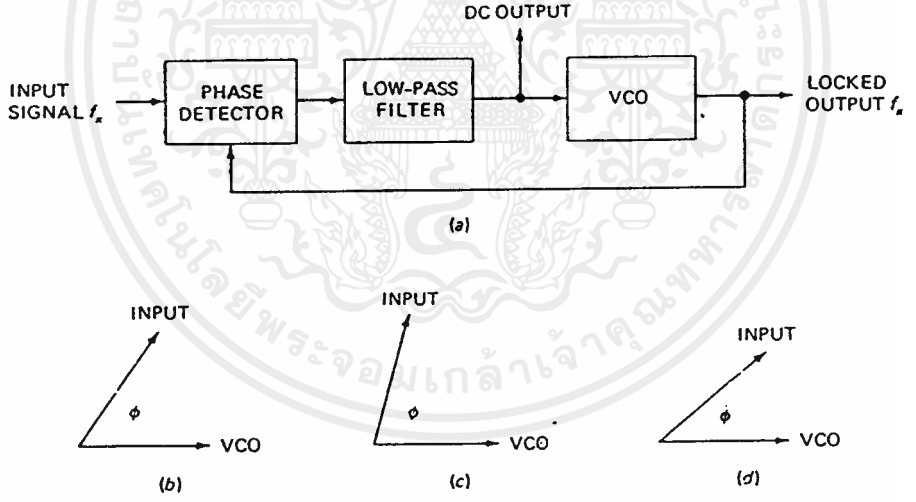
3). การทำงานของ phase-locked loop (PLL)

ตามรูปที่ 2.16 เป็นบล็อกไดอะแกรมของเฟสล็อคลูป phase-locked loop (PLL) สัญญาณอินพุทซึ่งมีความถี่ f_x เป็นหนึ่งของอินพุทที่เข้าเฟสดีเทคเตอร์ (phase detector) ขาอินพุทอีกอันหนึ่งมาจาก VCO เอาท์พุทของเฟสดีเทคเตอร์จะถูกกรองโดยวงจรกรองความถี่ต่ำ (low pass filter) แล้วทำการเปรียบเทียบความถี่ทั้งสอง ความถี่ที่แตกต่างกันเท่านั้นจึงจะเกิดเป็นแรงดันไฟตรงผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำออกมา แรงดันไฟตรงนี้จะถูกนำไปควบคุมความถี่ของ VCO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบป้อนกลับ (feedback system) จะทำการนำความถี่ไปเป็นอินพุทอีกครั้งหนึ่ง เมื่อระบบทำงานถูกต้อง ความถี่ของ VCO จะเท่ากับ f_x เหมือนกับสัญญาณทางอินพุท ดังนั้นเฟสดีทคเตอร์จะมีสัญญาณอินพุทเป็น 2 อินพุท ซึ่งมีความถี่เท่ากัน ความต่างเฟสระหว่างสองอินพุทนั้นจะทำให้มีจำนวนแรงดันไฟตรงเอาท์พุท(dc output) ตามรูปที่ 2.16b ซึ่งแสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมสำหรับสัญญาณขาเข้าและจาก VCO

ถ้าความถี่อินพุทเปลี่ยนแปลงแล้วที่ VCO ความถี่จะเปลี่ยนแปลงตามด้วย เช่นถ้าความถี่อินพุท f_x เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เฟสเซอร์จะหมุนและเกิดความต่างเฟสมากขึ้น ดังแสดงในรูป 2.16c ซึ่งหมายความว่าจะมีแรงดันไฟตรงเอาท์พุทจากเฟสดีเทคเตอร์น้อยลง ค่าแรงดันไฟตรงที่น้อยลงนี้จะมีผลต่อ VCO ทำให้ความถี่เพิ่มมากขึ้นจนเท่ากับ f_x หรืออีกทางหนึ่ง ถ้าความถี่อินพุทลดลงเฟสเซอร์ (phasor) จะหมุนต่ำลงและความแตกต่างของเฟสจะลดลงด้วย แสดงดังรูป 12.6d ซึ่งตอนนี้ค่าแรงดันไฟตรงจะมากขึ้น เป็นผลทำให้ความถี่จาก VCO ลดลงจนกระทั่งเท่ากับความถี่อินพุท f_x โดยจะทำงานอย่างอัตโนมัติขึ้นอยู่กับความถี่ของ VCO กับความแตกต่างของเฟสเซอร์นั้น



รูปที่ 2.16 เฟสล็อคลูปและการเพิ่มและลดของเฟสเซอร์ของสัญญาณอินพุต

ช่วงการล็อค(lock range) เป็นช่วงของความถี่ VCO สามารถสร้างขึ้นให้เท่ากับความถี่ที่เข้ามาเปรียบเทียบ โดยกำหนดว่า

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

4). Free-running Mode

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

เนื่องจากเฟสล็อคลูป (PLL) นี้สามารถเปลี่ยนแปลงตามความถี่ที่เข้ามาเป็นอินพุท ดังนั้นจึงนำมาใช้กับการดีมอดดูเลทของสัญญาณเอฟเอ็ม (FM signal) ถ้าใส่สัญญาณเอฟเอ็มเป็นอินพุท ความถี่ที่ออกมาจากเอาท์พุทของ VCO นี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณเอฟเอ็มที่เข้ามาทางอินพุทหรือเป็นสัญญาณเอฟเอ็มเหมือนกับอินพุทของดีเทคเตอร์ โดยส่วนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่นี้สัญญาณอินพุทที่เข้ามาใน VCO จะต้องเป็นความถี่ที่เป็นสัญญาณข้อมูลก่อนทำการมอดดูเลท ดังนั้นจึงนำเอาเฟสล็อคลูป (PLL) มาเป็นตัวดีมอดดูเลท (Demodulate) สัญญาณเอฟเอ็ม

การดีมอดดูเลทสัญญาณ FM มีอีกหลายวิธีนอกจากวิธีเฟสล็อคลูปซึ่งมีทั้งแบบวงจรแยกพัลส์เฉลี่ย (pulse-averaging discrimation) วงจรควอดเดรเจอร์ดีเทคชัน(Quadrature detcetion) วงจรการแยกของฟรอสเตอร์ซีลีย์ (Fostert-Seeley discrimatin)และเรดิโอดีเทคเตอร์ (radio-detector)

2.8.2 วงจรแยกพัลส์เฉลี่ย (pulse-averaging discrimation)

โดยบล็อกไดอะแกรมของวงจรแยกพัลส์เฉลี่ย (pulse-averaging discrimation) แสดงดังรูป 2.17 สัญญาณ FM จะถูกป้อนเข้าไปใน zero-crossing detector หรือวงจรคลิปเปอร์/ลิมิตเตอร์ ซึ่งจะสร้างระดับแรงดันไบนารี ในแต่ละครั้งที่ระดับแรงดันเปลี่ยน สัญญาณ FM จะเปลี่ยน

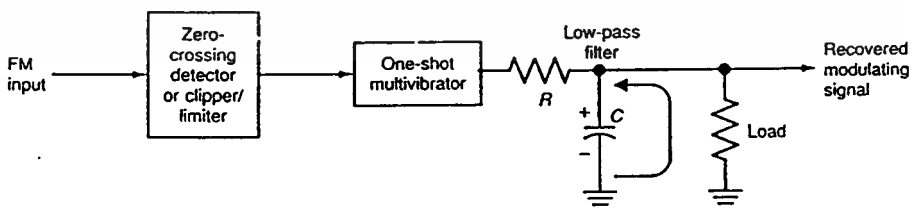
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากลบไปบวกหรือจากบวกไปลบ ผลก็คือได้คลื่นรูปสามเหลี่ยมที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณอินพุทเดิมแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของแอมปลิจูด

สัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมของ FM จะถูกป้อนเข้าไปยัง one-shot multivibrator ซึ่งจะสร้างแอมปลิจูดของสัญญาณให้คงที่ ความกว้างของพัลส์ dc จะกำหนดด้วยขอบเริ่มต้นของแต่ละรอบสัญญาณ FM ต่อจากนั้นพัลส์เอาท์พุทจะถูกเลี้ยงไปยังวงจรกรองความถี่ต่ำRC ซึ่งจะเฉลี่ยพัลส์ dc จนกระทั่งได้สัญญาณข้อมูลเดิมกลับคืน

สัญญาณคลื่นของวงจรแยกแยะพัลส์เฉลี่ยแสดงดังรูป 2.18 โดยที่ความถี่ต่ำช่วงของพัลส์จะกว้างและเมื่อความถี่สูงขึ้นช่วงของพัลส์จะแคบลง เมื่อพัลส์เหล่านี้ผ่านเข้าไปในฟิลเตอร์ จะทำให้ได้แรงดันเอาท์พุทdc ที่ดีขึ้น แอมปลิจูดของแรงดัน dc นี้จะเป็นสัดส่วนกับค่าเบี่ยงเบนความถี่ ขณะที่มีพัลส์เกิดขึ้นพัลส์หนึ่ง ตัวเก็บประจุในฟิลเตอร์จะชาร์จแอมปลิจูดของพัลส์นั้น เมื่อไม่มีพัลส์ตัวเก็บประจุจะดิสชาร์จเข้าไปในโหลด ถ้า RC time constant มีค่าสูง ประจุบนตัวเก็บประจุจะไม่ลดลงมาก อย่างไรก็ตามถ้าเวลาระหว่างพัลส์มีมากตัวเก็บประจุจะสูญเสียประจุบางส่วนเข้าไปยังโหลด ดังนั้นแรงดันเอาท์พุท dc เฉลี่ยจะมีค่าต่ำ เมื่อมีพัลส์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วตัวเก็บประจุจะมีเวลาน้อยในอันที่จะดิสชาร์จระหว่างพัลส์

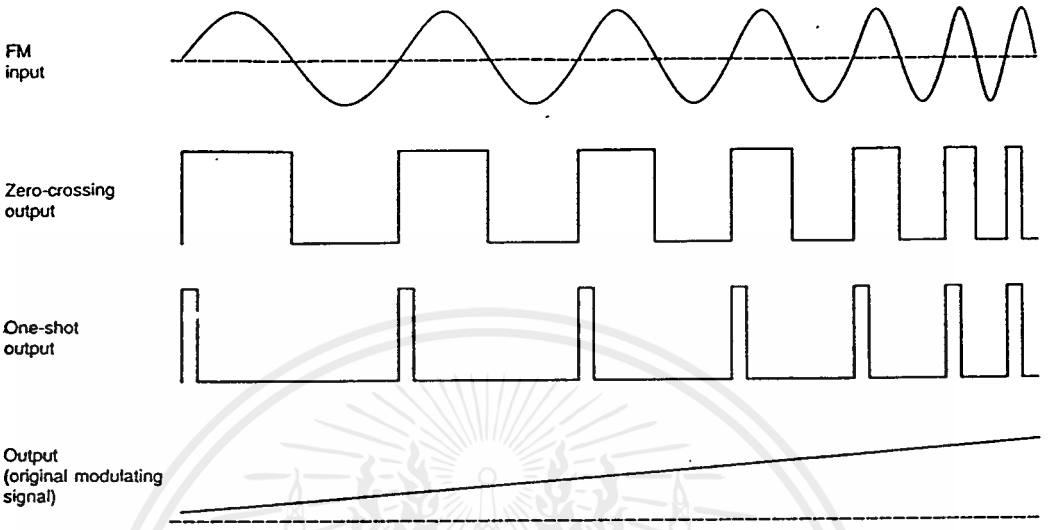
ดังนั้นแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อมจะมีค่าสูงกว่า แรงดันเอาท์พุทของฟิลเตอร์จะเปลี่ยนแปลงแอมปลิจูดตามค่าเบี่ยงเบนความถี่ ซึ่งสังเกตได้จากรูป 2.18 แรงดันที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบเชิงเส้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น สัญญาณข้อมูลเดิมจะข้ามผ่านที่เอาท์พุทของฟิลเตอร์ ส่วนประกอบของฟิลเตอร์จะถูกเลือกให้มีค่าริปเปิลน้อยซึ่งมีสาเหตุมาจากการชาร์จและดิสชาร์จของตัวเก็บประจุ ในขณะเดียวกันก็จะให้การตอบสนองความถี่สูงแก่สัญญาณข้อมูลเดิม



รูปที่ 2.17 วงจรดีมอดดูเลทสัญญาณ FM แบบการแยกพัลส์เฉลี่ย

(pulse-averaging discrimation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 รูปคลื่นจากวงจร pulse-averaging discrimation

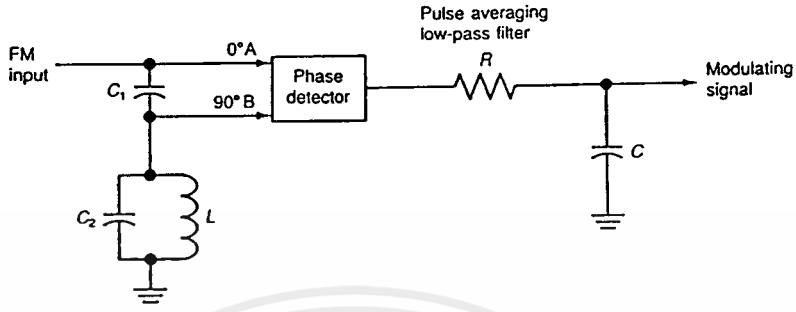
2.8.3 ควอดเดรเจอร์ดีเทคเทอร์ (Quadrature detector)

การดีมอดดูเลทสัญญาณ FM ซึ่งเป็นที่นิยมอีกวงจรหนึ่ง คือ ควอดเดรเจอร์ดีเทคเตอร์ (Quadrature detector) โดยเทอม Quadrature จะหมายถึงความต่างเฟสระหว่างสัญญาณทั้งสองเป็น 90̊ ควอดเดรเจอร์ดีเทคเตอร์จะใช้วงจรเฟสชิพ (phase-shift circuit)เพื่อที่จะทำการเปลี่ยนเฟสไป 90̊ ที่ความถี่คลื่นพาห์ที่ไม่ได้มอดดูเลท วงจรเฟสชิพที่ใช้กันมากที่สุดแสดงดังรูป 2.19 สัญญาณ FM จะถูกป้อนเข้าไปในตัวเก็บประจุ C_1 ที่มีค่าน้อยมากไปยังวงจรจูนซึ่งถูกปรับตรงกับค่าเรโซแนนท์ที่ความถี่คลื่นพาห์กลาง วงจรจูนที่ปรากฏจะมีค่าความต้านทานสูงมากที่ความถี่เรโซแนนท์ ตัวเก็บประจุขนาดเล็กจะมีค่ารีแอคแตนท์สูงมากเมื่อเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ของวงจูน ดังนั้นเอาท์พุทที่ตกคร่อมวงจรจูนที่ความถี่คลื่นพาจะเข้าใกล้ 90̊ ซึ่งนำหน้าสัญญาณอินพุท เมื่อมีสัญญาณ FM เกิดขึ้น ความถี่คลื่นพาห์จะเบี่ยงเบนสูงและต่ำกว่าความถี่เรโซแนนท์ของวงจรแอลซีหรือวงจรจูนเนอร์ ผลคือจะทำให้ขนาดของเฟสชิพระหว่างสัญญาณอินพุทและสัญญาณเอาท์พุทมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง

จากนั้นสัญญาณควอดเดรเจอร์สองสัญญาณจะถูกส่งเข้าไปในวงจรเฟสดีเทคเตอร์ ซึ่งเป็นวงจรที่มีสัญญาณเอาท์พุทเป็นฟังก์ชันกับขนาดของเฟสชิพระหว่างสัญญาณอินพุทสองสัญญาณ วงจรเฟสดีเทคเตอร์ที่ใช้กันมากที่สุดคือบาลานซ์มอดูเลเตอร์ (Balanced modulator) ซึ่งใช้ดิฟเฟอเรนเชียลแอมปลิฟายเออร์ สัญญาณเอาท์พุทของวงจรเฟสดีเทคเตอร์จะเป็นชุดของพัลส์ที่มีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว้างเปลี่ยนแปลงตามขนาดของเฟสชิพระหว่างสัญญาณทั้งสอง สัญญาณเหล่านี้จะถูกเฉลี่ยให้เท่ากันในวงจรกรองความถี่ต่ำ RC เพื่อที่จะสร้างสัญญาณข้อมูลเดิมขึ้นใหม่

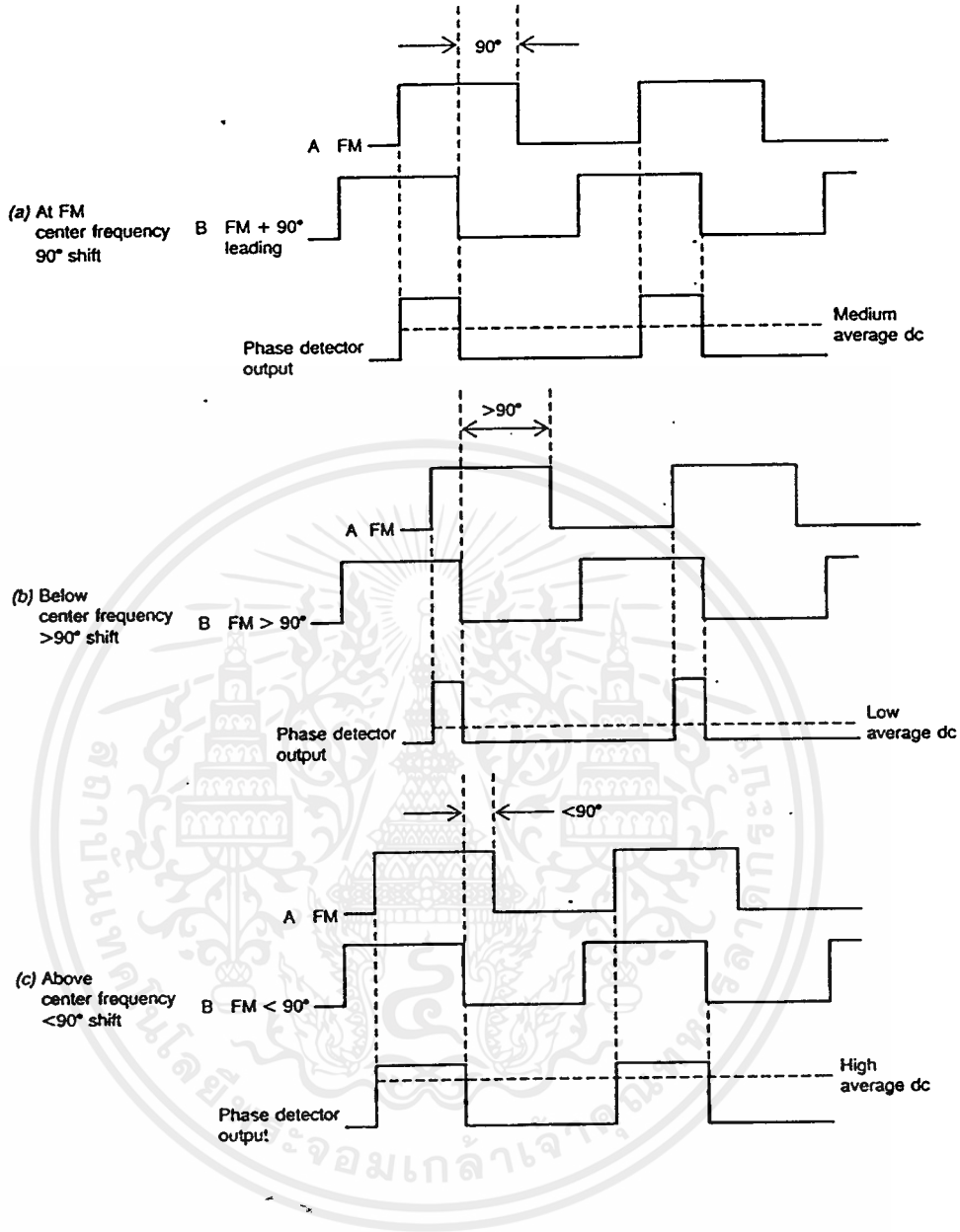


รูปที่ 2.19 วงจรดีมอดดูเลทแบบควอดเดรเจอร์ดีเทคเตอร์ (quadrature detector)

โดยปกติสัญญาณ FM ซึ่งเป็นสัญญาณอินพุทรูปไซน์ที่ผ่านเข้าไปในวงจรเฟสดีเทคเตอร์จะอยู่ที่ระดับสูงมาก ดังนั้นสัญญาณนี้จะขับดิฟเฟอเรนเชียลแอมปลิฟายเออร์ในวงจรเฟสดีเทคเตอร์จนกระทั่งคัทออฟและอิ่มตัว ดิฟเฟอเรนเชียลทรานซิสเตอร์จะประพฤติตัวเหมือนเป็นสวิทช์ ดังนั้นเอาท์พุทจะเป็นชุดของพัลส์ ถ้าสัญญาณอินพุทโตพอก็ไม่จำเป็นต้องใช้วงจรลิมิตเตอร์ ช่วงพัลส์เอาท์พุทถูกกำหนดด้วยขนาดของเฟสชิพ

รูป 2.20 เป็นการแสดงรูปคลื่นในควอดเดรเจอร์ดีเทคเตอร์ เมื่อไม่มีการมอดดูเลทสัญญาณ สัญญาณอินพุททั้งสองจะมีเฟสตรงข้ามกันเป็น 90 ดังนั้นจะให้ความกว้างของพัลส์เอาท์พุทเป็นเครื่องแสดง เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นขนาดของเฟสชิพจะลดลงซึ่งเป็นเหตุทำให้ความกว้างของพัลส์เอาท์พุทมีค่ามากขึ้น พัลส์ที่ขยายกว้างออกไปจะถูกเฉลี่ยด้วย RC ฟิลเตอร์ ทำให้แรงดันเอาท์พุทเฉลี่ยสูงกว่า เช่นเดียวกันกับสัญญาณที่มีแอมปลิจูดสูงกว่าก็ต้องการที่จะสร้างความถี่คลื่นพาห์ที่สูงกว่าด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 รูปสัญญาณจากวงจรควอดเดรเจอร์ดีเทคเตอร์(Quadrature detector)

เมื่อความถี่ของสัญญาณ FM ลดลง เฟสชิพจะยิ่งมีมากซึ่งเป็นผลทำให้พัลส์เอาท์พุทแคบลง เมื่อพัลส์แคบลงจะทำให้แรงดันเอาท์พุทเฉลี่ยต่ำลงดังนั้นสัญญาณข้อมูลเดิมจะน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง

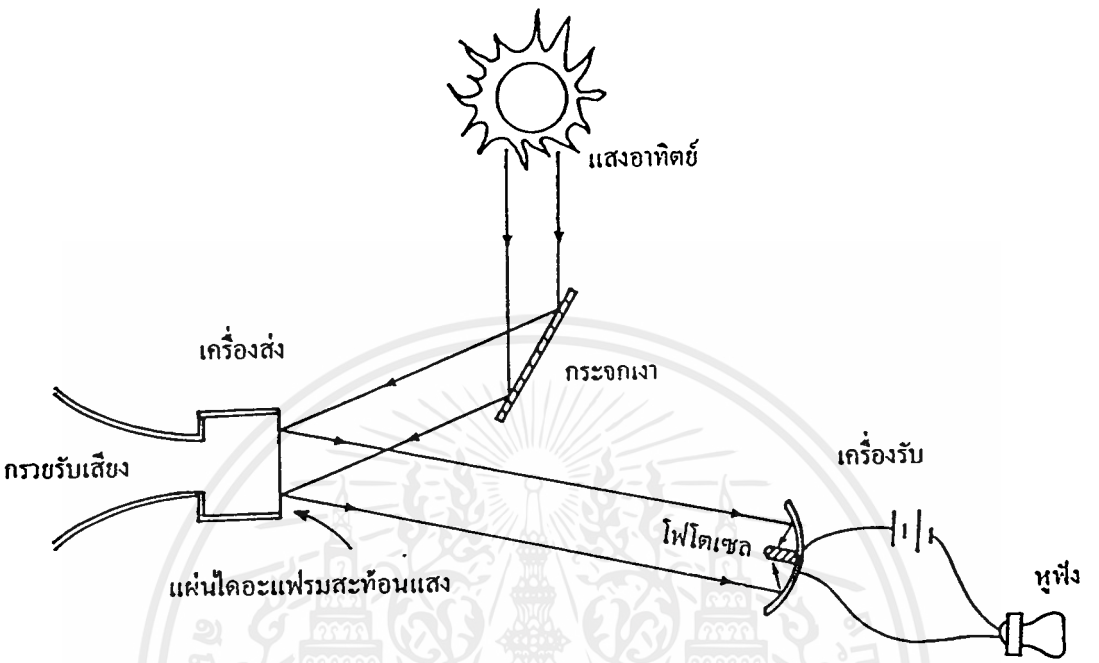
การสื่อสารยุคใหม่ที่กำลังมีวิวัฒนาการก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วมากในปัจจุบันคงได้แก่ การสื่อสารด้วยแสง ทั้งนี้เพราะระบบการสื่อสารด้วยแสงที่เราสามารถควมคุมสถานภาพแวดล้อมได้นั้นจะมีข้อได้เปรียบเหนือการสื่อสารที่ใช้สัญญาณไฟฟ้าอยู่หลายประการจึงทำให้เกิดการค้นคว้าและพัฒนาเกี่ยวกับระบบการสื่อสารนี้อย่างต่อเนื่องและจริงจัง สถานภาพแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของการสื่อสารด้วยแสงมากที่สุดนั้นก็คือ สถานภาพของตัวกลางที่ใช้สำหรับให้แสงเดินทางจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ สิ่งที่นิยมใช้เป็นตัวกลางสำหรับการสื่อสารระบบนี้ ได้แก่ เส้นใยนำแสงเพราะฉะนั้นเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงเส้นใยนำแสงเป็นหลัก

3.1 วิวัฒนาการของการสื่อสารด้วยแสง

แม้ว่าจะมีการบันทึกจากชนชาติกรีกโบราณ ที่กล่าวถึงเรื่องราวเกี่ยวกับแสงที่สามารถเดินทางไปตามสายน้ำที่ไหลอยู่ในท่อระบายน้ำซึ่งคดเคี้ยวก็ตาม แต่ก็ดูเหมือนว่า มิได้มีใครที่จะใส่ใจในเรื่องนี้อย่างจริงจังเลย จนกระทั่งในปี 1870 จอห์น ทิดัล(John Tydal) ได้ทำการทดลองให้เห็นว่าแสงนั้นสามารถเดินทางตามสายน้ำที่ถูกเทออกจากภาชนะที่มีแสงสว่างส่องอยู่ภายในได้และกล่าวกันว่าบันทึกเรื่องราวต่างๆ เหล่านี้คือ ต้นเหตุที่มาของการคิดค้นเกี่ยวกับเส้นใยนำแสงในปัจจุบันเมื่อไม่นับกระจกที่ใช้ในการสะท้อนแสงอาทิตย์หรือการสื่อสารแบบโบราณแล้ว สิ่งประดิษฐ์ชิ้นแรกที่เกี่ยวเนื่องกับระบบการสื่อสารด้วยแสงก็จะเป็นโฟโตโฟน (Photo phone) ของอเล็กซานเดอร์ เกรแฮม เบล (Alexander Graham Bel) ซึ่งได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นในปี 1880 ส่วนประกอบนั้นมีแสดงในรูปที่ 3.1 การทำงานของโฟโตโฟนนั้นอธิบายได้ง่ายดังนี้ คือ เมื่อมีเสียงพูดเข้าไปในกรวยรับเสียง เสียงจะทำให้แผ่นไดอะแฟรม (diaphram) ซึ่งสะท้อนแสงที่ติดอยู่กับกรวยรับรับเสียงนั้นสั่นเป็นเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแสงที่สะท้อนออกมาจากแผ่นไดอะแฟรมนั้น ดังนั้นแสงที่ถูกสะท้อนนี้จะพุ่งไปยังเครื่องรับซึ่งมีโฟโตเซล (photo cell) เป็นตัวรับแสงและเป็นตัวควมคุมการไหลของไฟฟ้าในวงจรที่มีดังแสดงไว้ในรูป เพราะฉนั้นโฟโตโฟนจึงสามารถที่จะส่งข่าวสารที่เป็นเสียงได้โดยใช้แสงเป็นตัวพาห์จากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากสถานภาพของสิ่งแวดล้อมต่างๆ มีอิทธิพล ต่อการส่งสัญญาณในระบบนี้มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงทำให้ระยะการใช้งานของโฟโตโฟนนั้นสั้นมากคือเพียงประมาณ 200 เมตร เท่านั้น เลยทำให้ไม่มีบทบาทเท่าใดนัก



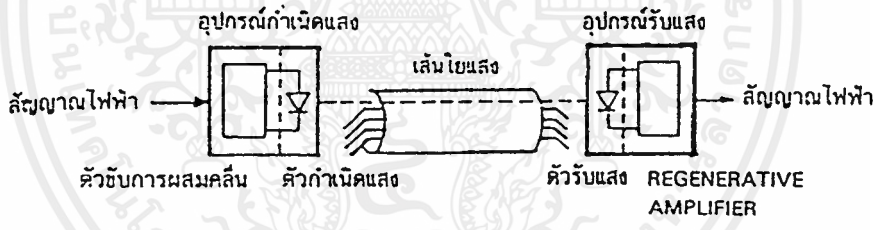
รูปที่ 3.1 แสดงการทำงานของโฟโตโฟน

แม้ว่าในปี 1960 Dr. Theodore Maiman จะสามารถคิดค้นวิธีผลิตแสงเลเซอร์ออกมาได้เป็นผลสำเร็จก็ตาม แต่แสงเลเซอร์ที่ผลิตออกมาด้วยวิธีการนี้ก็ยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการสื่อสาร จนกระทั่งปี 1970 จึงได้มีการผลิตเลเซอร์ไดโอดซึ่งสามารถใช้เป็นตัวผลิตสัญญาณเพื่อการสื่อสารขึ้นได้สำเร็จ และได้ใช้ทำการสื่อสารร่วมกับสายใยนำแสงขึ้นได้เป็นครั้งแรก อย่างไรก็ดีคุณสมบัติของเลเซอร์ไดโอดและสายใยนำแสงในสมัยนั้น เมื่อคิดเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียในการสื่อสารในระบบไฟฟ้าที่มีอยู่ก็ยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานจริง อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่ได้ในครั้งนั้นได้เกิดแรงดลใจอันยิ่งใหญ่ที่ให้มีการพัฒนาระบบการสื่อสารด้วยแสงขึ้นมาอย่างจริงจัง ประเด็นสำคัญในการพัฒนาก็คือ ความต้องการที่จะลดค่าความลดทอนในเส้นใยนำแสงให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะน้อยได้จนบัดนี้นับว่าการพัฒนาได้ประสบความสำเร็จเป็นอย่างมาก โดยพิจารณาจากปี 1970 ค่าความลดทอนของสัญญาณในเส้นใยนำแสงมีค่ามากถึง 20 dB / กิโลเมตร แต่ในปัจจุบันการลดทอนของสายใยนำแสงนั้นได้รับการปรับปรุงให้มีค่าลดลงเหลือเพียงประมาณ 0.2 dB/ กิโลเมตร เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของการสื่อสารด้วยแสง

ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง แสดงดังรูป 3.2 โดยทั่วไปแล้วสัญญาณไฟฟ้าที่ส่งจากอุปกรณ์ปลาย (Terminal equipment) ต่างๆ เช่น โทรศัพท์ เครื่องป้อนข้อมูล (data terminal) โทรสาร (Facsimile) เป็นต้น จะถูกอุปกรณ์เปลี่ยนไฟฟ้าเป็นแสง (E/O convertor) เปลี่ยนให้เป็นสัญญาณแสง (นั่นคือความแรงของสัญญาณไฟฟ้าจะเปลี่ยนเป็นความเข้มของแสงหรือ "1" "0" ของสัญญาณไฟฟ้าจะเปลี่ยนเป็นแสงที่สว่าง และ มืด) และส่งเข้าไปในเส้นใยนำแสง สัญญาณที่เดินทางในเส้นใยนำแสงนั้นกำลังของมันจะอ่อนลง เมื่อเดินทางในระยะทางที่เพิ่มขึ้นพร้อมทั้งรูปคลื่นก็ขยายกว้าง (Spreading) ออกไปด้วย เมื่อไปถึงอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแสงให้เป็นไฟฟ้า (O/E converter) ของทางด้านรับสัญญาณ แสงที่ส่งมาจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าและส่งไปยังอุปกรณ์ปลาย เพื่อทำการเปลี่ยนกลับคืนให้เป็นสัญญาณของ โทรศัพท์ เครื่องป้อนข้อมูล โทรภาพ และอื่นๆ เป็นต้น



รูป 3.2 แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของระบบการสื่อสารเส้นใยแสง

อนึ่ง อุปกรณ์เปลี่ยนไฟฟ้าเป็นแสงนั้นทำได้ โดยใช้อุปกรณ์กำเนิดแสงได้แก่ LED หรือ Semiconductor laser ส่วนอุปกรณ์เปลี่ยนแสงให้เป็นไฟฟ้านั้นทำได้โดยใช้ไดโอดแสง (Photo diode) , ทรานซิสเตอร์แสง (Photo transistor) นอกจากนี้กรณีที่ระยะทางของสายส่งยาวอาจจำเป็นต้องติดตั้ง ตัวทวนสัญญาณ (repeater) ณ. ตำแหน่งที่เหมาะสม ตัวทวนสัญญาณนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงที่เข้ามาให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า จากนั้นจึงทำการขยายแล้วเปลี่ยนกลับให้เป็นสัญญาณแสงอีกและส่งเข้าไปในเส้นใยนำแสง ในช่วงต่อไป

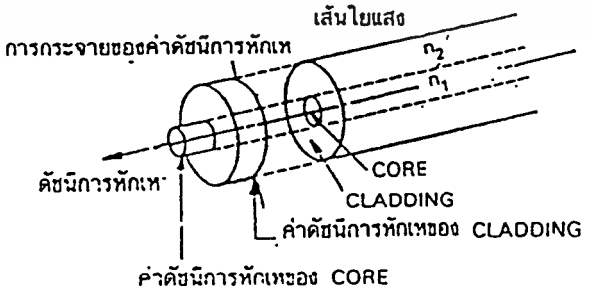
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 เส้นใยนำแสง

3.3.1 โครงสร้างพื้นฐานของเส้นใยนำแสง

โดยทั่วไปแล้วเส้นใยนำแสงเป็นเส้นใยขนาดเล็กที่ทำจากแก้ว สิ่งที่เราพบเห็นบ่อยๆ คือ เส้นใยที่ใช้ในการนำแสงของดอกไม้เรืองแสงสำหรับตั้งประดับเพื่อความสวยงามที่มีขายตามห้างสรรพสินค้าทั่วไป โดยการป้อนแสงสีแดง สีเหลือง สีเขียวเข้าไปที่ปลายข้างหนึ่งของเส้นใยนำแสง และเราจะมองเห็นแสงออกมาจากปลายอีกข้างหนึ่งของเส้นใยนำแสงนี้ได้

โครงสร้างพื้นฐานของเส้นใยนำแสงประกอบด้วยสารไดอิเลคตริก 2 ชนิดที่มีค่าดัชนีหักเหไม่ เท่ากัน โดยสารไดอิเลคตริกที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงต่ำจะเป็นส่วนที่ห่อหุ้มส่วนที่อยู่ตรงกลาง ส่วนตรงกลางนั้นมีดัชนีหักเหของแสงสูงเรียกว่า Core และส่วนหุ้มด้านนอกที่มีดัชนีหักเหของแสงต่ำกว่าเรียกว่า Cladding ยกตัวอย่างเช่น ที่ Core ของเส้นใยนำแสง มีค่าดัชนีหักเหของแสงคงที่ แต่ค่าดัชนีหักเหของ Core กับ Clading เปลี่ยนแปลงในลักษณะของขั้นบันได เส้นใยนำแสงแบบนี้เรียกว่า Step-index Optical Fiber ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในรูป 3.3 เส้นผ่านศูนย์กลางของ Core และเส้นผ่านศูนย์กลางของ Clading จะมีค่าต่างกันตามชนิดของเส้นใยนำแสง สำหรับเส้นใยนำแสงแบบ Multimode นั้น เส้นผ่านศูนย์กลางของ Core มีค่า 40~100 μm ส่วนเส้นใยนำแสงแบบ Single mode นั้น เส้นผ่านศูนย์กลางของ Core มีค่า 5~15 μm สำหรับส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของ Clad นั้น กำหนดให้มีค่าเหมือนกันหมดไม่ว่าจะเป็นเส้นใยนำแสงชนิดไหนโดยมีค่า 100~200 μm นอกจากนั้นค่าดัชนีหักเหของ Core จะมีค่ามากกว่าค่าดัชนีหักเหของ Clading โดยที่เส้นใยนำแสงแบบ Multimode จะมีค่า 1~5% แต่ถ้าเป็นเส้นใยนำแสงแบบ Single mode จะมีค่า 0.1~0.5% มากกว่าค่าดัชนีหักเหของ Clading เป็นต้น



รูป 3.3 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเส้นใยแสง

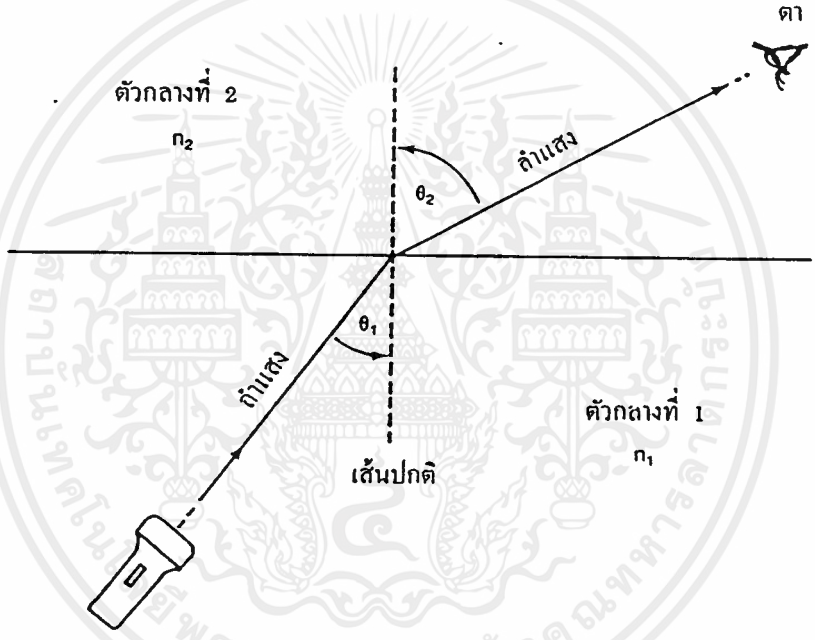
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การเคลื่อนที่ของแสงในเส้นใยนำแสง

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

$$\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = n_2/n_1 \quad \text{.....(1)}$$

โดยที่ในที่นี้ n_1 และ n_2 คือ ค่าดัชนีการหักเหของแสงของตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2 ตามลำดับ ส่วน θ_1 และ θ_2 คือค่าของมุมที่ลำแสงทำกับเส้นปกติ (normal line) บนผิวรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง ดังแสดงในรูป 3.4



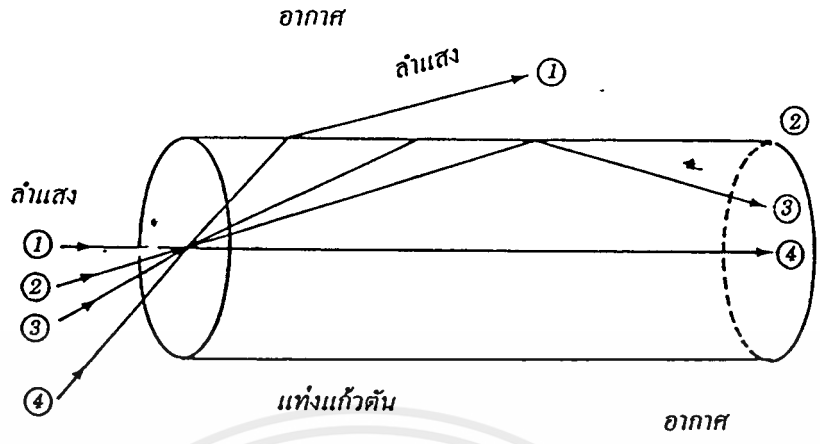
รูปที่ 3.4 การหักเหของแสง

ดังนั้นเมื่อมีการฉายแสงเข้าสู่แท่งแก้วตันที่วางอยู่ในอากาศด้วยค่ามุมตกกระทบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 แล้วเราจะพบว่าเนื่องจากมุมตกกระทบของลำแสงที่หนึ่งมีขนาดเล็กดังนั้นลำแสงนี้จึงเดินทางหักเหทะลุผ่านแท่งแก้วออกไปได้ เมื่อมุมตกกระทบของลำแสงนั้นโตขึ้นเรื่อย ๆ แล้ว ก็ย่อมที่จะมีค่ามุมตกกระทบอยู่มุมหนึ่งที่ทำให้แสงนั้นเกิดการหักเหไปในแนวที่ขนานไปกับผนังของแท่งแก้วนั้นพอดี ซึ่งเรียกมุมตกกระทบที่สามารถทำให้แสงเดินทางขนานไปกับแท่งแก้วได้นั้น เรียกว่า มุมรับแสงสูงสุด (θ_{max}) ดังเช่นการเดินทางของลำแสงที่ 2 ค่ามุมตกกระทบของลำแสงดังกล่าวมีชื่อว่า มุมวิกฤต (critical angle) โดยค่าของมุมวิกฤตนี้สามารถหาได้จากสมการ

$$\theta_{max} = \sin^{-1} [(n1/n0)\sin\theta_c] \quad \text{.....(2)}$$

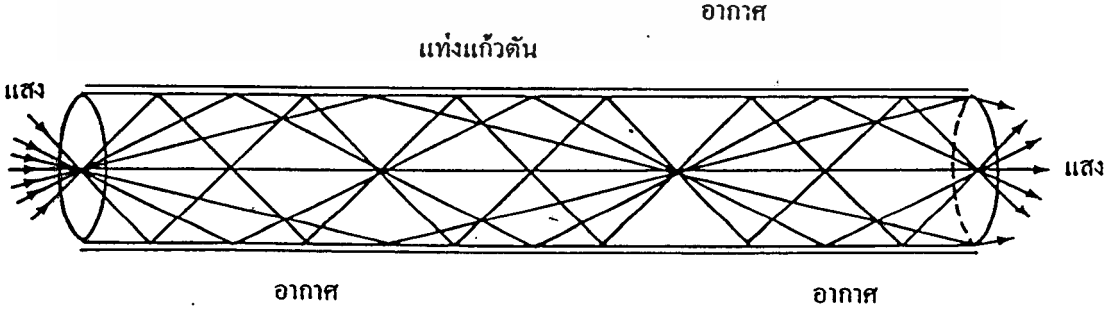
$$\theta_c = \cos^{-1} (n2/n1) \quad \text{.....(3)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 การหักเหของแสงผ่านแท่งแก้วตัน

ดังที่เราทราบกันดีอยู่แล้วว่า เมื่อมุมตกกระทบของลำแสงโตขึ้นเกินกว่ามุมวิกฤตดังกรณีของลำแสงที่ 3 นั้น ลำแสงนี้ก็จะไม่สามารถหักเหออกไปจากแท่งแก้วได้ และจะเกิดการสะท้อนกลับของลำแสงนั้นกลับไปในแท่งแก้วนั้นอีก และถ้าแท่งแก้วนี้ยาวมากลำแสงนี้ก็จะสะท้อนกลับไปกลับมาอยู่ในแท่งแก้วนี้เรื่อยไป ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยการสะท้อนของแสงในลักษณะนี้เรียกว่าการสะท้อนกลับหมด ลักษณะเช่นนี้เอง ทำให้แสงสามารถเดินทางจากปลายข้างหนึ่งไปยังปลายอีกข้างหนึ่งของแท่งแก้วนั้นได้ ในทำนองเดียวกัน ลักษณะการเคลื่อนที่ของแสงในเส้นใยนำแสงนั้นก็เป็นเช่นเดียวกับการเคลื่อนที่ของแสงตามรูปที่ 3.6 นี้เอง เพราะแกนของเส้นใยนำแสงซึ่งใช้เพื่อเป็นทางเดินของสัญญาณแสงนั้น ก็มีลักษณะโครงสร้างเหมือนกับแท่งแก้วทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็กๆ มากเท่านั้น



รูปที่ 3.6 การเคลื่อนที่ของแสงภายในแท่งแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การแตกกระจายของรูปสัญญาณจากเส้นใยนำแสง

จากรูปที่ 3.5 เราจะพบว่า เพราะแท่งแก้วนั้นมีขนาดใหญ่ ดังนั้นแนวของลำแสงที่มีมุมตกกระทบมากกว่ามุมวิกฤตก็ย่อมมีได้หลายแนว จึงทำให้แนวการเดินทางของลำแสงที่สะท้อนไปมาระหว่างผนังของแท่งแก้วนี้เกิดขึ้นได้หลายแนวด้วยกัน ฉะนั้นจึงเป็นการแน่นอนว่าแสงที่เดินทางไปในแต่ละแนวทางนี้ย่อมจะใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านจากปลายข้างหนึ่งของแท่งแก้วไปสู่ปลายอีกข้างหนึ่งนั้นจะไม่เท่ากัน ดังนั้นถ้าลำแสงแต่ละลำแสงที่เคลื่อนที่ผ่านแท่งแก้วนี้ทำหน้าที่เป็นคลื่นพาห์ของสัญญาณเดียวกันอยู่แล้ว สัญญาณนั้นก็จะเดินทางไปถึงปลายอีกข้างหนึ่งของแท่งแก้วได้ไม่พร้อมกัน จึงเป็นเหตุให้สัญญาณผลลัพธ์ที่เกิดจากผลรวมของสัญญาณจากลำแสงแต่ละลำนั้นเกิดการกระจัดกระจาย ตัวอย่างเช่น ถ้าลักษณะของสัญญาณที่มีอยู่ก่อนหน้านั้นเป็นพัลส์สี่เหลี่ยมแคบๆ สัญญาณผลลัพธ์ก็อาจจะกลายเป็นพัลส์กว้างๆ ที่มีลักษณะไม่เป็นรูปสี่เหลี่ยม ดังนี้เป็นต้น ลักษณะที่สัญญาณเกิดความผิดเพี้ยนดังกล่าวมาแล้วนี้ เราเรียกว่า ยืดขยายตัว(dispersion) ของสัญญาณนั้น จากเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นจึงเกิดความจำเป็นที่ต้องสร้างเส้นใยนำแสงให้มีขนาดเล็กทั้งนี้เพื่อลดจำนวนของแนวแสงให้น้อยลง อันจะทำให้เกิดการแตกกระจายของสัญญาณนั้นน้อยลงด้วยนั่นเอง

โดยวิธีวิเคราะห์คุณสมบัติของแสงด้วยทฤษฎีขั้นสูงแล้ว พบว่า ในการที่แสงสะท้อนไปมาอยู่ได้ในแท่งแก้วหรือเส้นใยนำแสงนั้น นอกจากมุมตกกระทบของลำแสงแต่ละลำบนผนังของแท่งแก้วหรือเส้นใยนำแสงนั้นต้องมีค่าโตกว่ามุมวิกฤตแล้ว เรายังได้ทราบเพิ่มเติมอีกว่า ค่าของมุมตกกระทบของลำแสงเหล่านั้นมีค่าไม่ต่อเนื่องกัน หากแต่จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเป็นแบบดิสครีท ซึ่งก็หมายความว่า ลำแสงต่างๆ ที่เคลื่อนที่อยู่ได้ในเส้นใยนำแสงนั้นจะเกิดมีขึ้นโดยแยกกันออกเป็นลำ ๆ ซึ่งสามารถนับจำนวนได้อย่างแน่นอน ในเส้นใยนำแสงนั้นจำนวนลำแสงที่เกิดขึ้นเหล่านั้นจะเป็นตัวบอกจำนวนโหมด (mode) ของเส้นใยนำแสงนั้น ยกตัวอย่างเช่น เส้นใยนำแสงที่มีแนวลำแสงอยู่เพียงแนวเดียวเราเรียกว่า เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยว (single mode fiber) แต่ในเส้นใยนำแสงที่มีแนวลำแสงเกิดขึ้นได้เป็นจำนวนมาก เราเรียกเส้นใยนำแสงนั้นว่า เส้นใยนำแสงมัลติโหมด (multimode fiber)

การแตกกระจายของสัญญาณอันเนื่องมาจากที่แสงแต่ละโหมดเดินทางโดยใช้ระยะเวลาที่แตกต่างกันนี้มีชื่อว่า โหมดดิสเพอร์ชัน (mode dispersion) นอกจากการแตกกระจายของสัญญาณชนิดนี้แล้ว ยังมีสาเหตุอื่นที่ทำให้เกิดการแตกกระจายของสัญญาณอีกนั่นก็คือ การแตกกระจายของสัญญาณอันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอกันของเนื้อสารในแกนเส้นใยนำแสงนั้น ซึ่งเรียกว่า แมทิเรียลดิสเพอร์ชัน (material dispersion) นอกจากนี้แล้วยังมีการแตกกระจายของสัญญาณอันเนื่องมาจากความแตกต่างของความยาวคลื่นในลำแสงที่เคลื่อนที่ไปตามเส้นใยนำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้น ซึ่งเราเรียกว่า เวฟเลนท์ดิสเพอร์ชัน (wavelength dispersion) ข้อดีของเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดียวจะเกิดการแตกกระจายของสัญญาณน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเส้นใยนำแสงแบบมัลติโหมด

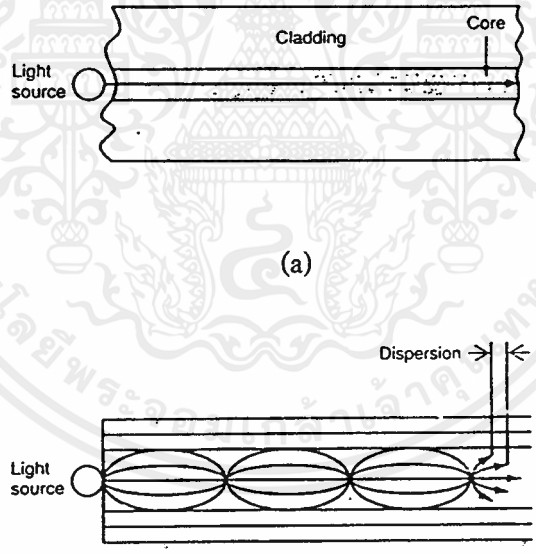
3.3.4 ชนิดของเส้นใยนำแสง

ชนิดของเส้นใยนำแสงสามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆได้ตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีการหักเห แบ่งตามจำนวนโหมด แบ่งตามสารที่ใช้ผลิต แบ่งตามกรรมวิธีการผลิต แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเส้นใยนำแสงเพียง 3 ชนิด เท่านั้น คือ

1. แบ่งตามลักษณะการเดินทางของแสง (propagation mode) คือ

1.1 เส้นใยนำแสง Single mode โดยแนวลำแสงที่เคลื่อนที่ ภายในเส้นใยนำแสงมีเพียงแนวลำแสงเดียวเท่านั้น

1.2 เส้นใยนำแสง Multimode โดยแนวลำแสงที่เคลื่อนที่อยู่ภายในเส้นใยนำแสงมีหลายแนวลำแสงด้วยกัน



รูปที่ 3.7 การเดินทางของแสงภายในเส้นใยนำแสง

a) Single-mode step-index cable

b) A Multimode graded-index cable

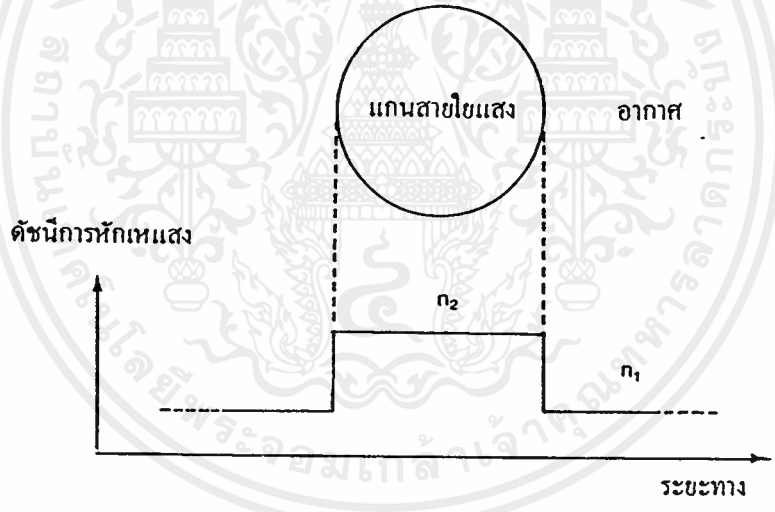
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แบ่งตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีการหักเหของแสง (index profile) คือ

2.1 เส้นใยนำแสงชนิดดัชนีขั้นบันได (step-index fiber)

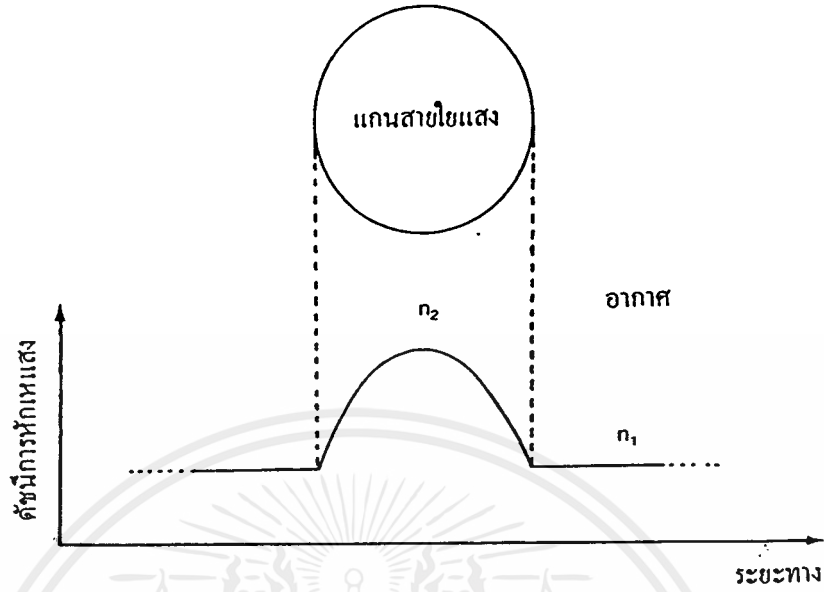
2.2 เส้นใยนำแสงชนิดดัชนีรูปมน (graded-index fiber)

โดยเส้นใยนำแสงชนิดดัชนีขั้นบันไดนั้นแกนของตัวเส้นใยนำแสงดังกล่าวมีค่าดัชนีหักเหของแสงที่สม่ำเสมอเท่ากันตลอดทั้งเส้น ซึ่งถ้าเขียนกราฟแสดงค่าดัชนีหักเหแสงของแกนของเส้นใยนำแสง เมื่อเปรียบเทียบกับดัชนีหักเหแสงของอากาศที่มีอยู่รอบตัวมันแล้วจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งมีลักษณะเหมือนว่าเป็นขั้นบันได ส่วนเส้นใยนำแสงชนิดดัชนีรูปมนนั้น ดัชนีหักเหของแสงค่อยๆ เปลี่ยนแปลงไปอย่างช้าๆ เมื่อเปรียบเทียบกับดัชนีหักเหของแสงของอากาศที่อยู่รอบตัวมันแล้วจะมีลักษณะตามรูปที่ 3.9



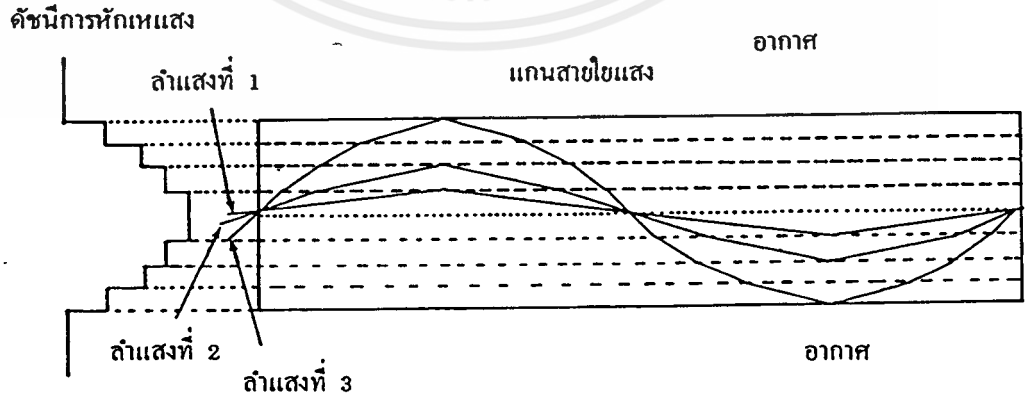
รูปที่ 3.8 ดัชนีการหักเหแสงของเส้นใยนำแสงชนิดดัชนีขั้นบันได(step-index fiber)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ดัชนีการหักเหแสงของเส้นใยนำแสงชนิดดัชนีรูปมน (graded-index fiber)

เส้นใยนำแสงชนิดดัชนีรูปมน (graded-index fiber) ถูกสร้างขึ้นเพื่อปรับปรุงลดการแตกกระจายของสัญญาณที่เกิดขึ้นจากเส้นใยนำแสงแบบมัลติโหมดให้น้อยลง โดยลำแสงทุกลำที่เคลื่อนที่ผ่านเส้นใยนำแสงชนิดนี้จะมีเวลาการเดินทางในเวลาที่เท่ากันจึงเป็นเหตุทำให้การแตกกระจายของเส้นใยนำแสงน้อยลง ลักษณะแนวทางการเดินของแสงภายในเส้นใยนำแสงชนิดนี้จะแสดงได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แนวทางของแสงในแกนเส้นใยนำแสงชนิดดัชนีรูปมน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

3. แบ่งตามชนิดของสารที่ใช้ผลิต

3.1 Silica glass Optic Fiber ซึ่งเป็นสารไดอิเลคตริกที่เป็น Silica glass นอกจากจะใช้ซิลิกา (SiO_2) ที่บริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่แล้วยังใช้สารอื่นเติมลงไปเพื่อทำให้ค่าดัชนีหักเหปลี่ยนแปลงตามต้องการ สารอื่นที่เติมลงไปนี้ เรียกว่าโดแปนท์ (Dopant) ได้แก่ เจอรมันเนียน (Ga) ,โบรอน (B) , ฟลูโอรีน (Fl) เป็นต้น

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

3.3 Plastic Optic Fiber ซึ่งใช้สารไดอิเลคตริกที่เป็นพลาสติกในการทำเส้นใยนำแสงเป็นพวกที่มีดัชนีหักเหสูง ส่วนมากทำจากสารโพลิเมทิลเมทาไครเลท (polymethyl methacrylate) เรียกชื่อย่อๆ ว่า PMMA ส่วนใหญ่แล้วเส้นใยนำแสงแบบพลาสติกนิยมใช้กันมาก เนื่องจากราคาถูก มีการยืดหยุ่นที่ดี และสะดวกต่อการเคลื่อนย้ายและไม่แตกหักง่าย ส่วนข้อเสียของมันคือเส้นใยนำแสงแบบพลาสติกมีการลดทอนของสัญญาณมาก ส่วนใหญ่เส้นใยนำแสงแบบพลาสติกจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนประมาณ 85-300 ไมครอน

3.4 ความสูญเสียของสัญญาณในระบบการสื่อสารด้วยแสง

สาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณในระบบการสื่อสารด้วยแสงที่ผ่านในเส้นใยนำแสงนั้นเกิดจากความสูญเสียโดยสาเหตุ 4 ประการ

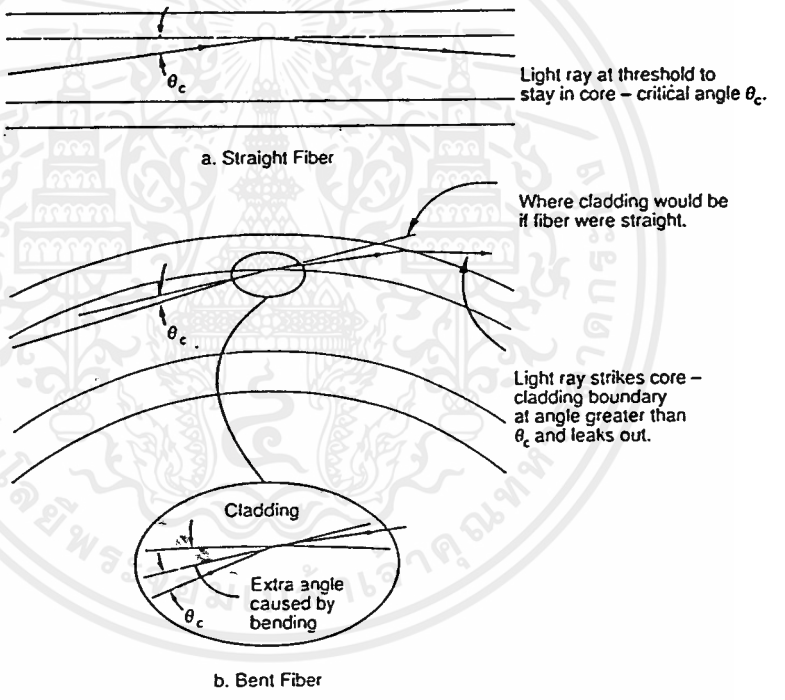
1.ความสูญเสียอันเนื่องมาจากการแผ่รังสีหรือการกระจัดกระจายของคลื่น (scattering loss) ซึ่งเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของเนื้อสารเพราะมีสิ่งเจือปนอื่นๆ เช่น อนุภาคของน้ำแฝงปนอยู่ในสารซึ่งเป็นแกนของเส้นใยนำแสงนั้น เป็นเหตุให้แสงที่เคลื่อนที่ผ่านไปนั้นเกิดการกระจัดกระจาย ทำให้สูญเสียพลังงานไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

3. ความสูญเสียที่จุดต่ออุปกรณ์ (connection loss) เกิดขึ้นเพราะการที่เราไม่สามารถติดตั้งเครื่องมืออย่างมีประสิทธิภาพเหมือนในอุดมคติได้

4. ความสูญเสียจากการโค้งงอของเส้นใยนำแสง (bending loss) เมื่อเกิดการโค้งงอของสายเส้นใยนำแสงจะทำให้ค่ามุมตกกระทบที่ผนังของเส้นใยนำแสงเปลี่ยนแปลงไป และถ้าความโค้งนั้นมีค่ามากพอสมควรแล้วก็จะทำให้แสงบางส่วนเกิดการหักเหออกจากเส้นใยนำแสงได้ จึงทำให้มีการสูญเสียเกิดขึ้น ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การสูญเสียจากการโค้งงอเส้นใยนำแสง

3.5 แถบการส่งสัญญาณของเส้นใยแสง (Transmission Bandwidth)

องค์ประกอบสำคัญที่กำหนดระยะห่างของตัวทวนสัญญาณ (Repeater) ในการสื่อสารเส้นใยแสงได้แก่ การสูญเสียแสง (Loss) และ Transmission bandwidth ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่าเส้นใยนำแสงมีหลายชนิดคือ เส้นใยนำแสง multimode แบบ step index เส้นใยนำแสง multimode แบบ graded index และเส้นใยนำแสง single mode สำหรับเส้นใยนำแสง multimode ทั้ง 2 แบบนั้นความเร็วในการเดินทางของแสงจะแตกต่างกันตาม mode ทำให้ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างที่แสงเดินทาง ความกว้างของรูปคลื่นขยายกว้างออกตามระยะทาง นอกจากนั้น ทั้งเส้นใยนำแสง multimode และ singlemode ค่า Propagation constant ของสารที่ใช้ทำเส้นใยนำแสงจะมีค่าแตกต่างกันตามความยาวคลื่นของแสง ดังนั้นแสง Incoherent ligth ในขณะเดินทาง ความกว้างของรูปคลื่นจะขยายกว้างออกตามระยะทาง นั่นคือรูปคลื่นของสัญญาณแสงจะมีรูปร่างผิดไปจากเดิม ในการสื่อสารเส้นใยนำแสงนั้น ความเร็วในการส่งและระยะห่างของตัวต้านทานสัญญาณ (repeater) จะขึ้นอยู่กับ Transmission bandwidth นี้

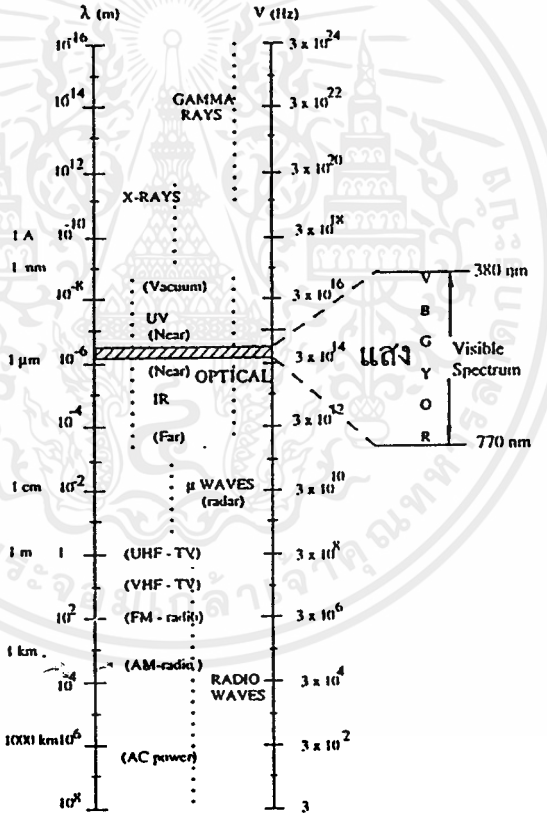
องค์ประกอบที่กำหนด Transmission bandwidth สำหรับเส้นใยนำแสง singlemode ซึ่งมี propagation mode เพียงอันเดียวจึงไม่มีปัญหาจากผลของ Dispersion ดังนั้น Bandwidth ของการส่งสัญญาณจึงขึ้นกับความไม่สมบูรณ์ของความเป็น coherent ligth ของต้นกำเนิดแสง ส่วนเส้นใยนำแสง multimode แบบ graded-index ให้ผลต่างของความเร็วในการเดินทางระหว่างโหมดน้อยมาก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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ระบบออปโตอิเลคทรอนิคส์

4.1 แหล่งกำเนิดแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง แสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้ (Visible light) จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 0.4 (m ~ 0.7 (m คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไปตามช่วงความยาวคลื่น และช่วงความถี่ ดังแสดงในรูป 4.1



รูป 4.1 แสดงชื่อเรียกและชนิดต่างๆของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

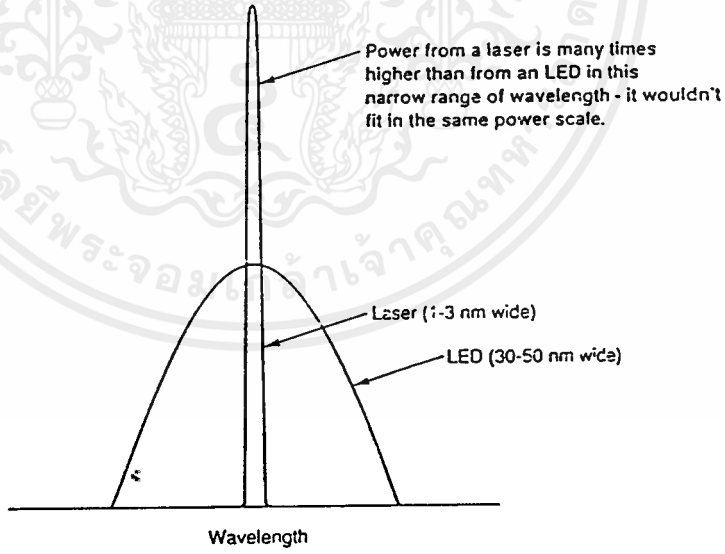
การเลือกช่วงของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงสำหรับเส้นใยนำแสงนั้นแสงจะต้องมีความยาวคลื่นที่ทำให้มีประสิทธิภาพในการส่งผ่านเส้นใยนำแสงมากที่สุด ตามปกติจะนิยมใช้กันอยู่ที่ 850, 1300 หรือ 1550 นาโนเมตร สำหรับเส้นใยนำแสงแบบแก้ว ช่วงของความยาวคลื่นนี้สำคัญมากเนื่องจากช่วงความกว้างของมันมากก็จะเกิดปัญหาการเพี้ยนและการกระจายของสัญญาณ แหล่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำเนิดแสงจะต้องสามารถให้พลังงานที่เพียงพอที่จะสามารถส่งสัญญาณผ่านไปในเส้นใยนำแสงได้ และไม่มีผลต่อการเพี้ยนของสัญญาณที่เครื่องรับด้วย แหล่งกำเนิดแสงส่วนมากที่ใช้ในระบบการสื่อสารทางแสงนี้จะอุปกรณ์ชนิดสารกึ่งตัวนำ คือ light emitter diode หรือ LED และเซมิคอนดัคเตอร์เลเซอร์ (semiconductor laser) และบ่อยครั้งที่จะได้ยินว่า เลเซอร์ ไดโอด (laser diode (LD)) อุปกรณ์พวกนี้ส่วนมากจะเป็นมาตรฐานซึ่งใช้ควบคู่กับวงจรที่ใช้ในการสื่อสารระบบนี้ด้วย

4.1.1 ช่วงทำงานของความยาวคลื่น (operating wavelength)

แหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่นมีผลทั้งต่อการลดทอนของสัญญาณและการแตกกระจายของสัญญาณในการส่งผ่านเส้นใยนำแสง ปกติจะใช้ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 780-850 ,1300 ,1550 นาโนเมตร ในเส้นใยนำแสงชนิดซิลิคอน และประมาณ 660 ในเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก ความกว้างของช่วงสเปกตรัมหรือช่วงความยาวคลื่นที่ส่งนี้ สำหรับแหล่งกำเนิดที่เป็น LED และแหล่งกำเนิดเซมิคอนดัคเตอร์เลเซอร์จะมีความแตกต่างกันตามรูปที่ 4.2



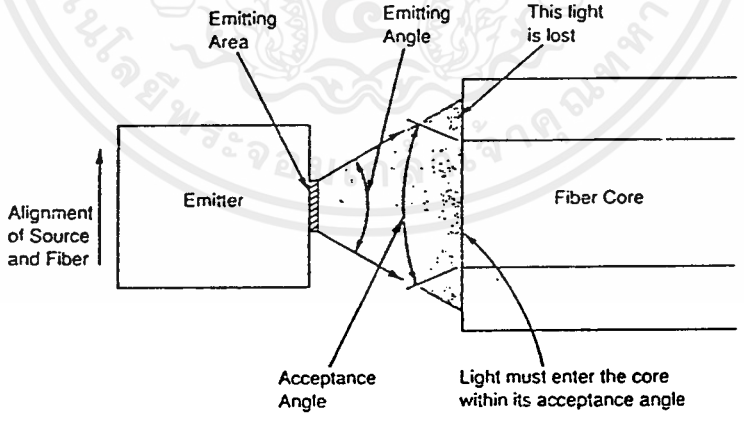
รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างความกว้างของ
สเปกตรัมของ LED และเซมิคอนดัคเตอร์เลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยออกมาและช่วงความกว้างของสเปกตรัมขึ้นอยู่กับความแตกต่างของส่วนประกอบความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมาขึ้นอยู่กับสารกึ่งตัวนำที่นำมาทำเป็นแหล่งกำเนิดแสง ส่วนช่วงสเปกตรัมขึ้นอยู่กับโครงสร้างของอุปกรณ์ ทั้งแหล่งกำเนิดที่เป็นเลเซอร์และ LED นั้นทำมาสารกึ่งตัวนำเหมือนกันและมีความยาวศูนย์กลางเหมือนกัน แต่ LED จะมีความกว้างของช่วงสเปกตรัมมากกว่า ซึ่งถ้าเป็นเลเซอร์ 2 อันที่มีโครงสร้างเหมือนกันแต่ทำจากสารกึ่งตัวนำชนิดต่างชนิดกันช่วงสเปกตรัมแคบคล้ายกันแต่ความยาวคลื่นต่างกัน

4.1.2 พลังงานและการเชื่อมต่อของแสง (Output Power and Light Coupling)

พลังงานที่ใช้ในการสื่อสารทางแสงนี้แหล่งกำเนิดแสงต้องมีพลังงานที่สอดคล้องกับเส้นใยนำแสงที่ใช้ซึ่งโดยปกติจะใช้พลังงานอยู่ในช่วงที่มากกว่า 100 มิลลิวัตต์ สำหรับแหล่งกำเนิดที่เป็นเลเซอร์ และ 10 ไมโครวัตต์สำหรับแหล่งกำเนิดที่เป็น LED พลังงานเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับมุมของแสงที่ปล่อยออกจากแหล่งกำเนิด ขนาดของพื้นที่หน้าตัดของช่องปล่อยแสง การจัดเรียงของแหล่งกำเนิดกับเส้นใยนำแสง และลักษณะการรับแสงของเส้นใยนำแสง ดังรูปที่ 4.3 ความเข้มของแสงที่ปล่อยออกมาจะไม่สม่ำเสมอมุมที่แสงถูกปล่อยออกมาแต่แสงจะมีความเข้มมากตรงตำแหน่งศูนย์กลางการปล่อยปกติแล้วเซมิคอนดัคเตอร์เลเซอร์จะไม่มีการกระจายของแสงด้วยมุมประมาณ 10-20° และแสงจาก LED จะกระจายแสงด้วยมุมที่ใหญ่กว่ามุมของเลเซอร์



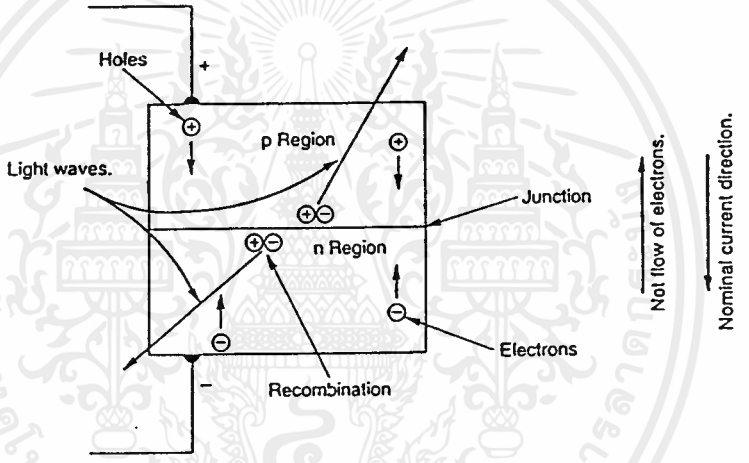
รูปที่ 4.3 การส่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงสู่เส้นใยนำแสง

4.1.3 แหล่งกำเนิดแสง LED (light-emission diode source)

LED เป็นแหล่งกำเนิดแสงในช่วงที่ตาไม่สามารถมองเห็นได้อยู่ในช่วงของแสงอินฟาเรด (infrared light) โดยปกติแหล่งกำเนิดนี้จะใช้ในการสื่อสารในระยะสั้นๆ แนวคิดพื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐานของการปล่อยแสงของ LED นี้แสดงดังรูปที่ 4.4 ถ้ามีแรงดันไฟอย่างอ่อนตกคร่อมเซมิคอนดัคเตอร์ไดโอด (semiconductor diode) จะมีผลทำให้เกิดการไหลของกระแสตกคร่อมในรอยต่อ เนื่องจากไดโอดทำขึ้นจากพื้นที่ 2 บริเวณแต่ละบริเวณมีการเจือสารไม่บริสุทธิ์ (impurities) ทำให้มีลักษณะความต้องการทางไฟฟ้าต่างกัน บริเวณด้านพีจะถูกเจือด้วยสารเจือไม่บริสุทธิ์ที่น้อยกว่าอะตอมของสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดโฮล (hole) บริเวณด้านเอ็นจะถูกเจือด้วยสารที่ไม่บริสุทธิ์ซึ่งจะทำให้เกิดอิเลคตรอนอิสระเกิดขึ้น (free-electron) ดังนั้นจึงมีอิเลคตรอนเคลื่อนที่อย่างมากมายในโครงสร้างผลึก ถ้าใส่แรงดันไฟบวกให้กับด้านพีและแรงดันไฟลบให้บริเวณด้านเอ็น มีผลทำให้อิเลคตรอนและโฮลเคลื่อนที่มารวมตัวกันรอยต่อของทั้ง 2 บริเวณ ถ้าให้แรงดันไฟอย่างต่อเนื่องอิเลคตรอนก็จะเคลื่อนที่ผ่านไปเป็นไดโอดและเกิดการรวมตัวตัวกันอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 4.4 ลักษณะการทำงานของ LED

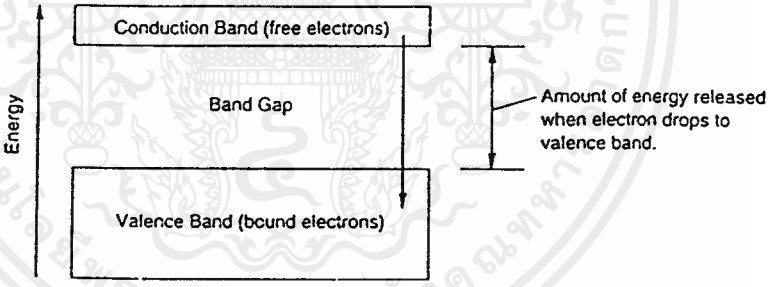
สารกึ่งตัวนำหลายชนิดไม่จำเป็นต้องเป็นซิลิคอนและเจอรมันเนียมจะมีการปล่อยพลังงานความร้อนซึ่งเกิดจากการสั่นในโครงผลึก ซึ่งในสารที่นำมาทำเป็น LED นี้การรวมตัวกันของพาหะจะทำให้เกิดโฟตอนของแสงขึ้นซึ่งเกิดจากการปล่อยมาจากสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญที่สุด คือ แกลเลียมอะเซไนด์ (Gallium arsenide) และอื่นๆ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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงความยาวคลื่นที่ถูกปล่อยออกมานั้นขึ้นอยู่กับระดับพลังงานภายในของสารกึ่งตัวนำ ถ้าเป็นสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิต่ำ อิเลคตรอนทั้งหมดจะมีพันธะอยู่ภายในโครงสร้างผลึก ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นอิเลคตรอนบางตัวจะแตกจากพันธะแล้วกระโดดสู่ระดับพลังงานที่สูงกว่าเรียกว่าระดับคอนดัคชัน (conduction level) ทำให้พวกมันสามารถที่จะเคลื่อนที่อย่างอิสระในโครงสร้างผลึกนั้น แถบพลังงานชั้นวาเลนซ์ (valence band) และแถบพลังงานคอนดัคชัน (conduction band) จะแยกกันอยู่โดยมีระดับพลังงานที่แบ่งกั้นเอาไว้เรียกว่า แถบพลังงานหวงห้าม (band gap) ซึ่งจะเป็นตัวบอกคุณลักษณะหลายอย่างของสารกึ่งตัวนำ

แถบพลังงานคอนดัคชันจะมีอิเลคตรอนอิสระหลังจากเกิดโฮลที่แถบพลังงานวาเลนซ์ ซึ่งมันจะถูกพิจารณาว่าเป็นประจุบวก โฮลนี้สามารถเคลื่อนที่ได้อิเลคตรอนจากตำแหน่งอื่นๆ ในโครงสร้างผลึกจะเคลื่อนที่มารวมตัวกับโฮลและแตกออกเป็นโฮลตามเดิมอีกครั้ง สารเจือที่ไม่บริสุทธิ์ของสารกึ่งตัวนำจะเป็นตัวกำเนิดอิเลคตรอนและโฮล เมื่ออิเลคตรอนตกจากแถบพลังงานคอนดัคชันลงสู่แถบพลังงานวาเล็นซ์จะเกิดการปล่อยพลังงานที่มีค่าเท่ากับความแตกต่างของพลังงานของทั้งสองระดับ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

ความแตกต่างของระดับพลังงานทั้งสองหรือแถบพลังงานหวงห้ามซึ่งทำให้เกิดจำนวนพลังงานที่คายออกมาและความยาวคลื่นที่ถูกปล่อยซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารกึ่งตัวนำนั้น ตามปกติแล้วจะใช้ LED ในเส้นใยนำแสงแบบพลาสติก โดยทำจากแกลเลียมอะลูมินัมอะเซไนด์ (Gallium aluminum arsenide) หรือแกลเลียมอะเซไนด์ (Gallium arsenide) LED แบบแกลเลียมอะเซไนด์จะให้แสงอยู่ในช่วง 930 นาโนเมตร ถ้าเพิ่มอะลูมินัมเข้าไปจะเกิดการลดลงของค่ากระแสขีดเริ่ม (threshold current) ซึ่งทำให้มีช่วงชีวิตดีขึ้นและสามารถเพิ่มพลังงานในแถบพลังงานหวง

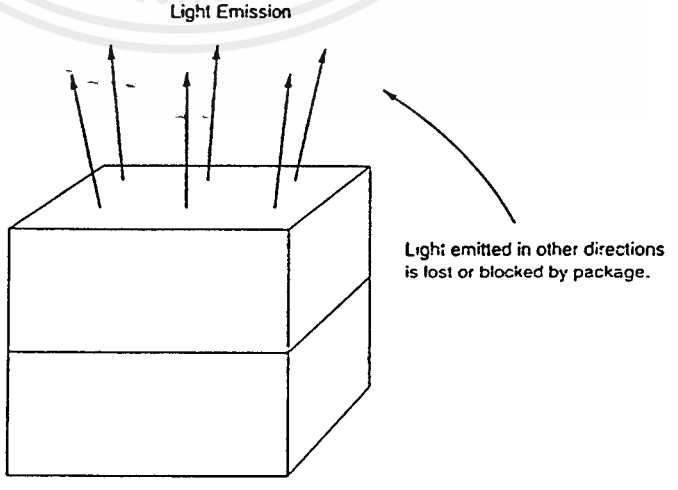
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ห้ามได้ทำให้แสงที่ปล่อยออกมาอยู่ในช่วง 750-900 นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่ใช้งานกันอยู่ที่ 820-850 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิห้อง

สารประกอบสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆก็สามารถนำมาใช้ทำLEDได้ซึ่งจะมีช่วงความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมาแตกต่างกันออกไป เช่น แกลเลียมอะเซไนด์ฟอสไฟด์(Gallium arsenide phophide : GaAsP) ให้แสงในช่วง 665 นาโนเมตร เป็นแสงสีแดง แต่จะไม่ดีเท่ากับแกลเลียมอะลูมิเนียมอะเซไนด์ (GaAlAs) และ GaAsP มีราคาถูกกว่าGaAlAs แต่มีคุณภาพในการทำงานต่ำกว่า

สารประกอบสารกึ่งตัวนำที่สำคัญมีคุณภาพสูง คือ อินเดียมแกลเลียมอะเซไนด์ฟอสไฟด์ (InGaAsP)ทำจากอินเดียมแกลเลียมอะเซนิคและฟอสฟอรัสรวมกันด้วยจำนวนของอินเดียม (indium) บวกกับแกลเลียม (gallium) อย่างเท่าๆกัน และเติมอะเซนิคกับฟอสฟอรัสลงไปด้วย ผลของสารประกอบนี้คือเขียนได้เป็น $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ เมื่อ x เป็นสัดส่วนของอินเดียมและ y เป็นสัดส่วนของอาร์เซนิค ซึ่งพวกนี้จะถูกเรียกว่า ควอเตอร์นารี (quaternary) เป็นพวกที่มี 4 สารประกอบพวกนี้ทำยากกว่าเตอร์นารี(ternary)พวก3· สารประกอบคือ GaAlAs ซึ่งให้ความยาวคลื่น 1300 และ 1550 nm LEDบ่อยครั้งใช้ในระยะสั้นๆ โดยใช้ความยาวคลื่น 1300 nm เพื่อความสะดวกและการแตกกระจายของสีน้อย แต่ 1550 nm นั้นความแตกกระจายของสีมีมากกว่า

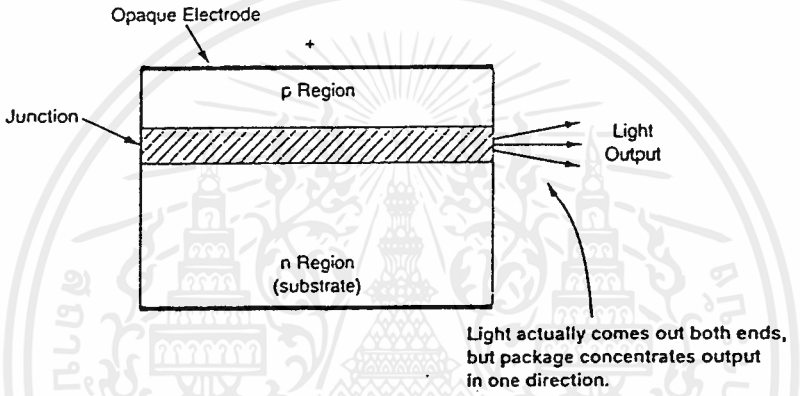
คุณลักษณะอื่นๆของ LED ขึ้นอยู่กับรูปทรงของอุปกรณ์และโครงสร้างภายใน ซึ่งไม่สามารถอธิบายทิศทางของการเกิดแสงได้ ในความจริงแล้วตัวอย่างการเกิดแสงในทุกทิศทางแสดงดังรูปที่ 4.6 และรูปแบบส่วนใหญ่จะเกิดการปล่อยแสงจากผิวหน้าของมัน แสงที่ถูกปล่อยออกมาจะเป็นรูปทรงกรวยแบบกว้างๆ ซึ่งความเข้มของแสงจะตกมากและจะเป็นไปตามมุมของรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า เป็นการกระจายแบบแลมเบอร์เทียน (Lambertian ditribution)



รูปที่ 4.6 ลักษณะการส่งแสงของ LED

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างพื้นฐานที่แตกต่างกันคือไดโอดที่เปล่งแสงทางขอบ (egde emitter diode) ดังแสดงในรูป 4.7 บริเวณที่สัมผัสกับคุณสมบัติของไฟฟ้าจะครอบคลุมทั้งด้านบนสุดและล่างสุดของขอบอิมิตเตอร์ ดังนั้นแสงจึงไม่สามารถออกมาได้ LED จะจำกัดแสงให้อยู่ในแนวแคบในระนาบของรอยต่อ p/n ซึ่ง LED ที่สร้างขึ้นนี้จะถูกล้อมรอบด้วยบริเวณที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่า โดยการสร้างท่อนำคลื่น (waveguide) ซึ่งมีหน้าที่เหมือนกันกับเส้นใยแสง และทำการปล่อยแสงออกจากปลายทั้งสองซึ่งสามารถที่จะต่อเชื่อมเข้าไปในเส้นใยแสง ข้อเสียคือเมื่อปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้ LED เสียหาย



รูปที่ 4.7 การปล่อยแสงของ LED แบบ edge-emittor diode

4.1.4 แหล่งกำเนิดเซมิคอนดัคเตอร์เลเซอร์ (Semiconductor Laser Sources)

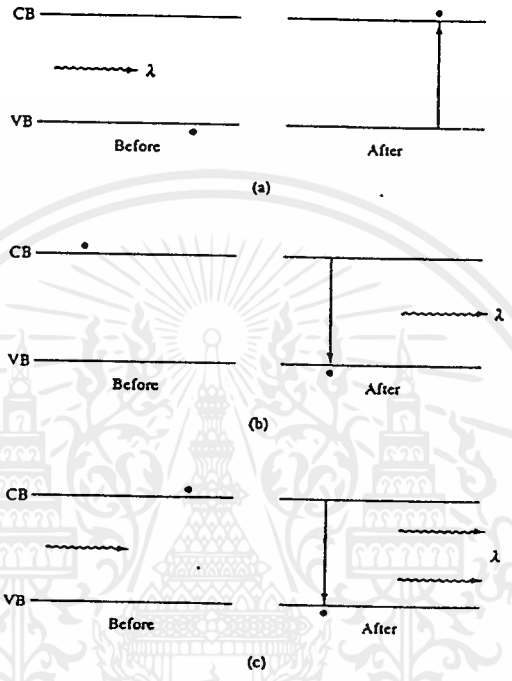
ถึงแม้ว่าเซมิคอนดัคเตอร์เลเซอร์จะมีพื้นที่ในการปล่อยแสงเหมือน LED แต่จะให้แสงในช่วงที่ต่างกัน ซึ่งมีผลต่อพลังงานที่ดีกว่าและทิศทางที่แน่นอนกว่า

4.1.4.1 การปล่อยแสงด้วยการกระตุ้น (Stimulated Emission)

แสงจะถูกปล่อยออกมาเมื่อมีอิเลคตรอนอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าตกลงสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า ซึ่งจะให้พลังงานออกมา โดยจะปลดปล่อยแสงที่ปราศจากอิทธิพลจากภายนอกซึ่งเรียกว่า การปล่อยแสงตามธรรมชาติ (spontaneous emission) แต่ก็เป็นเพียงชั่วขณะเท่านั้น ถ้าเราใช้เวลารอบๆการเกิดแสงอย่างการปล่อยแสงตามธรรมชาตินี้ โดยสมมติว่ามีอิเลคตรอนที่อยู่บนระดับพลังงานบนซึ่งพร้อมที่จะปลดปล่อยพลังงานอยู่แล้ว และใส่พลังงานโฟตอนเข้าไป ซึ่งจะเป็นจำนวนของพลังงานที่อิเลคตรอนต้องการที่จะปลดปล่อย โฟตอนภายนอกนี้สามารถกระตุ้นให้อิเลคตรอนจากระดับพลังงานชั้นบนลงสู่ระดับพลังงานชั้นล่างและคายพลังงานออกมาเป็นแสงที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่นเดิมได้ กระบวนการนี้เรียกว่า การขยายแสงด้วยการกระตุ้น (Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation) หรือเรียกย่อๆว่า LASER ซึ่งแสดงได้ตามไดอะแกรมของการปล่อยแสงแบบต่างๆ ในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 a) การดูดกลืนพลังงาน b) การปล่อยตามธรรมชาติ
c) การปล่อยโดยการกระตุ้น

4.1.4.2 Population Inversion

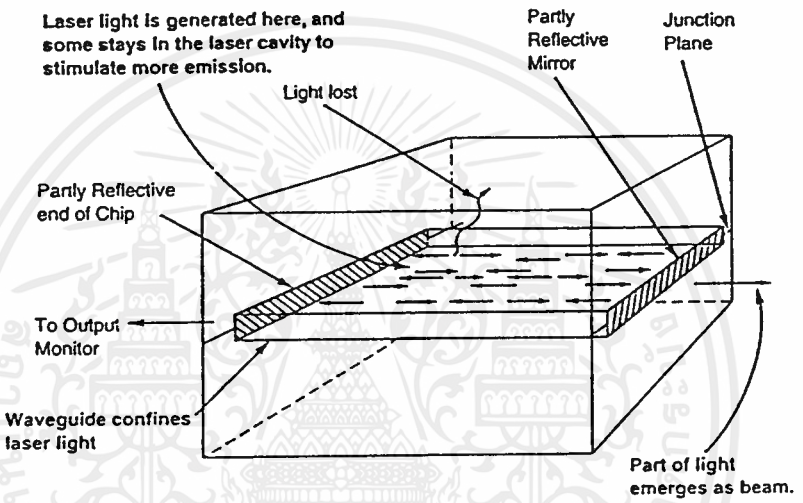
เงื่อนไขพิเศษที่ต้องสนใจของการเกิดเลเซอร์ คือ มีจำนวนอิเลคตรอน หรืออะตอมหรือโมเลกุลอย่างมาก ในชั้นระดับพลังงานด้านบนมากกว่าชั้นระดับพลังงานด้านล่าง เงื่อนไขนี้เรียกว่า population inversion เนื่องจากตามปกติอิเลคตรอนมากมายอยู่ในชั้นล่างอยู่แล้ว สิ่งนี้เป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากอะไรก็ตามที่อยู่ในระดับพลังงานชั้นล่างนั้นสามารถดูดกลืนแสงถูกปล่อยออกมาได้ โดยจะมีการดูดกลืนแสงเร็วกว่าการปล่อยแสง ถ้ามีเงื่อนไขนี้เกิดขึ้น การกระตุ้นให้เกิดการปล่อยแสงก็จะหยุดลงในทุกทิศทาง

4.1.4.3 การจัดรูปของลำเลเซอร์ (Laser Beam Formation)

ลำแสงเลเซอร์ถูกจัดรูปแบบโดยอุปกรณ์สำหรับเพิ่มค่าการเรโซแนนซ์ (resonator)ซึ่งเป็นตัวจำกัดขอบเขตของแสงและทำให้ผ่านไปมาอีกครั้งในตัวกลางที่ถูกระ ตุ้น ดังรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเซมิคอนดัคเตอร์เลเซอร์ เรโซเนเตอร์นี้สามารถทำได้จากส่วนของกระจกที่ขอบแต่ละด้านของบริเวณที่อะตอมถูกกระตุ้นนั้นอยู่แสงที่ถูกปล่อยออกมาจะเคลื่อนไปข้างหน้าตรงไปยังกระจกด้านหนึ่งแล้วจะสะท้อนกลับและเป็นอย่างนี้ต่อไปแสงที่ถูกกระตุ้นให้ปล่อยอิเลคตรอนจะรวมเข้ากันกับแสงที่ผ่านระนาบของรอยต่อแสงที่ถูกปล่อยในทิศทางอื่นๆจะรั่วไหลออกไปดังนั้นแสงที่มีการเดินทางกลับมาตลอดทางแคบๆของบริเวณที่ถูกกระตุ้นจะถูกขยายและสร้างขึ้นเป็นลำแสงเลเซอร์



รูป 4.9 พื้นฐานการเกิดเซมิคอนดัคเตอรเลเซอร์

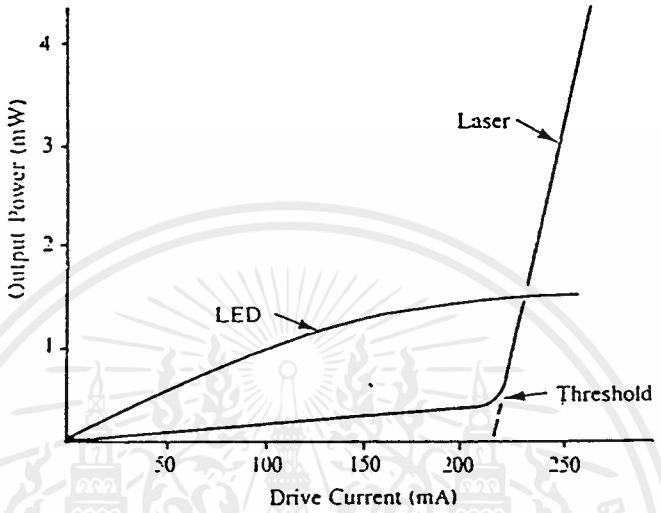
ส่วนปิดกั้นที่เห็นแสดงอยู่นั้นเป็นขบวนการที่ยุ่งยากเล็กน้อยกระจกจะอยู่ส่วนขอบของโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำเรียกว่าแฟคเต็ท (facets) ซึ่งแฟคเต็ทตอนท้ายจะทำให้แสงทะลุออกมาแต่จะครอบคลุมการสะท้อนของแสงส่วนใหญ่ ในทางปฏิบัติแฟคเต็ทที่อยู่ด้านหน้าจะไม่ทำให้แสงออกมาแต่จะเป็นตัวสะท้อนไปมาในสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำเป็นสารซึ่งถูกกระตุ้นให้ปล่อยแสงมาก ดังนั้นที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จึงจำเป็นต่อการสร้างลำแสงเลเซอร์

4.1.5 ความแตกต่างของแหล่งกำเนิด (Functional Differences)

สิ่งที่แตกต่างกันระหว่าง LED กับเลเซอร์ไดโอดนั้นมีอยู่ 2 ประการคือ ถ้าเป็น LED นั้นจะไม่มีตัวเรโซเนเตอร์ แต่ก็สามารถสร้างให้มีขนาดเล็กได้และเลเซอร์นั้นต้องทำที่แรงขับกระแสสูงเพื่อที่จะได้ความหนาแน่นของเลเซอร์มากเอาท์พุทของเซมิคอนดัคเตอร์เลเซอร์ขึ้นอยู่กับแรงขับกระแสที่ผ่านทะลุตัวมันโดยต้องมีแรงดันไบอัสที่มีค่าแรงขับกระแสอย่างน้อยตามต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และยาวนานที่ค่ากระแสต่ำๆเลเซอร์ที่ถูกปล่อยออกมาจะอ่อนเหมือนการปล่อยแสงตามธรรมชาติ (spontaneous emision) ซึ่งมีประสิทธิภาพเหมือนกับ LED ถ้ากระแสที่ให้ผ่านค่าขีดเริ่มไปแล้วนั้น ก็จะเกิดเป็นแสงเลเซอร์และเพิ่มความเข้มขึ้นเรื่อยๆดังรูป 4.10



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของกระแสขับกับกำลังของแสงที่ปล่อย

ความสัมพันธ์ของกระแสขับกับกำลังงานของแสงที่ปล่อยสามารถหาได้จากสมการด้านล่าง คือ

$$P = N \cdot hc/\lambda = (\eta \cdot Eg \cdot I)/e \quad \text{.....(1)}$$

เมื่อ N คือ จำนวนของการประจุต่อวินาที

η คือ อัตราส่วนของแพร่กระจายประจุที่ถูกรวมตัว

E_g คือ พลังงานแถบหวงห้ามของสารในหน่วยของจูล

ความแตกต่างภายในโครงสร้างนี้เป็นส่วนสำคัญเลเซอร์นั้นสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่า LED ธรรมดาและให้กระแสขับที่สูงด้วยดังนั้นเลเซอร์จึงมีกำลังงานมากกว่า LED มากความเข้มข้นของแสงที่ปล่อยออกมานั้นจะเป็นลำแคบกว่าแสงจาก LED ซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 4.1 ที่กล่าวมาแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.6 ความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอด

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

1. $Ga_{(1-x)}Al_xAs$ บน GaAs ความยาวคลื่น 780 ถึง 850 nm
2. $In_{0.73}Ga_{0.27}As_{0.58}P_{0.42}$ บน InP ความยาวคลื่น 1310 nm
3. $In_{0.58}Ga_{0.42}As_{0.9}P_{0.1}$ บน InP ความยาวคลื่น 1550 nm

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

4.1.7 สเปกตรัมของเลเซอร์ (Laser output spectrum)

เป็นรู้กันอยู่แล้วว่าเลเซอร์ไดโอดจะให้แถบสเปกตรัมที่แคบกว่าLEDมากจึงทำให้เลเซอร์ไดโอดมีความสามารถในการส่งสัญญาณด้วยความเร็วสูงผ่าน เส้นใยนำแสงโดยทำให้มีการแตกกระจายของสัญญาณน้อย ถึงอย่างไรก็ดีขนาดของแถบสเปกตรัมที่มีขนาด 1 ถึง 3 nm ก็ใหญ่เพียงพอที่จะทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการแตกกระจายของสัญญาณสเปกตรัมของเลเซอร์ไดโอด ถึงแม้ว่าจะมีความเข้มข้นของกำลังงานมากที่สุดที่ความยาวคลื่นหนึ่งก็ตาม แต่ในเลเซอร์ไดโอดการเกิดเลเซอร์ออสซิลเลชัน (Laser oscillation)ที่ต่อเนื่องกันทำให้เกิดอัตราขยายซึ่งมีผลต่อการเกิดความยาวคลื่นอื่นๆ ด้วย แต่ความยาวคลื่นเดียวเท่านั้นที่มีอัตราขยายสูงสุดระหว่างระยะทางของตัวเรโซเนเตอร์ที่กำเนิดเลเซอร์โดยความยาวคลื่นหาได้จาก

$$2D = N\lambda \qquad \text{.....(3)}$$

เมื่อ 2D คือ ระยะไปกลับในระหว่างเรโซเนเตอร์ในหนึ่งรอบ

N คือ จำนวนเต็ม

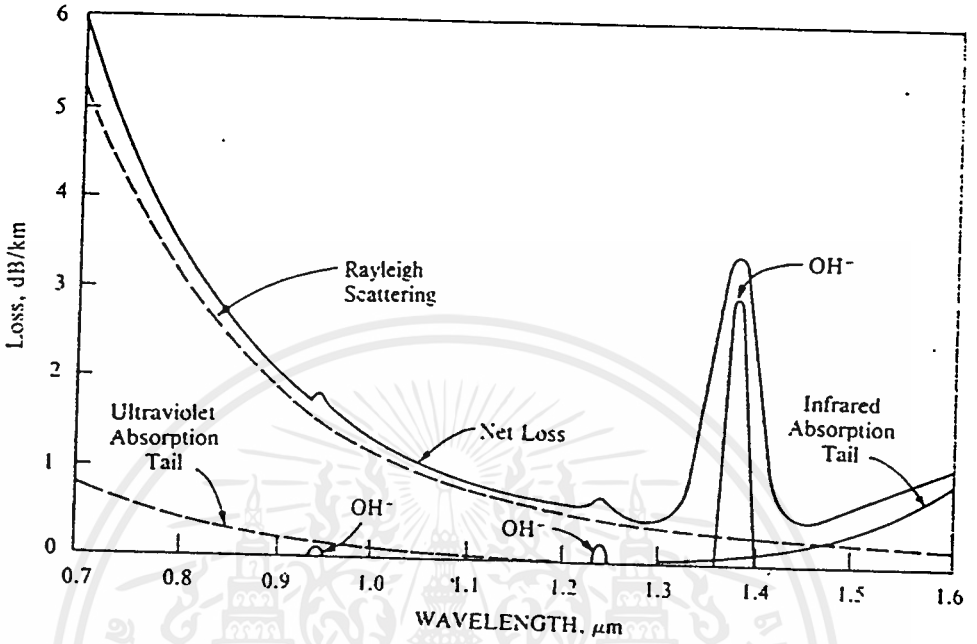
โดยความยาวคลื่นนั้นต้องอยู่ในขอบเขตของความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่เกิดจากการปล่อยโดยการกระตุ้น

4.1.8 Fiber Transmission windows

ทั้งแหล่งกำเนิดที่เป็น LED และเลเซอร์ไดโอดจะมีลักษณะการส่งผ่านเหมือนกันถึงแม้ว่าจำนวนค่านิวเมอริคัล (numerical value) จะต่างกัน คุณลักษณะเด่นของการปล่อยแสงนั้นจะต้องเข้ากันได้กับช่องการปล่อยให้ผ่านของเส้นใยนำแสง (Fiber Transmission windows) ซึ่งตามปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีค่าอยู่ที่ 0.85 , 1.3 , 1.5 ไมโครเมตร โดยแสดงไว้ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียในเส้นใยนำแสงน้อย วัสดุที่ใช้ทำแหล่งกำเนิดนั้นสามารถทำให้มีพฤติกรรมตามช่องทางนี้ได้



รูปที่ 4.11 Fiber Optic transmission windows

อัตราส่วนของการโด๊ปในสารที่เป็นวัสดุที่ใช้ทำเลเซอร์ไดโอดจะสามารถหาช่องว่างแถบพลังงาน (band gap) ของสารผสมนั้นได้ ซึ่งจะทำให้ได้ความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมาด้วย สมการด้านล่างนี้ใช้ในการหาความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมาเมื่อทราบค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารผสมนั้น

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

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นที่ต้องการหา

E_g คือ ช่องว่างแถบพลังงานในหน่วยอิเลคตรอนโวลต์

4.2 วงจรขับ

เป็นส่วนที่ในการมอดดูเลทสัญญาณข้อมูลที่ต้องการส่งเข้าไปในเส้นใยนำแสงเข้ากับแสงโดยใช้ความเข้มของกระแสเป็นตัวกำหนดความเข้มของแสงที่จะเปล่งออกจากแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้แล้วส่งเข้าไปในสายเส้นใยนำแสงเรียกว่าอินเท็นซิตีมอดดูเลชัน(Intensity modulation)โดยความยาวคลื่นของสัญญาณแสงจะมีค่าสั้นกว่า(ความถี่มากกว่า)ความยาวคลื่นของสัญญาณไฟฟ้ามากดังนั้นความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า จึงเป็นตัวที่ทำหน้าที่เป็นเอ็นเวลลอปของสัญญาณแสงที่ออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การออกแบบตัวส่งแสง (transmitter desing)

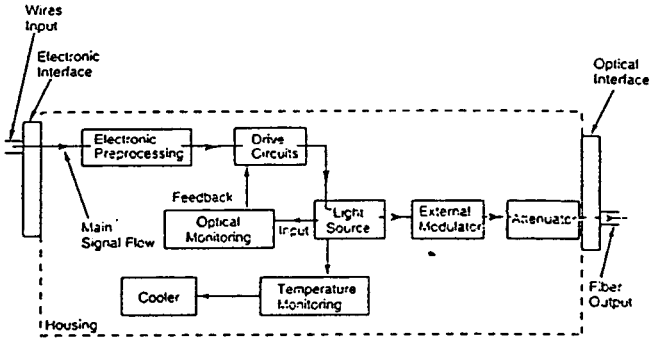
แหล่งกำเนิดแสงเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบโดยตัวส่งแสงจะต้องสอดคล้องกับประเภทของแหล่งกำเนิดแสงด้วย และสอดคล้องกับประเภทของสัญญาณที่ส่งด้วยว่าเป็นแบบอนาล็อกหรือดิจิตอล (analog or digital) โดยการออกแบบจะมีตัวเรือน(housing) ซึ่งถือว่าเป็นส่วนที่ต้องการเพื่อช่วยป้องกันแหล่งกำเนิดไม่ให้เกิดการเสียหายและช่วยในการสัญญาณอิเลคทรอนิคส์และช่วยในการส่งแสงผ่านเส้นใยนำแสง โดยส่วนประกอบภายในจะเป็นส่วนช่วยในการต่อเชื่อมแสงกับเส้นใยนำแสง และยังต้องการวงจรขับเพื่อขับกระแส การควมคุมอุณหภูมิ

4.2.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของตัวส่งแสง

ในตัวเรือนของตัวส่งแสงจะต้องประกอบไปด้วยอุปกรณ์พื้นฐานที่จะกล่าวนี้ซึ่ง ๆ ประกอบเหล่านี้สามารถแสดงให้เห็นได้ในรูปที่ 4.12

1. ตัวเรือน (housing)
2. ส่วนเชื่อมต่อทางอิเลคทรอนิคส์ (Electronic interfaces)
3. ส่วนเชื่อมต่อทางแสง (Optical interfaces)
4. วงจรขับ (drive circuitry)
5. ส่วนควบคุมอุณหภูมิและส่วนหล่อเย็น (Temperature sensing and control)
6. กระบวนการทางอิเลคทรอนิคส์ (Electronic processing)
7. ส่วนของมอนิเตอร์ทางแสง (Optical Monitoring)
8. ตัวลดทอนสัญญาณ (Attenuator)

โดยบางครั้งอาจจะมีอุปกรณ์ส่วนอื่นๆ เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เช่น External modulator ในกรณีที่แหล่งกำเนิดแสงไม่สามารถมอดดูเลทแสงได้เอง หรือส่วนของการลดทอนสัญญาณในกรณีที่มีการติดต่อสื่อสารในระบบสั้นๆ



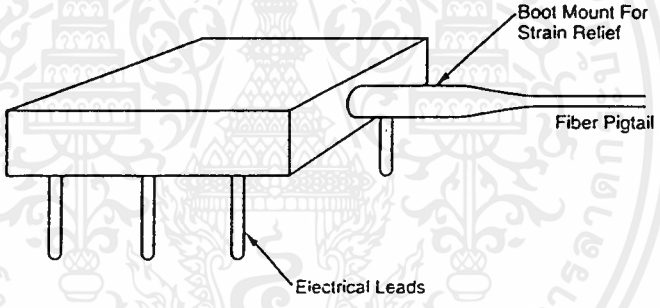
รูปที่ 4.12 ส่วนประกอบในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

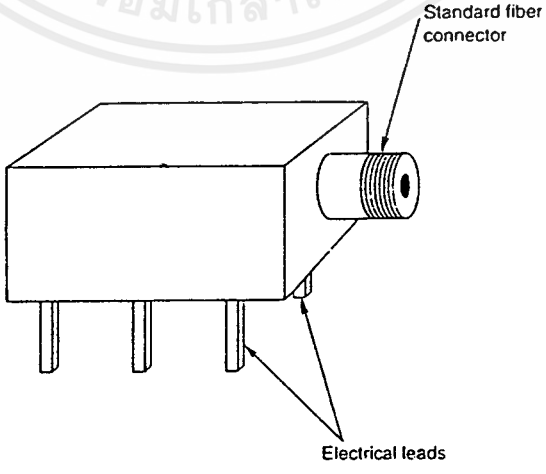
1. ตัวเรือน (housing) ตัวเรือนนี้จะมีรูปแบบอย่างง่ายๆโดยจะออกแบบเป็นกล่องสี่เหลี่ยมเพื่อความสะดวกซึ่งจะมีหัวต่อ 2 ส่วน คือ ส่วนเชื่อมต่อทางแสงและส่วนเชื่อมต่อทางอิเลคทรอนิคส์ซึ่งส่วนใหญ่จะออกแบบเป็นมาตรฐาน

2. ส่วนเชื่อมต่อทางอิเลคทรอนิคส์(Electronic interfaces) ส่วนนี้อาจจะเป็นสายไฟ (wire) ธรรมดา หรือเป็นขายื่นออกมาจากรูปทรงของหีบห่อ (packages) ตัวส่งแสงอย่างง่ายสามารถที่จะขับกระแสด้วยสัญญาณไฟฟ้าที่เข้าไปได้โดยตรง

3. ส่วนเชื่อมต่อทางแสง (Optical interfaces) เป็นการเชื่อมต่อระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและเส้นใยนำแสง ดังแสดงในรูป 4.13 ซึ่งเป็นหัวต่ออยู่ในตัวเรือน แสงจะถูกส่งไปยังเส้นใยนำแสงโดยเลนส์ข้างในที่ประกอบด้วย collimating lens และส่วนของเส้นใยนำแสง ส่วนFiber Pigtail จะทำการรวมแสงจากบริเวณที่มีแสงเปล่งออกมาและส่งไปข้างนอกซึ่งสามารถต่อเข้ากับเส้นใยนำแสงภายนอกได้



a) Transmitter with Fiber Pigtail



(b) Transmitter with Integral Connector

รูป 4.13 ส่วนเชื่อมต่อทางแสงของตัวส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. วงจรขับ (Dirve circuitry) ขึ้นอยู่กับชนิดของการใช้งาน ขนาดข้อมูล และแหล่งกำเนิดแสง LEDสามารถถูกขับได้โดยตรง โดยอาศัยแหล่งกำเนิดกระแส (current source) ที่เหมาะสม

(ถึงแม้ว่าสัญญาณส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแรงดันและจะต้องถูกแปลงให้เป็นกระแส) อย่างไรก็ตาม เซมิคอนดัคเตอร์เลเซอร์จะต้องถูกไบอัสจนถึงระดับกระแสที่ใกล้เคียงกับค่า laser threshold

5. ส่วนควบคุมอุณหภูมิและส่วนหล่อเย็น (Temperature sensing and cooling) คุณลักษณะการทำงานของเซมิคอนดัคเตอร์ อันได้แก่ threshold current กำลังเอาท์พุทและความยาวคลื่นจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ค่า threshold current จะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โปแนนเชียลตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป $\Delta T = (T_1-T_2) / T_1$ ซึ่ง T_1 คืออุณหภูมิตอนเริ่มต้น T_2 คืออุณหภูมิสุดท้าย เนื่องจากสัญญาณเอาท์พุทเป็นสัดส่วนกับกระแสขับที่มีค่ามากกว่า threshold current กำลังเอาท์พุทลดลงขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น กำลังเอาท์พุทจะถูกทำให้หมดไปภายในเลเซอร์ ดังนั้นช่วงชีวิต (life time) ของเลเซอร์จะลดลงตามอุณหภูมิ ทำงาน การเปลี่ยนแปลงในเรื่องความยาวคลื่นมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในดัชนีหักเหของสารกึ่งตัวนำและในช่องว่างเลเซอร์ (laser cavity)

Thermoelectric cooler ในตัวส่งแสงสามารถทำให้การทำงานมีความแน่นอนที่อุณหภูมิคงที่ การควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์สามารถลดความไม่ดีของกำลังเอาท์พุทอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ จะทำให้กำลังเอาท์พุทที่คงที่เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการทำงานของอุปกรณ์รับแสง ขณะที่กำลังเอาท์พุทที่ตรวจวัดได้ลดลง อัตราบิตคลาดเคลื่อน (bit-error rate) เพิ่มขึ้นในระบบดิจิตอล และ s/n ratio ลดลงในระบบอนาล็อกจะทำให้การทำงานของอุปกรณ์กำเนิดแสงลดลงและขั้นตอนนี้จะทำให้ความยาวคลื่นของแสงคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง กระแสขีดเริ่มมีค่าคงที่ (threshold current)

6. กระบวนการทางอิเลคทรอนิกส์ (Electronic processing) เป็นกระบวนการขั้นต้นที่วงจรขับของตัวส่งแสงจะทำการใส่สัญญาณไฟฟ้าทางอินพุทให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมสำหรับทำการขับแหล่งกำเนิดแสง ตัวอย่างเช่นการแปลงสัญญาณจากแรงดันซึ่งจะขับวงจรอิเลคทรอนิกส์ไปเป็นกระแสซึ่งจะมอดดูเลท LASER และ LED

7. ส่วนของมอนิเตอร์ทางแสง (Optical Monitoring) ตัวส่งแสงชนิดเลเซอร์ประกอบด้วยวงจรเอาท์พุทที่มีเสถียรภาพ โฟโตดีเทคเตอร์จะตรวจจับแสงที่แผ่ออกจากส่วนหน้าของเลเซอร์และขับวงจรการป้อนกลับ (Feedback circuit) ซึ่งจะปรับกระแสขับจนกำลังเอาท์พุททั้งหมดคงที่

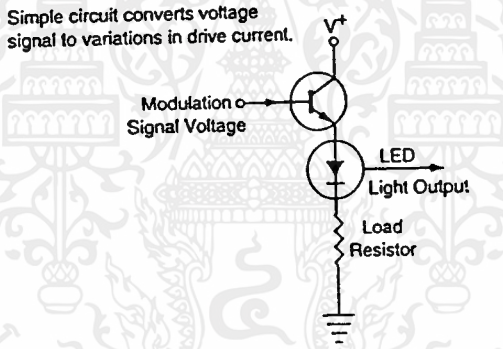
นอกจากนี้ตัวลดทอนสัญญาณ (Attenuator) ตัวส่งแสงจะสร้างระดับกำลังที่เป็นมาตรฐาน แต่ในบางกรณีระดับกำลังเหล่านี้อาจจะสูงกว่าที่ต้องการเนื่องจากตัวรับแสงสามารถรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังอินพุทได้จำกัด ในบางครั้งจะใช้ตัวลดทอนสัญญาณเพื่อที่จะลดเอาท์พุทของตัวส่งแสงให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยสำหรับตัวรับแสง

4.2.3 การออกแบบตัวส่งแสงโดยใช้ LED อย่างง่าย

LED เป็นแหล่งกำเนิดที่จะเปล่งแสงเมื่อทำการไบอัสแรงดันซึ่งมีค่าอย่างน้อยสูงกว่าแรงดันในช่องว่างหรือช่วงดีพลีทชัน โดยมีค่าประมาณ 1.5 โวลท์สำหรับLED ที่ทำจาก GaAlAs ความยาวคลื่น 800-900 nm และประมาณ 1 โวลท์สำหรับ GaAsP ที่มีความยาวคลื่น 1300 nm วงจรขับสำหรับแหล่งกำเนิด LED แสดงดังรูป 4.14



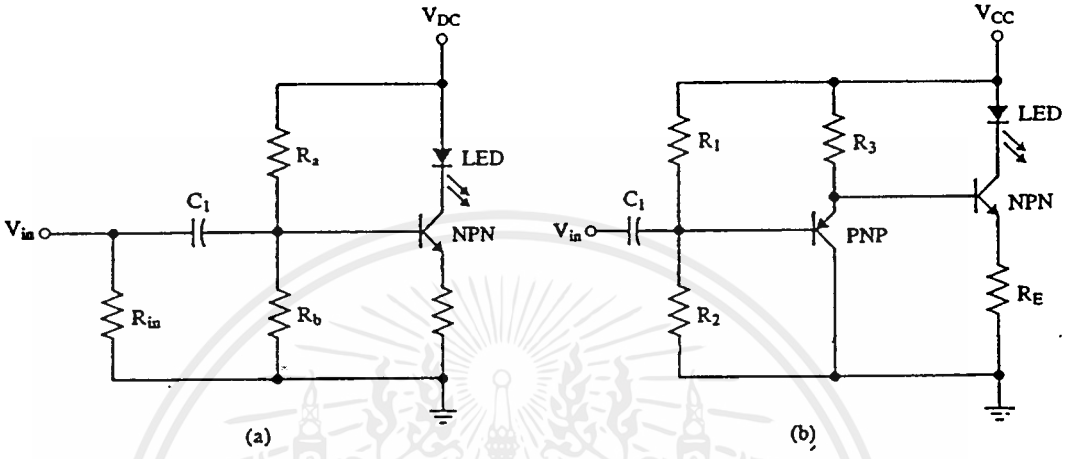
รูปที่ 4.14 วงจรขับอย่างง่ายสำหรับ LED source

4.2.4 การออกแบบตัวส่งแสงโดยใช้เลเซอร์ไดโอดอย่างง่าย

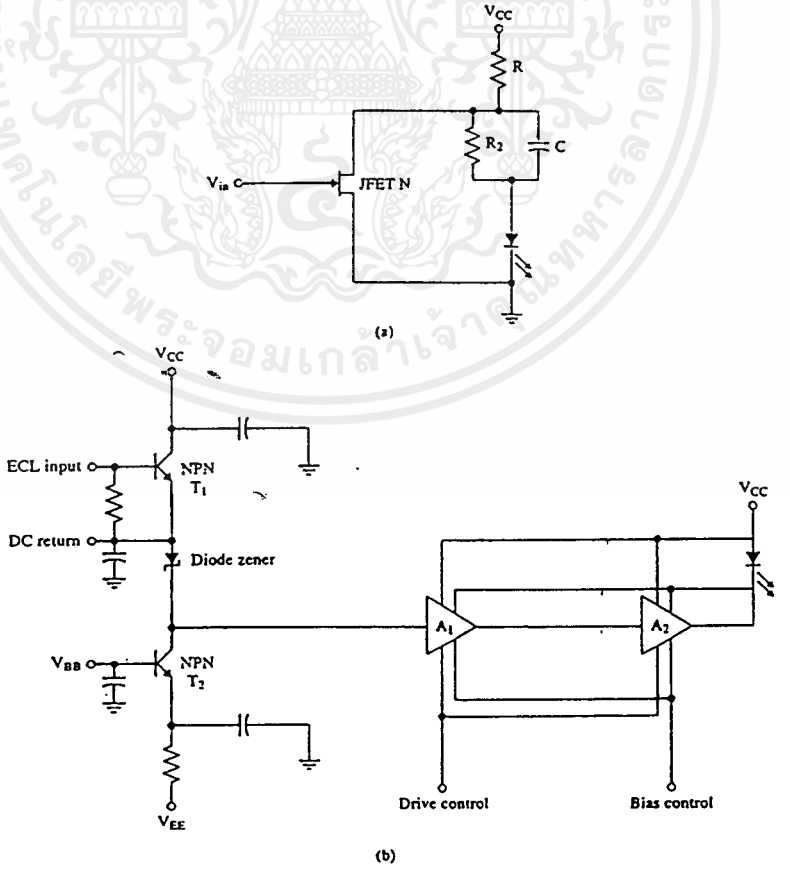
คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซมิคอนดัคเตอร์เลเซอร์จะเหมือนกับ LED เนื่องจากทั้งคู่เป็นแหล่งกำเนิดแบบใช้สารกึ่งตัวนำทั้งคู่ แต่เลเซอร์จะให้แสงออกมาก็ต่อเมื่อแรงขับกระแสสูงกว่าค่าแรงขับกระแสขีดเริ่ม (threshold current) เนื่องจากต้องการกระแสขับที่มากดังนั้นตัวต้านทานที่ใช้จำกัดกระแสจึงต้องมีค่าที่น้อย โดยค่าแรงขับกระแสอยู่ในช่วง 100-200 mA และแรงเคลื่อนไฟฟ้า 1.6-1.8 V วงจรขับของเลเซอร์ไดโอดในรูป ที่ 4.15 เป็นการใช้ในทางอนาล็อกและรูปที่ 4.16 ใช้ในทางดิจิตอล ซึ่งในวงจร 4.16a ใช้วงจรขับแบบแบ่งกระแส (shunt driver) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานซิสเตอร์แบบฟิลด์เอฟเฟ็ค(field effect transistor) โดยค่า R_2 และ C ใช้ในการไบอัสใช้กับทรานซิสเตอร์ โครงสร้างของวงจรนี้สามารถที่จะมอดดูเลทแสงได้มากถึงหน่วยของจิกะ (10^9)



รูปที่ 4.15 วงจรขับของเลเซอร์ไดโอดแบบอนาล็อก



รูปที่ 4.16 วงจรขับเลเซอร์ไดโอดแบบดิจิตอล

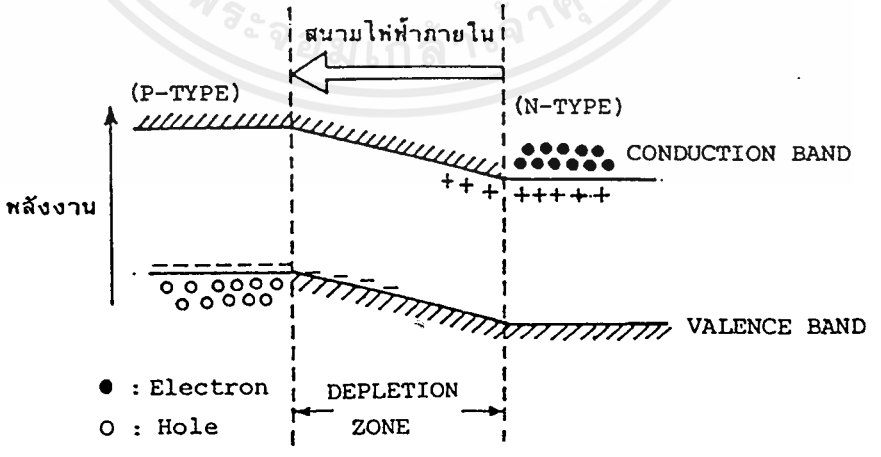
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 อุปกรณ์รับแสง

การรับแสงหมายถึงการเปลี่ยนแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ในการทำงานนี้แบ่งออกได้เป็น 2 วิธี วิธีที่หนึ่งเป็นการเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่า Photo electric effect โดยใช้กระบวนการดูดพลังงานนั่นคือ เมื่อมีแสงมาตกกระทบสารกึ่งตัวนำ อิเลคตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์แบนด์จะเลื่อนขึ้นไปอยู่ที่คอนดัคชันแบนด์แต่การเลื่อนขึ้นไปนี้เป็นแต่เพียงอิเลค ตรอนเคลื่อนที่เท่านั้นและในที่สุดจะกลับมารวมกับโฮลอีกครั้งหนึ่งในแถบวาเลนซ์แบนด์ทำให้ไม่ได้รับ photo electric effect ด้วยเหตุนี้เพื่อที่จะเปลี่ยนแสงให้เป็นกระแสไฟฟ้าจะต้องใช้สภาพการแยกกันของอิเลคตรอนกับโฮลก่อนที่มันจะมารวมตัวกัน

วิธีที่สองทำโดยการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานความร้อนแล้วจึงเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า Sensitive Heat effect โดยทั่วไปจะมีการตอบสนองช้ามากและความไวไม่ดีนักจึงใช้กับ เทอร์โมคับเปิล (Thermocouple) และโบโรมิเตอร์และอื่นๆ แต่ไม่นำมาใช้ในการสื่อสารด้วยแสง

สำหรับอุปกรณ์รับแสงสารกึ่งตัวนำก็เช่นเดียวกับแหล่งกำเนิดแสง นั่นคือเพื่อที่จะแยกอิเลคตรอนกับโฮลนั้นโดยทั่วไปใช้ PN-junction ซึ่งที่รอยต่อของ P-N นั้นจะเกิดสนามไฟฟ้าในที่ว่างขึ้นโดยมันจะถูกดึงด้วยอิเลคตรอนของ N-type ของโฮลของ P-type ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบและบวกตามลำดับ เป็นผลทำให้ไม่มีอิเลคตรอนและโฮลขึ้นตรงปริเวณรอยต่อนี้ เรียกว่า Depletion zone ดังในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะของ Depletion zone

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

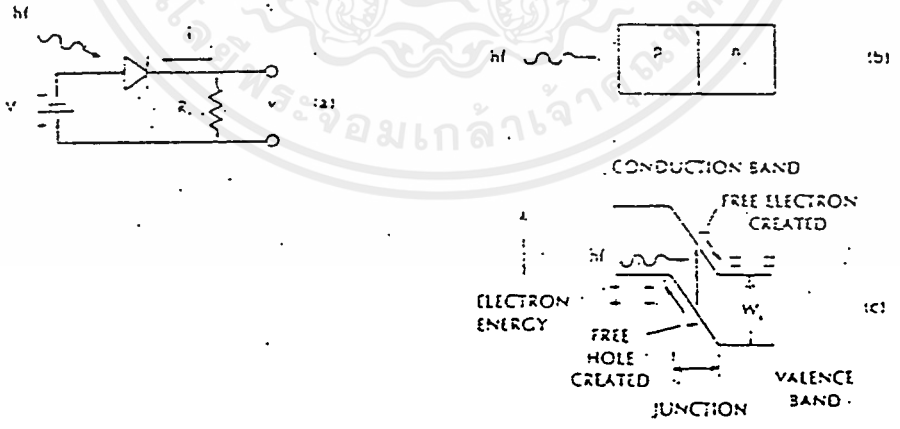
อุปกรณ์รับแสงที่ใช้ในการสื่อสารทางแสงส่วนใหญ่จะเป็นพวกโฟโต้ดีเทคเตอร์ (photodetector) โดยทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานทางแสงเป็นพลังงานทางไฟฟ้า โฟโต้ดีเทคเตอร์ในอุดมคติจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

1. จะต้องมีความสามารถในการรับแสงที่เบาบางที่ตกกระทบอุปกรณ์
2. จะต้องสามารถทำงานในช่วงใกล้อินฟาเรด (850,1300,1500 nm)
3. จะต้องมีความเร็วเพียงพอต่อการเปลี่ยนแสงเป็นอิเลคตรอน
4. จะต้องมีขนาดเล็กเข้ากับเส้นใยนำแสงได้ดี
5. จะต้องมีราคาที่ต่ำ
6. จะต้องไม่ไวต่อสิ่งแวดล้อม

โดยปกติทั่วไปจะใช้ตัวรับแสงชนิดที่เรียกว่า PN Photodiode, PIN Photodiode และ APD (avalanche photodiode)

4.3.1 พีเอ็นโฟโต้ไดโอด (PN Photodiode)

เป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่าโฟโต้ไดโอดจะทำงานเมื่อมีแรงดันไบอัสให้กับตัวโฟโต้ไดโอดแบบไบอัสกลับ(reverse bias) ตามรูปที่ 4.18 แสดงลักษณะของ PN photodiode



รูปที่ 4.18 a) เมื่อป้อนแรงดัน reverse bias

b) ลักษณะของ PN junction

c) แสดงระดับพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อให้แรงดันไฟไบอัสกลับจะทำให้ค่าพลังงานกำแพงศักย์ (energy barrier) ระหว่างรอยต่อพีและเอ็นเพิ่มขึ้นทำให้อิเลคตรอนอิสระทางด้านเอ็นและโฮลอิสระทางด้านพีไม่สามารถข้ามบริเวณที่เกิดกำแพงศักย์ได้จึงไม่มีกระแสไหล บริเวณรอยต่อที่ไม่มีประจุใดๆเลยนี้เรียกว่า Depletion zone ตามที่กล่าวมาแล้ว บริเวณความต้านทานสูงเป็นผลให้โวลเตจทั้งหมดที่ตกคร่อมไดโอดจะตกคร่อมบริเวณนี้เกือบทั้งหมด

พิจารณา รูปที่ 4.18(c) เมื่อกลุ่มก้อนโฟตอนถูกดูดกลืนในรอยต่อหลังจากที่ผ่านด้านพีมาแล้ว การดูดกลืนพลังงานทำให้อิเลคตรอนข้ามแถบช่องว่างพลังงาน (band gap) จากวาเลนซ์แบนด์ไปยังคอนดัคชันแบนด์ทำให้อิเลคตรอนเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระและจะทำให้โฮลออกจากวาเลนซ์แบนด์ ดังนั้นจะมีประจุอิสระที่ถูกสร้างขึ้นจากการดูดกลืนโฟตอน ซึ่งอิเลคตรอนจะเคลื่อนตัวลงไปยังกำแพงศักย์และโฮลก็จะเคลื่อนที่ไปยังกำแพงศักย์ซึ่งเป็นสาเหตุให้กระแสไหลผ่านวงจรภายนอกเหมือนกับการปลดปล่อยแสงของอิเลคตรอน ซึ่งในกรณีนี้จะเกิดกระแสไหลในหลอดโฟโต้ไดโอดเมื่อโฮลและอิเลคตรอนรวมตัวกันใหม่ที่บริเวณนั้นจะเกิดสนามไฟฟ้าน้อยๆ ซึ่งจะทำให้ประจุต่างๆหยุดเคลื่อนที่ทำให้กระแสหยุดไหล นอกจากนี้ประจุพาหะจะถูกสร้างขึ้นใกล้ๆ Depletion zone และมันสามารถที่จะแพร่ผ่านบริเวณนี้ไปได้ ดังนั้นจะเกิดสนามไฟฟ้าจำนวนมากที่บริเวณรอยต่อทำให้มีกระแสจากภายนอกเกิดขึ้น

4.3.2 พีไอเอ็นโฟโต้ไดโอด (PIN photodiode)

พีไอเอ็นโฟโต้ไดโอดเป็นอีกชนิดหนึ่งที่ใช้ชั้นของ depletion-layer เข้ามาใช้ในการทำงาน เรียกเต็มๆว่า positve-intrinsic-negative เป็นที่นิยมใช้มากในระบบสื่อสารในการเป็นดีเทคเตอร์รับแสง พีไอเอ็นจะมีชั้นอินทรินสิค (intrinsic) อยู่ระหว่างกลางของชั้นที่มีการโด๊ปเป็นพาหะบวก หรือด้านพี และชั้นที่มีการโด๊ปเป็นพาหะลบหรือด้านเอ็น มีโครงสร้างดังที่มีแสดงในรูปที่ 4.19 แสงจะตกกระทบบนด้านพีของโฟโต้ไดโอด และมีการถูกดูดกลืนแสงโดยอิเลคตรอน อิเลคตรอนจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเข้าไปยังชั้นอินทรินสิคเลเยอร์ที่ไม่ประจุอยู่เลยดังนั้นจึงมีความต้านทานสูงทำให้โวลเตจที่ตกคร่อมไดโอดจะตกคร่อมที่ชั้นนี้เกือบทั้งหมดและจะมีแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้ามาก โดยในระหว่างนั้นต้องมีการไบอัสแรงดันแบบกลับให้กับโฟโต้ไดโอดด้วย โดยในการสร้างคู่อิเลคตรอน-โฮลนั้นต้องใช้พลังงานที่เพียงพอ พลังงานโฟตอนที่ใช้ทำให้เราทราบค่าของความยาวคลื่นคัทออฟ (Cutoff wavelength) ไม่อย่างนั้นโฟโต้ไดโอดจะไม่เปลี่ยนแสงเป็นกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งค่าของความยาวคลื่นคัทออฟสามารถหาได้จากค่าแถบพลังงานช่องว่างของสารที่นำมาทำโฟโต้ไดโอดได้ดังสมการ

$$\lambda c = (h \cdot c)/E_g = 1.24/E_g \quad \text{.....(3)}$$

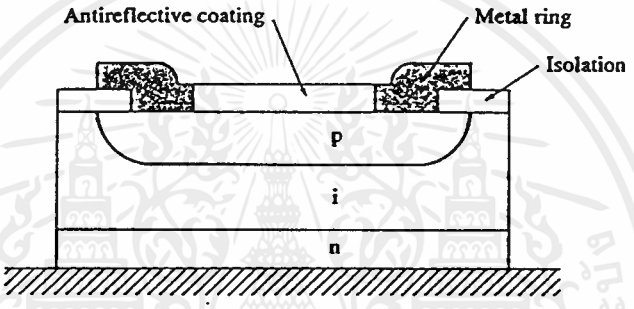
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ λ_c คือ ความยาวคลื่นที่ทำงาน ในหน่วยไมโครเมตร

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์

c คือ ความเร็วของแสง

E_g คือ แถบพลังงานช่องว่างของสารที่นำมาทำโฟโต้ไดโอด (eV)

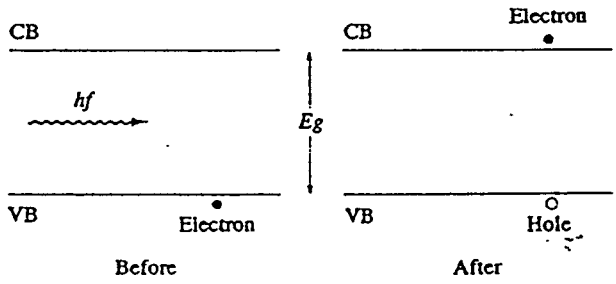


7.1 EFO

รูปที่ 4.19 โครงสร้างของ PIN photodiode

อิเลคตรอนจะต้องอยู่ในชั้นของคอนดัคชันแบนด์ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าหรือกระแสโฟตอน คู่อิเลคตรอน-โฮลจะถูกแยกโดยค่าสนามไฟฟ้าในชั้นอินทรินสิคเลเยอร์ ความหนาของชั้นอินทรินสิคเลเยอร์ควรจะบางแต่กว้างสำหรับการดูดกลืน (บริเวณที่ทำให้เกิดประจุลบ) ตามรูปที่ 4.20 ความบางเป็นส่วนสำคัญเนื่องจากมันจะอำนวยความสะดวกในการตกกระทบของโฟตอนแล้วสร้างคู่อิเลคตรอน-โฮลขึ้นมาบริเวณด้านเอ็นควรจะแคบมากๆ อิเลคตรอนจะได้ไม่เคลื่อนที่ออกจากอุปกรณ์ PIN photodiode จะใช้ในการสื่อสารระยะสั้นๆ และมีการมอดดูเลทด้วยความถี่ต่ำเหมาะสำหรับเป็นตัวรับของ LED ซึ่งปกติจะใช้แรงดันไบอัสกลับ 7-10 โวลต์

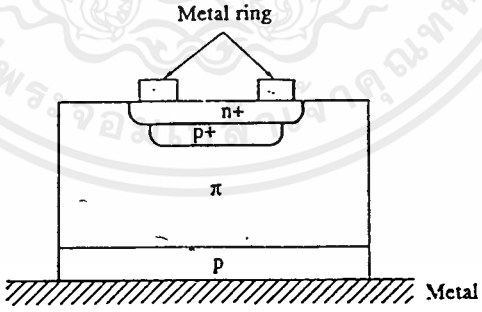
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสง

4.3.3 อะวาลานซ์โฟโต้ไดโอด (avalanche photodiode)

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



รูปที่ 4.21 โครงสร้างของอะวาลานซ์โฟโต้ไดโอด

แสงที่เข้ามาจะต้องผ่านชั้น p^+ และจะถูกดูดกลืนโดยชั้น π เลเยอร์ โฟตอนจะสร้างคู่อิเลคตรอน-โฮลขึ้น อิเลคตรอนจะเลื่อนลอยมาที่รอยต่อพีเอ็น (PN^+-junction)ซึ่งมีสนามไฟฟ้าสูง ซึ่งสนามนี้จะไปเร่งให้อิเลคตรอน- โฮลเร็วขึ้นเป็นผลให้เกิดการชนกับคู่อิเลคตรอน-โฮลคู่อื่นๆ ซึ่งการชนนี้จะเกิดขบวนการเพิ่มอย่างทวีคูณของพาหะโดยนิยามไว้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ V คือ แรงดันไบอัสกลับที่ใส่เข้าไป

V_B คือ แรงดันพังทลาย (Breakdown voltage)

n คือ ค่าคงที่ระหว่าง 3 กับ 6 ซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของสารที่ทำอุปกรณ์รับแสง

จำนวนเฉลี่ยของการเกิดอิเลคตรอน-โฮลที่เกิดจากการสร้างโฟตอนต่อหนึ่งหน่วยความยาวเรียกว่า ไอออไนซ์เซชันเรท (ionization rate) บอกถึงความแตกต่างสำหรับอิเลคตรอนกับโฮล

4.4 คุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง

ประสิทธิภาพของอุปกรณ์รับแสงประเมินได้จากคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ประสิทธิภาพทางควอนตัม (Quantum efficiency) ซึ่งแสดงว่าแสงที่รับมานั้นเปลี่ยนเป็นไฟฟ้าได้มากเท่าใด ความไวการรับแสง (ระดับรับแสงต่ำสุดที่ต้องการสำหรับการส่งที่มีคุณภาพ) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการออกแบบระยะการถ่ายทอดของระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงสัญญาณรบกวน (noise) ที่เกิดขึ้นและความเร็วของการตอบสนองการทำงาน สำหรับประสิทธิภาพทางควอนตัมกำหนดจากสารและโครงสร้างของอุปกรณ์รับแสง แต่สำหรับความไวการรับแสงนั้นจะเกี่ยวข้องกับขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้

เนื่องจาก APD ใช้ปรากฏการณ์การขยายแบบอะวาลานซ์ตามที่กล่าวมาแล้วนั้น ดังนั้นจึงมีความไวสูงประมาณ 10-20 dB (10-100 เท่า) เมื่อเทียบกับโฟโต้ไดโอดธรรมดาสัญญาณรบกวนที่เกิดในอุปกรณ์รับแสงมีสิ่งที่เรียกว่า Shot noise ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสโฟโต้ (photo current) ที่เกิดจากการกระตุ้นอิเลคตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบทางเวลา โดย shot noise เป็นดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\text{short noise current} = I_0 M^{2+F} \quad \text{.....(5)}$$

เมื่อ M คือ อัตราการขยายกระแสของอุปกรณ์รับแสง

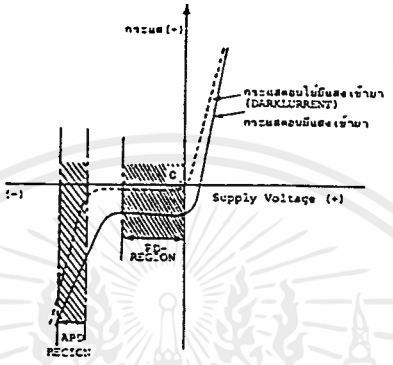
Io คือ กระแสโฟโต้ ในกรณีที่ M=1

F คือ Excess noise figure มีค่ามากเมื่อเทียบกับ M

นั่นคือจากสมการจะเห็นว่าที่ระดับการรับแสงที่เท่ากันถ้าหากว่าทำให้แรงดันไบอัสแบบย้อนกลับที่ป้อนให้มีค่าสูงและทำให้อัตราการขยายกระแสเพิ่มขึ้นนั้นสัญญาณออก(output signal I_oM^{2+F}) จะเพิ่มขึ้นมากด้วย แต่ shot noise ก็เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสงโดยทั่วไปแสดงดังรูป 4.22 จากรูปจะช่วยให้เข้าใจความแตกต่างของบริเวณการทำงานของ APD และ photodiode ได้ดี และในรูปนี้ได้แสดงการไหลของกระแสที่เรียกว่า dark current ที่เกิดในสภาพที่มีแรงดันไบอัสแบบกลับแต่ไม่มีแสงเข้ามา



รูปที่ 4.22 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้และกระแสโฟโต้

กระแส dark current นี้มีลักษณะพิเศษคือ มันจะเพิ่มขึ้นเร็วกว่าการเพิ่มขึ้นของสัญญาณออก (output signal) shot noise เป็นสิ่งที่เกิดจาก dark current และอื่นๆ ที่เป็นแหล่งต้นกำเนิด ในการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงนอกจากจะต้องคำนึงถึง shot noise นี้แล้วยังมี thermal noise ที่เกิดในวงจรไฟฟ้าไม่เกี่ยวกับสัญญาณแสงที่เข้ามา ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องเลือกค่า M ที่เหมาะสมทำให้ผลรวมของ shot noise และ thermal noise มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับระดับของสัญญาณ

ความเร็วในการตอบสนองต่อความถี่เป็นสิ่งที่กำหนดจากเวลาที่มีสัญญาณเข้ามาจนกระทั่งเกิดปรากฏการณ์ดูดแสง แต่ในปัจจุบันเนื่องจากทั้ง APD และ photodiode สามารถตอบสนองความเร็วได้ถึงหลาย GHzจึงไม่มีปัญหาในการใช้งาน การเปรียบเทียบคุณสมบัติของ APD และ photodiode แสดงดังตารางที่ 4.1

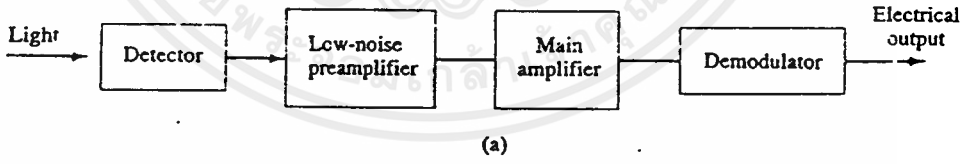
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง

อุปกรณ์รับแสง / หัวข้อ	PD	APD
ประสิทธิภาพทางควอนตัม	80%	80%
ความไวการรับแสง	-15-20 dBm 0	-30-40 dBm0
ความเร็วการตอบสนองความถี่	หลาย GHz	หลาย GHz
อัตราการขยาย	1	500
ค่าแรงดันไฟฟ้าไบอัสที่ต้องการ	0-20 V	30-200 V

4.5 วงจรอุปกรณ์รับแสง

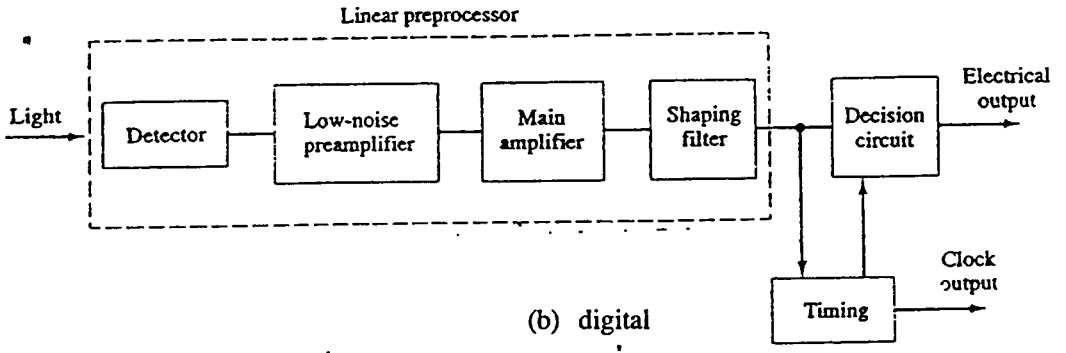
ตามรูปที่ 4.23 แสดงลักษณะบล็อคไดอะแกรมของวงจรรับแสงทั้งสัญญาณที่เป็นดิจิตอลและอนาล็อกจะคล้ายกันมาก เอาท์พุทที่ออกมาจากดีเทคเตอร์จะมาเข้าในวงจรขยายเพื่อทำให้กระแสมากขึ้น



(a)

(a) analog

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

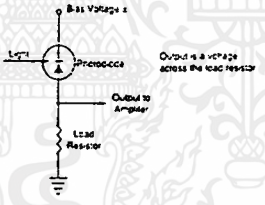


(b) digital

รูปที่ 4.23 บล็อกไดอะแกรมของวงจรรับแสง

4.5.1 วงจรรับแสงแบบโฟโต้ไดโอด

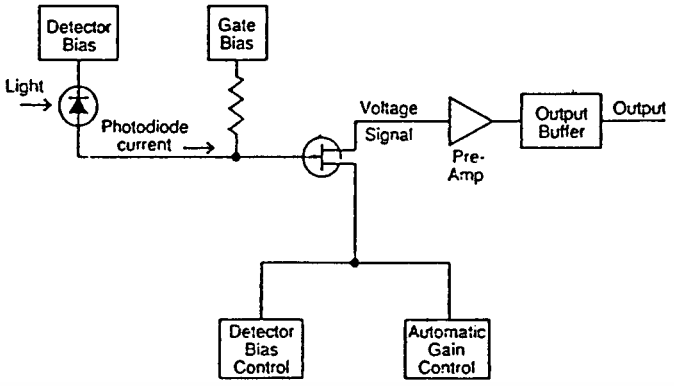
ตามปกติ PIN และ PN photodiode ที่ใช้ในการสื่อสารทางแสงมีวงจรที่ใช้ตามรูปแบบที่กำหนดซึ่งจะต้องมีการไบอัสกลับให้แก่โฟโต้ไดโอดและความต้านทานที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโต้ไดโอดซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.24ซึ่งวิธีนี้โฟโต้ไดโอดจะเป็นตัวนำทางแสง (photoconductive) เนื่องจากกระแสโฟโต้ที่ไหลเป็นสัดส่วนกับความต้านทานของความสว่างของโฟโต้ไดโอด



รูปที่ 4.24 วงจรรับแสงของ PIN และ PN photodiode

การแบ่งแรงดันระหว่างโฟโต้ไดโอดกับตัวต้านทานขึ้นอยู่กับความสว่างถ้าสว่างมากโฟโต้ไดโอดกระแสก็มากในวงจรที่แสดงนี้สัญญาณข้อมูลจะตกคร่อมที่ตัวความต้านทานนอกจากนี้ยังมีวงจรที่ยุ่งยากกว่าโดยมีวงจรขยายด้วยนอกจากตัวต้านทาน คือ PIN-FET and detector preamplifier ในรูปที่ 4.25

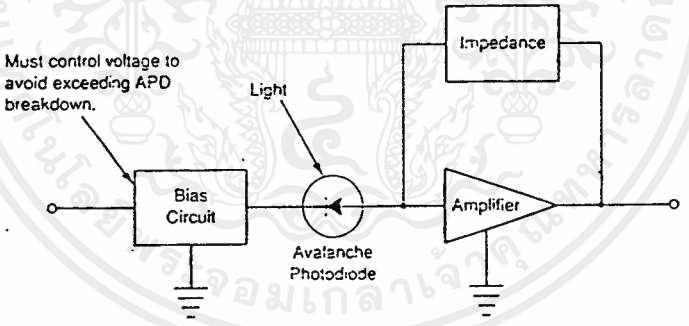
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 บล็อคไดอะแกรม PIN-FET receiver circuit

4.5.2 วงจรรับแบบอะวาลานซ์โฟโต้ไดโอด

รูปแบบของวงจรก็จะคล้ายกับวิธีแรกเนื่องจากต้องการแรงดันไบอัสเหมือนกันแต่ต้องการมากกว่า ซึ่งแต่ละขั้นตอนต้องใช้ความแน่นอนในการทำซึ่งรูปแบบแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 วงจรรับแบบอะวาลานซ์โฟโต้ไดโอดอย่างง่าย

ในทางปฏิบัติมีค่าๆ หนึ่งที่มีความสำคัญกับโฟโต้ดีเทคเตอร์ คือค่า Responsivity (R) บางครั้งอาจเรียกว่า radiant sensitivity ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของกระแสโฟโต้ (กระแสที่เกิดจากการดูดกลืนโฟตอน) กับพลังงานที่ตกกระทบ

$$R = I_p / P_t \quad \text{..... (6)}$$

โดย R มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อวัตต์ (Ampare/ watt)

และ $$I_p = (N_e * e) / s \quad \text{.....(7)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย e คือ ประจุของอิเลคตรอน

N_e คือ จำนวนของอิเลคตรอนที่ถูกสร้างขึ้น

และ $P_t = (N_p E_p / s)$ .....(8)

โดย E_p คือ พลังงานของโฟตอน

N_p คือ จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ

ดังนั้นจะได้ว่า

$R = (N_e * e) / (N_p E_p) = (n_q e)/E_p$ .....(9)

$R = (n_q e)/ (hf) = [n_q (e\lambda)]/ (hc)$ .....(10)

เมื่อ λ มีหน่วยเป็นเมตร

c มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

R มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อวัตต์

e มีหน่วยเป็นคูลอมป์

ดังนั้นจะได้

$R = (n_q \lambda) / 1.24$ .....(11)

จากสมการข้างต้นและ responsivity จะเพิ่มขึ้นได้โดยการเพิ่มความยาวคลื่น เมื่อแสงพุ่งเข้าโฟโต้ไดโอดที่บรรจุอยู่ภายในแก้วหรือพลาสติก โดยแสงต้องทะลุผ่านชั้นพีหรือชั้นเอ็นเข้าสู่ดีพลีชันหรืออินทรินสิค โดยหารผ่านเข้าได้ก็ขึ้นอยู่กับกำลังส่งของแสงด้วย

ตารางที่ 4.2 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	5-15μs	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การออกแบบวงจรที่ใช้ในโครงงาน

ในส่วนของวงจรที่ใช้ในโครงงานนี้สามารถแบ่งเป็นส่วนสำคัญได้ 2 ส่วนใหญ่ๆ ดังนี้ คือ วงจรทางภาครับ (Transmitter circuit) วงจรทางภาครับ (Reciever circuit) โดยวงจรและหลักการของทั้งสองส่วนนั้นสามารถอธิบายได้โดยง่ายในรูปแบบของบล็อกไดอะแกรม ซึ่งจะกล่าวประกอบไปกับหลักการการทำงานของวงจรต่างๆ ในหัวข้อต่อไปนี้

5.1 วงจรทางภาคส่ง

5.1.1 วงจรปรีแอมปลิไฟร์

โดยทั่วไป ไมโครโฟนจะแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบอิมพิแดนซ์สูง (20 กิโลโอห์ม) เอาท์พุทสูง (20 mv) และแบบอิมพิแดนซ์ต่ำ (200 โอห์ม) เอาท์พุทต่ำ (2 mv) ในแบบแรกนั้นไม่ค่อยนิยมใช้แม้จะมีเอาท์พุทสูงซึ่งจะทำให้สร้างวงจรขยายได้ง่าย แต่เพราะมีปัญหาในเรื่องไวต่อสเตร์แม็กเนติกฟิลด์ (Stray magnetic field) เนื่องจากมีอิมพิแดนซ์ที่สูง ส่วนแบบที่มีอิมพิแดนซ์ต่ำจะแบ่งออกเป็นแบบไม่สมดุลซึ่งจะมี 2 สาย โดยสายหนึ่งจะต่อลงกราวน์ อีกสายหนึ่งเป็นสายนำสัญญาณและแบบสมดุลซึ่งจะมี 3 สาย โดยเป็นกราวน์หนึ่งสาย ส่วนอีก 2 สายเป็นสายสัญญาณซึ่งจะนำไปต่อลักษณะดิฟเฟอเรนเชียลอินพุท ทำให้สามารถลดสัญญาณรบกวนที่รับมาระหว่างผ่านสายนำสัญญาณได้ แบบที่ในวงจรจะเป็นแบบอิมพิแดนซ์ไม่สมดุลโดยวงจรปรีแอมป์จะใช้ LF 357 ต่อในระบบอินเวอรท์ติ้ง (Inverting) และใช้ไฟเลี้ยงเดี่ยว (Single supply) สามารถปรับอัตราขยายได้ตั้งแต่ 1-100 เท่า ซึ่งมีลักษณะของวงจรดังรูปที่ 5.1

ตัวเก็บประจุ C_1 จะเป็นตัวกำหนดจุดคัทออฟ ที่ความถี่ต่ำของสัญญาณของออดิโอ f1 (ที่ -3 dB) ถ้าเลือกใช้ C_1 เท่ากับ 10 ไมโครฟารัด จากสมการจะได้ว่า

$$f_1 = 1 / (2\pi * R_1 * C_1) \quad \text{.....(1)}$$

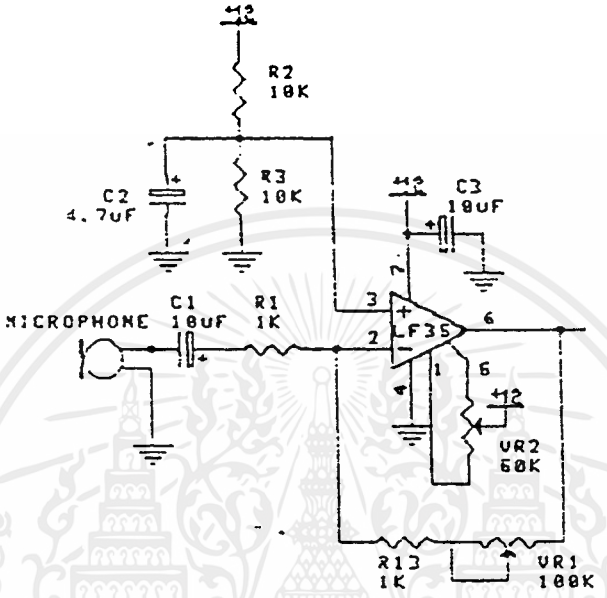
$$= 1 / (2\pi * 1000 * 10^{-6})$$

$$= 15.9 \text{ Hz}$$

ค่าของตัวเก็บประจุ C_4 จะเป็นตัวผ่านสัญญาณเอซีไปสู่ภาคต่อไป จะมีค่าขึ้นกับจุดคัทออฟที่มีความถี่ต่ำและค่าอิมพิแดนซ์ของวงจรภาคตัดไป เราสามารถประมาณค่าตัวเก็บประจุได้โดยให้มีค่าใหญ่ๆ ในที่นี้ให้ค่า C_4 เท่ากับ 10 ไมโครฟารัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าตัวต้านทาน R_2 และ R_3 ทำหน้าที่เป็นตัวแบ่งแรงดันเพื่อไบอัสตัวไอซีให้สามารถใช้ไฟเลี้ยงเดี่ยวได้



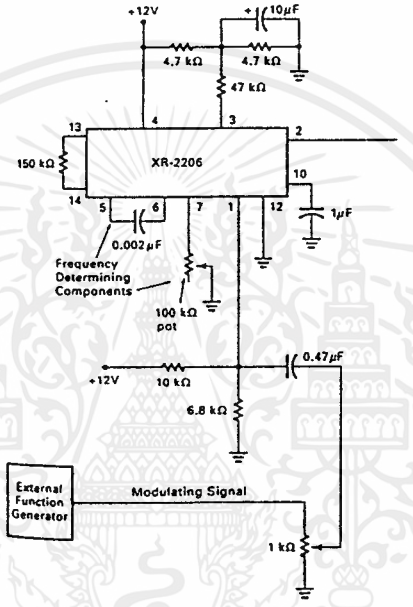
รูปที่ 5.1 แสดงวงจรปรีแอมปลิไฟร์

5.1.2 วงจร Amplitude Modulation :AM

การที่จะได้แอมปลิจูดของการมอดดูเลทที่ดีสุดก็ต่อเมื่อแอมปลิจูดพีคทูพีค (peak-to-peak)ของสัญญาณเท่ากับค่าพีคของสัญญาณคลื่นพาห์ โดยในวงจรที่ใช้นี้จะใช้ไอซีกำเนิดคลื่นความถี่เรียกว่า XR-2206 function generator IC ซึ่งชิปนี้จะเป็นตัวให้คลื่นรูปไซน์ รูปสี่เหลี่ยม รูปสามเหลี่ยม โดยที่ความถี่ที่ได้เหล่านี้จะได้มาจากความต้านทานและตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่ภายนอกและอาศัยหลักการของโวลเตทคอนโทรลซึ่งจะมีความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงดัน ชิปนี้จะทำเป็นวงจรมอดดูเลทแบบ AM โดยที่ความถี่ที่เกิดจากชิปจะเป็นคลื่นพาห์และใช้ความถี่ภายนอกเป็นสัญญาณข้อมูล วงจรจะแสดงดังรูปที่ 5.2 จะใช้แหล่งกำเนิดจากภายนอกที่ให้ความถี่ 200Hz ถึงประมาณ 2 kHz เพื่อมามอดดูเลทกับคลื่นพาห์จากไอซี XR-2206 ถ้าใส่แหล่งกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าเข้าไปโดยใช้แรงดันไฟตรง 12 โวลต์ ที่ขา 2 ของไอซีจะมีเอาท์พุทออกมาเป็นคลื่นพาห์โดยยังไม่ใส่สัญญาณข้อมูลเข้าไป ความต้านทานแบบปรับค่าได้ 100 กิโลโอห์มเอาไว้สำหรับปรับความถี่คลื่นพาห์ที่ต้องการ ความต้านทานแบบปรับค่าได้ 1 กิโลโอห์มใช้เป็นตัวปรับค่าแอมปลิจูดของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณข้อมูลที่มาจากแหล่งกำเนิดความถี่จากภายนอก หากแอมปลิจูดของสัญญาณข้อมูลมากกว่าแอมปลิจูดของคลื่นพาห์จะทำให้เกิดปรากฏการณ์โอเวอร์มอดดูเลทหรือการเพี้ยนของสัญญาณ AM ได้ตามที่กล่าวในบทที่ 2 แล้ว สัญญาณ AM เอาท์พุทจะออกทางขา 2 ของไอซี โดยความต้านทานแบบปรับค่าได้ 10 กิโลโอห์มใช้สำหรับปรับแอมปลิจูดของสัญญาณเอาท์พุต วงจรขยายที่ใช้ในส่วนนี้ใช้เพื่อขยายสัญญาณ AM ให้เหมาะสมกับวงจรดีเทคเตอร์

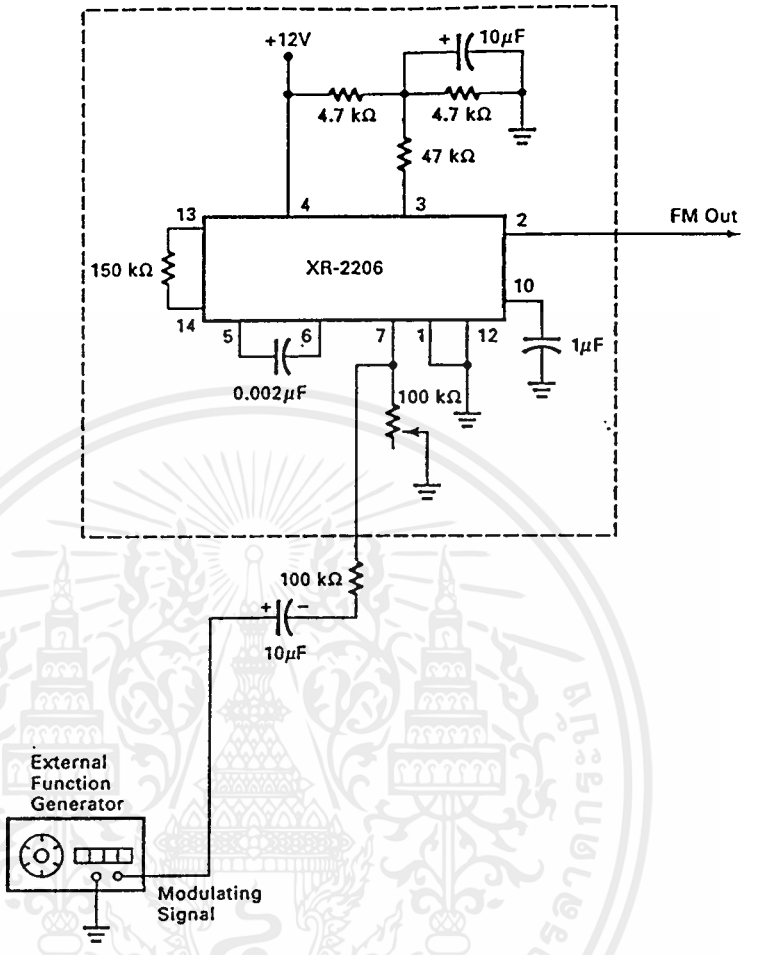


รูปที่ 5.2 วงจรมอดดูเลทแบบ AM

5.1.3 วงจรมอดดูเลทแบบ FM

วงจรที่ใช้ในโครงงานนี้จะใช้ XR-2206 ไอซีกำเนิดความถี่โดยอาศัยแรงดันไฟตรงเป็นส่วนควบคุมความถี่ตามที่กล่าวมาแล้วนั้น วงจรมอดดูเลทแบบ FM ดังแสดงในรูปที่ 5.3 สังเกตว่าจะมีความต้านทาน 100 กิโลโอห์มและตัวเก็บประจุ 10 ไมโครฟารัด ต่ออยู่ที่ขา 7 ของไอซีเพื่อเป็นตัวปรับแอมปลิจูดของสัญญาณข้อมูลก่อนเข้าไอซี ซึ่งในส่วนของคลื่นพาห์สามารถทำได้เหมือนกับวิธี AM ซึ่งจะแตกต่างกันตรงที่ที่ขา 1 ต่อลงกราวน์ และขา 7 เป็นส่วนที่รับความถี่จากภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



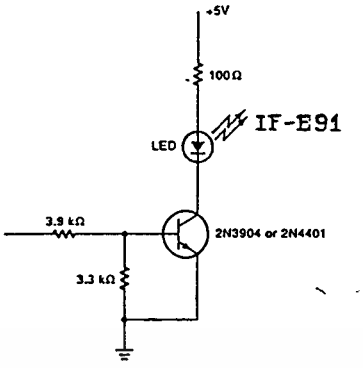
รูปที่ 5.3 แสดงวงจรมอดดูเลทแบบ FM

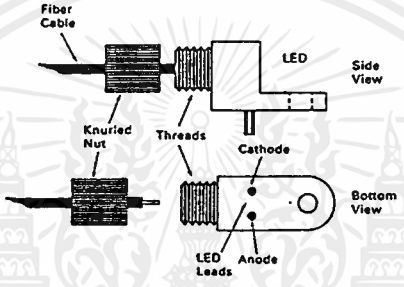
5.1.4 วงจรขับ

วงจรขับในส่วนนี้จะทำหน้าที่รับสัญญาณที่ทำการมอดดูเลททั้งแบบ AM และ FM มาแล้วมาทำการมอดดูเลทแบบอินเทนซิตี้ (Intensity modulate) คือ การเปลี่ยนแปลงสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสงที่มีขนาดความเข้มของแสงเปลี่ยนแปลงไปตามค่าแอมปลิจูด และ ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า

พิจารณาวงจรขับสัญญาณอนาล็อก เราจะประมาณกระแสในวงจรที่ต้องใช้ขับตัว LED ให้อยู่ในช่วง 20-50 mA เพราะในช่วงความสัมพันธ์นี้ระหว่างกระแสที่ขับ LED กับกำลังที่แสงที่ออกมาจาก LED เชิงมีลักษณะเป็นเชิงเส้น และทำให้ได้กำลังแสงออกมาได้มากลักษณะวงจรขับที่ใช้เป็นรูปที่ 5.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 5.4 แสดงวงจรขับ LED ที่ใช้ในโครงงาน

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

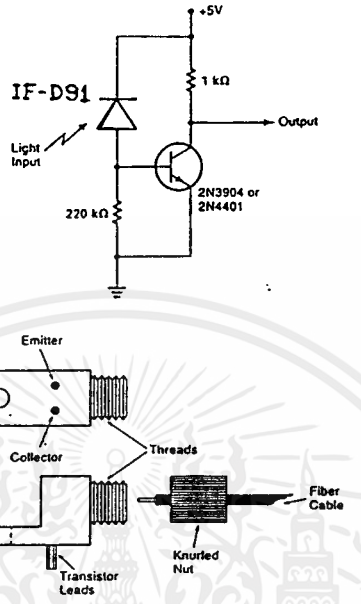
5.2 วงจรภาครับ

5.2.1 ภาครับก่อนขยาย

พิจารณาการออกแบบทางภาครับ สิ่งแรกที่ต้องคำนึงถึง คือ ระดับพลังงานต่ำสุดที่ภาครับสามารถรับได้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น คุณสมบัติของโฟโต้ไดโอด แบนด์วิดธ์ของระดับพลังงาน ในการออกแบบวงจรที่ใช้ในโครงงานนี้จะใช้โฟโต้ไดโอดซึ่งทำงานอยู่ในโหมดโฟโต้คอนดัคทีฟ (Photoconductive)คือการให้การไบอัสแบบกลับ(Reverse bias) โวลเตจกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดโอดซึ่งต้องเป็นคู่ของตัวส่งจะทำให้สามารถรับแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ วงจรที่ใช้ในโครงงานนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.5



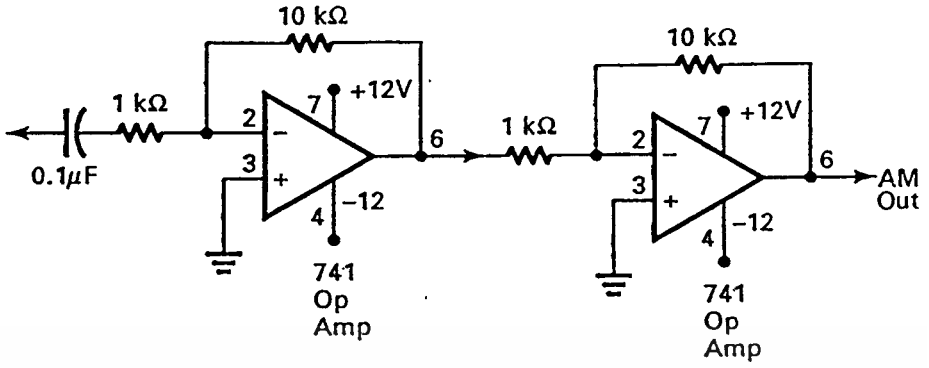
รูปที่ 5.5 แสดงวงจรก่อนภาคขยาย

โฟโต้ไดโอดที่ใช้จะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสัญญาณความเข้มของแสงที่รับได้ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งอยู่ในรูปกระแสมีค่าไม่กี่ไมโครแอมป์ ขาของขั้วอาโนดของโฟโต้ไดโอดต่อเข้ากับขาเบสของทรานซิสเตอร์ 2N3904 หรือ 2N4401 ซึ่งเป็นวงจรขยายแบบอิมิตเตอร์ร่วมให้เอาท์พุทเป็นแบบกลับเฟส เอาท์พุทจะออกจากวงจรทางขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน 220 กิโลโอห์มทำหน้าที่เป็นวงจรแบ่งแรงดันโดยอาศัยความต้านจากโฟโต้ไดโอดด้วย

5.2.2 วงจรขยาย

ในวงจรภาคก่อนขยายนั้น เราไม่สามารถทำให้อัตราขยายของวงจรสูงมากเนื่องจากวงจรส่วนแรกต้องคำนึงถึงสัญญาณรบกวน เพราะกระแสที่รับจากโฟโต้ไดโอดธรรมดาแล้วมีค่าต่ำมาก จึงต้องออกแบบวงจรขยายภาคหลังให้มีอัตราขยายสูงอยู่ในระดับที่ต้องการเพื่อจะให้วงจรในภาคถัดไป คือ ภาคดีมอดดูเลท สามารถที่จะทำการถอดความถี่หรือโวลเตทที่เข้ามาทางขาอินพุทได้ ในการออกแบบและการสร้างวงจรขยายส่วนหลัง จะประกอบด้วยมัลติสเตทซึ่งแสดงรูปที่ 5.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

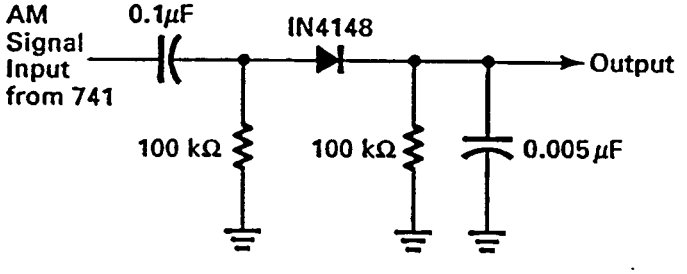


รูปที่ 5.6 วงจรขยายสัญญาณ

ภาคขยายส่วนแรกใช้ออปแอมป์เบอร์ 741 ซึ่งสามารถทำงานได้ในย่านความถี่ที่สูง ใช้ขยายได้ในช่วงกว้างๆ ลักษณะของวงจรจะต่อเป็นแบบอินเวอร์สติ้ง (Inversting) มีอัตราขยายประมาณ 10 เท่า ส่วนภาคที่สองจะเหมือนภาคแรกดังนั้นอัตราขยายที่ได้จากวงจรทำให้สัญญาณถูกขยายจากเดิม 100 เท่า

5.2.3 วงจรดีมอดดูเลทของสัญญาณ AM แบบไดโอดดีเทคเตอร์

ขบวนการดีมอดดูเลทสัญญาณ AM มีหลายวงจร ในโครงงานเราเลือกใช้ วงจรไดโอดดีเทคเตอร์ซึ่งเป็นวงจรที่นิยมและใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุด รูปแบบของวงจรแสดง 5.7 โดยไดโอด D_1 จะทำหน้าที่เป็นเร็คติไฟร์เพื่อทำให้สัญญาณ AM เป็นแบบครึ่งคลื่นของสัญญาณ AM และตัวเก็บประจุต่อคร่อมโหลด R_2 ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำเพื่อกรองความคลื่นพาห์ออกไปเหลือแต่สัญญาณข้อมูลอย่างเดียวออกเป็นเอาท์พุท ค่าของตัวเก็บประจุ C_2 จะต้องมีค่ามากเพียงพอสำหรับกรองคลื่นพาห์ออก แต่ถ้าใหญ่มากไปก็จะมีผลต่อสัญญาณข้อมูล



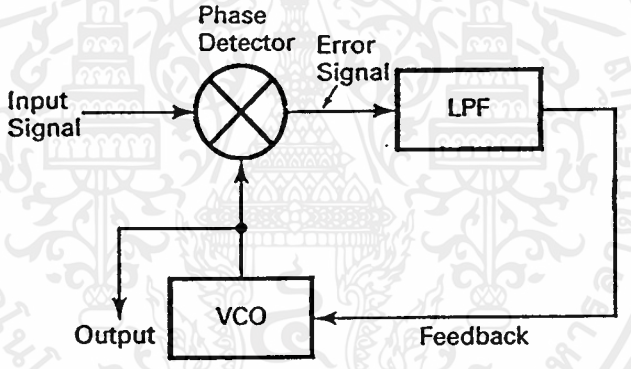
รูปที่ 5.7 แสดงวงจรดีมอดดูเลทแบบ AM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.7 แสดงวงจรดีมอดดูเลทแบบ AM

5.2.4 วงจรดีมอดดูเลทของสัญญาณ FM แบบ PLL

ในวงจรส่วนนี้จะทำหน้าที่ดีมอดดูเลทสัญญาณ FM (Frequency Modulation) ที่ถูกขยายมาแล้วจากภาคขยาย สัญญาณที่ผ่านการดีมอดดูเลทเรียบร้อยแล้วจะได้สัญญาณออกมาในรูปของสัญญาณอนาล็อกที่มีความถี่รูปร่างเหมือนในภาคส่ง ในวงจรนี้จะใช้ไอซีเฟสล็อคลูป LM 565 ไอซีสำเร็จรูปเป็นตัวมอดดูเลทสัญญาณ ซึ่งหลักการเบื้องต้นและส่วนประกอบของเฟสล็อคลูปได้กล่าวแล้วในบทที่ 2 ในเรื่องการดีมอดดูเลทสัญญาณ อย่างไรก็ดีการทำงานเบื้องต้นสามารถอธิบายได้ดังนี้โดยดูจากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 5.8

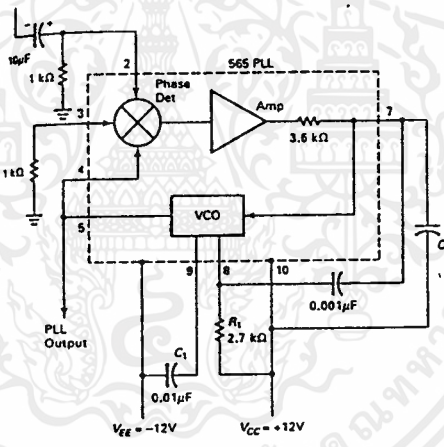


รูปที่ 5.8 แสดงบล็อคไดอะแกรมของเฟสล็อคลูป

ขณะที่ยังไม่มีสัญญาณเข้ามาในระบบแรงดันควบคุม Vd (t) จะเท่ากับศูนย์ VCO จะทำงานโดยการตั้งความถี่ไว้ที่ f_0 ซึ่งเรียกว่า Free-running frequency ถ้ามีสัญญาณเข้าไปในระบบ Phase detector จะทำการเปรียบเทียบเฟสและสัญญาณความถี่ของอินพุทกับ VCO และผลิตแรงดันคลาดเคลื่อน Ve (t) ซึ่งสัมพันธ์กับความแตกต่างของเฟสและความถี่ของสัญญาณทั้งสอง แรงดันคลาดเคลื่อนนี้จะถูกกรองและขยายส่งไปควบคุม VCO ในกรณีนี้แรงดันควบคุม V_d (t) จะไปบังคับความถี่ VCO ให้เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ลดความถี่ที่แตกต่างกันระหว่าง f_0 กับสัญญาณที่เข้ามา ถ้าความถี่สัญญาณที่เข้ามาใกล้เคียงกับ f_0 จากการป้อนกลับของ PLLทำให้ PLL ซิงโครไนซ์ หรือ ล็อคกับสัญญาณที่เข้ามา ขณะที่ทำการล็อคความถี่นั้น VCO จะเท่ากับสัญญาณอินพุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เฟสยังต่างกันอยู่ ความแตกต่างของเฟสมีความจำเป็นต่อการผลิตแรงดันคลาดเคลื่อนที่จะคอยไปปรับความถี่ VCO จาก Free-running ให้เท่ากับความถี่ที่เข้ามา fs ดังนั้น PLL จะยังคงรักษาสภาพการล็อค การที่ระบบสามารถที่จะปรับตัวเองได้ทำให้ PLL สามารถติดตามความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปของสัญญาณที่เข้ามาให้อยู่ในสภาพล็อคเช่นเดิม ช่วงความถี่ซึ่ง PLL สามารถติดตามการล็อคกับสัญญาณที่เข้ามาเรียกว่า Lock range ค่าของมันจะขึ้นอยู่กับแรงดันคลาดเคลื่อนโดยจะไม่ขึ้นกับทางฟิลล์เตอร์ ช่วงความถี่จะมากกว่าช่วงความถี่ที่ PLL สามารถทำการล็อคอย่างแท้จริงกับสัญญาณอินพุท ช่วงความถี่หลังนี้เรียกว่า " Capture range" ของระบบ ช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับฟิลเตอร์และเกนของระบบ (Closed loop gain)โดยมีผลเกี่ยวข้องกับ Selectivity ของวงจร PLL และยังช่วยเพิ่มความปลอดภัยเกี่ยวกับสัญญาณทางด้าน Outband single ที่จะมารบกวนได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 5.9 แสดงวงจรดีมอดดูเลทสัญญาณ FM

โดยที่ในรูปที่ 5.9 เป็นวงจรที่ใช้ในโครงงานนี้ สัญญาณเอาท์พุทจากวงจรขยายจะถูกนำมาป้อนเข้ามาทางขา 2 ของ LM 565 สัญญาณที่ถูกดีมอดดูเลทออกมาแล้วจะออกมาทางขา 7 ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ ที่มีความถี่คัทออฟ 50 กิโลเฮิร์ท สัญญาณที่ได้มาจะเป็นสัญญาณเดิมที่ยังไม่ได้ถูกมอดดูเลท วงจรเฟสล็อคลูปที่ใช้ เราสามารถกำหนดความถี่กลางที่ใช้ (center frequency) ที่ใช้ในวงจรได้ซึ่งได้จากสมการที่กำกับมาให้ในแผ่นรายละเอียดข้อมูล

$$f_0 = 1.2 / (4*R_1*C_1) \quad \text{.....(2)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ f_0 คือ ความถี่ของ VCO โดยไม่สัญญาณเข้ามา

C_1 คือ ตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่กับขา 9 และไฟลบ

R_1 คือ ตัวต้านทานที่ต่ออยู่กับขา 7 กับขาลบ

เลือกใช้ C_1 เท่ากับ 0.001 ไมโครฟารัด และ ความต้านทาน R_1 เท่ากับ 10 กิโลโอห์ม ค่าช่วงการล็อค (Lock range) สามารถคำนวณได้จาก สมการ

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

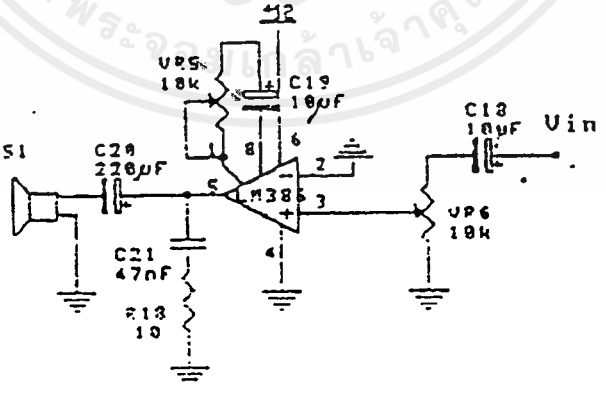
และช่วงความถี่ที่เริ่มจะล็อคหรือแคปเจอร์เรนจ์ Capture range โดยก่อนหน้านั้นยังไม่เกิดการล็อค จะคำนวณได้จาก

$$f_0 = (1/2\ \ ) * [\ (2\ f_L)/T\ ] \quad \text{.....(4)}$$

โดยที่ T ค่าคงที่ทางเวลาที่ขา 7

5.2.5 วงจรทางภาคขยายเสียง

ในที่นี้ใช้ ไอซี เบอร์ LM 386 ลักษณะการต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 5.10 วงจรขยายเสียงนี้สามารถปรับอัตราการขยายได้ตั้งแต่ 20 -200 เท่า



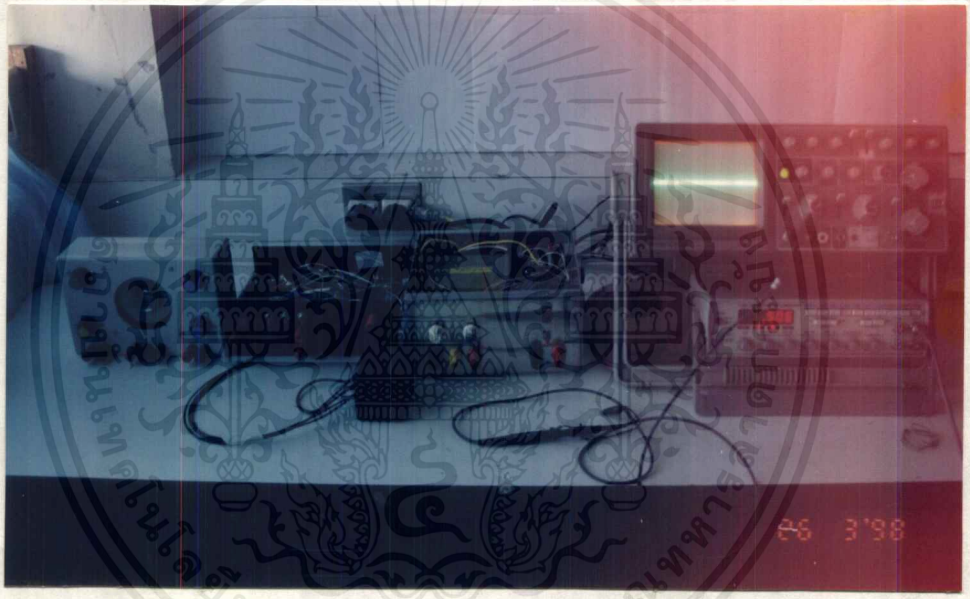
รูปที่ 5.10 แสดงวงจรภาคขยายเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การดำเนินการและผลการดำเนินการ

ในบทที่ 6 นี้จะกล่าวถึงการทดสอบการทำงานของวงจรทางภาคส่งและวงจรทางภาครับ ซึ่งประกอบด้วยวงจรดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 5 โดยทำการทดลองต่ออุปกรณ์ทั้งภาคส่งและภาครับเข้ากันกับเส้นใยนำแสง



รูปที่ 6.1 แสดงการจัดอุปกรณ์ทั้งหมดรวมไว้ด้วยกัน

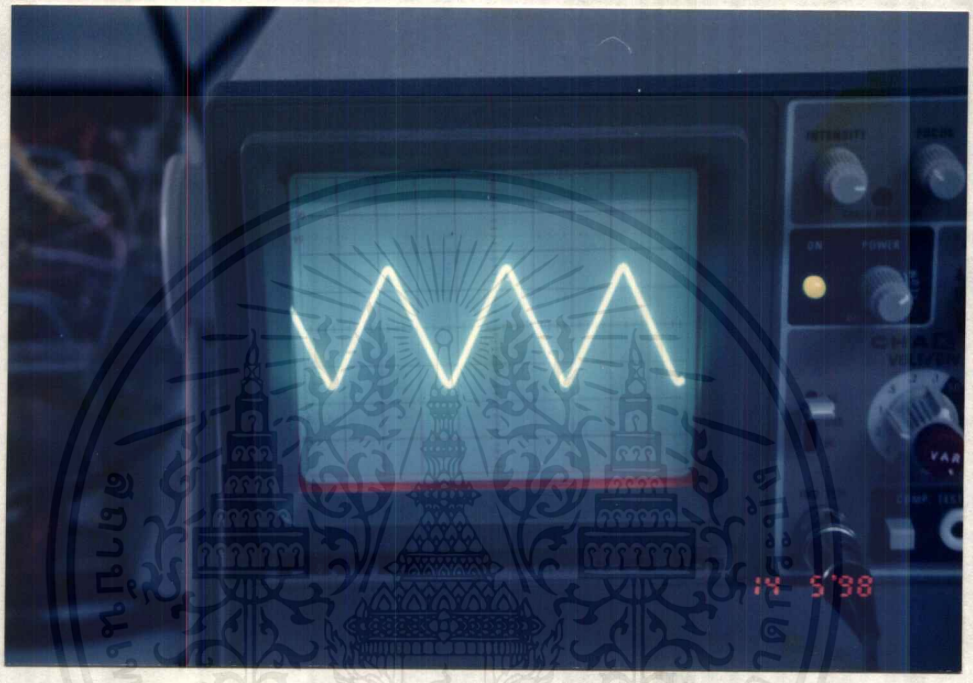
6.1 วงจรทางภาคส่ง

6.1.1 ผลการทดลองของแหล่งกำเนิด AM และ FM

เมื่อต่ออุปกรณ์ทั้งหมดดังรูปที่ 6.1 เข้าด้วยกันแล้วทำการทดสอบวงจรในส่วนของวงจรมอดดูเลท ซึ่งมีทั้งการมอดดูเลทแบบ AM และ FM ซึ่งใช้สัญญาณอินพุทจากภายนอก ดังนั้นค่าความถี่กลางที่ออกจาก XR-2206 เป็นความถี่พาห์ซึ่งทำได้โดยการปรับค่าความถี่จากตัวต้านทานปรับค่าได้ 100 kΩ จากนั้นทำการหาค่าความถี่พาห์ที่ต้องการที่ขา 2 ของ XR-2206 โดยยังไม่ให้อินพุทเข้าไป โดยเลือกให้ความถี่กลางเป็น 30 kHz ซึ่งหาได้จากการทดลองการเปลี่ยนแปลงของ Control Voltage ที่ขา 7 ซึ่งเป็นการปรับค่าตัวต้านทานปรับค่าได้ 100 kΩ ซึ่งจากการทดสอบพบว่าเมื่อ Control Voltage มีค่ามากขึ้นจะทำ ให้ความถี่ที่ออกมาจาก VCO มีค่าน้อยลง และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

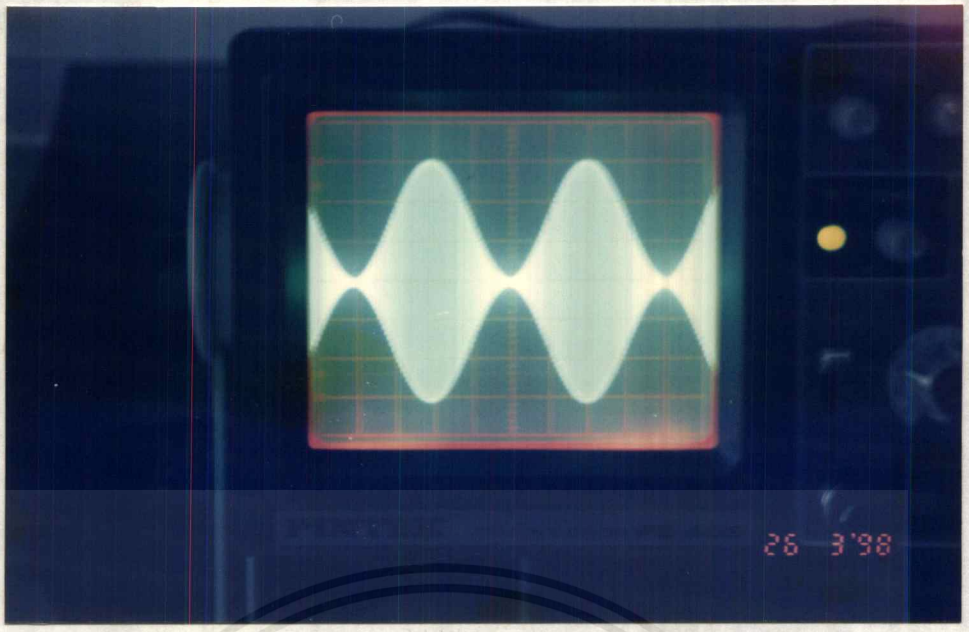
เมื่อ control Voltage มีค่าน้อยลงจะทำให้ความถี่ที่ออกมาสูงขึ้น ซึ่งสามารถวัดความถี่ที่ออกมาและรูปคลื่นโดยใช้ใช้ออสซิลโลสโคปตรวจดู ซึ่งแสดงดังรูปที่6.2 โดยค่าความถี่คลื่นพาห์ที่ออกมามีแอมปลิจูดประมาณ 3-7 V_{p-p} ซึ่งใช้เป็นคลื่นพาห์ทั้งแบบ AM และ FM



รูปที่ 6.2 แสดงลักษณะรูปคลื่นของคลื่นพาห์ที่ 30 kHz.ขณะที่ยังไม่มีสัญญาณอินพุทเข้ามา

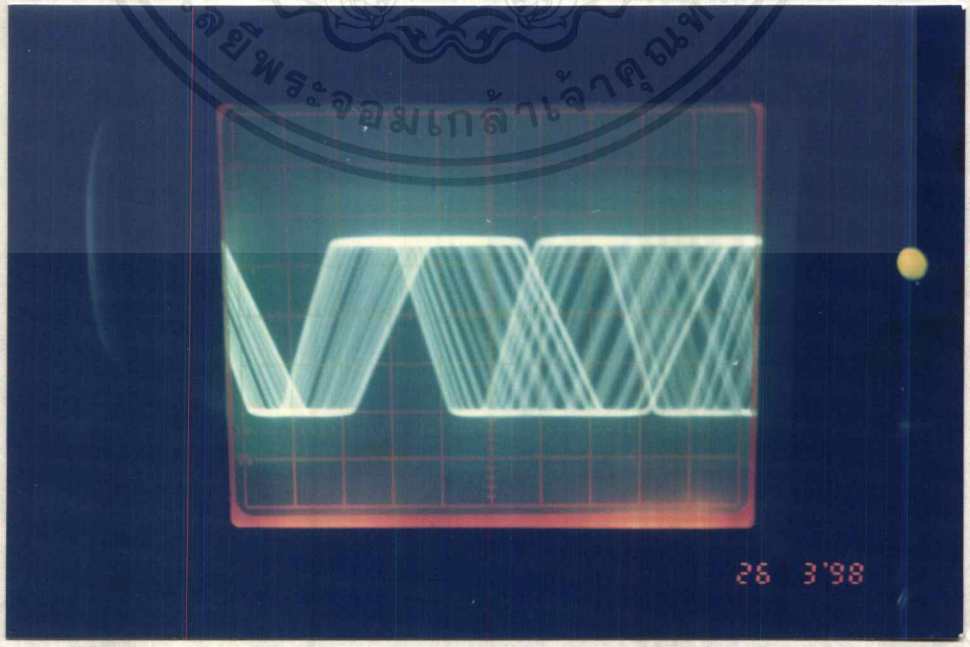
เมื่อทำการทดสอบโดยการป้อนอินพุทจากภายนอกเข้าในวงจรแหล่งกำเนิด AM โดยใช้ความถี่ที่เป็นความถี่ที่ไม่เกินความถี่เสียงมนุษย์ ในที่นี้เลือกทำการทดลองโดยใช้ความถี่อินพุทเท่ากับ 200-5000 Hz. แอมปลิจูดของอินพุทนั้นไม่เกินแอมปลิจูดของคลื่นพาห์เพื่อไม่ให้เกิดการโอเวอร์มอดดูเลท (overmodulated) ซึ่งเปอร์เซ็นต์การมอดดูเลทของสัญญาณ AM นั้นหาตามขนาดของ V_{max} และ V_{min} ซึ่งจากรูป 6.3 เป็นสัญญาณ AM ที่สร้างจากการใช้ความถี่อินพุทที่ 500 Hz. แอมปลิจูด 6.0 volts และค่าเปอร์เซ็นต์การมอดดูเลทมีค่าเท่ากับ 93.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 แสดงลักษณะสัญญาณ AM ที่ความถี่อินพุท 500 Hz. แอมปลิจูด 6.0 volts เปอร์เซ็นต์การมอดดูเลทเป็น 93.5

สัญญาณ FM ที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็นพื้นฐานการสร้าง FM เท่านั้น ซึ่งอาศัยคลื่นพาห์จาก XR-2206 โดยเลือกใช้ที่ค่าความถี่เท่ากับ 30 kHz. อินพุทจากภายนอกไม่เกินความถี่ของเสียงมนุษย์ ซึ่งจากรูป 6.4 เป็นสัญญาณ FM ที่สร้างจากการใช้ความถี่อินพุท 500 Hz. โดยค่าแอมปลิจูดของสัญญาณ FM เท่ากับคลื่นพาห์คือ 7.0 V_{p-p} การเปลี่ยนแปลงแอมปลิจูดของสัญญาณข้อมูลทำให้สัญญาณ FM เปลี่ยนไป

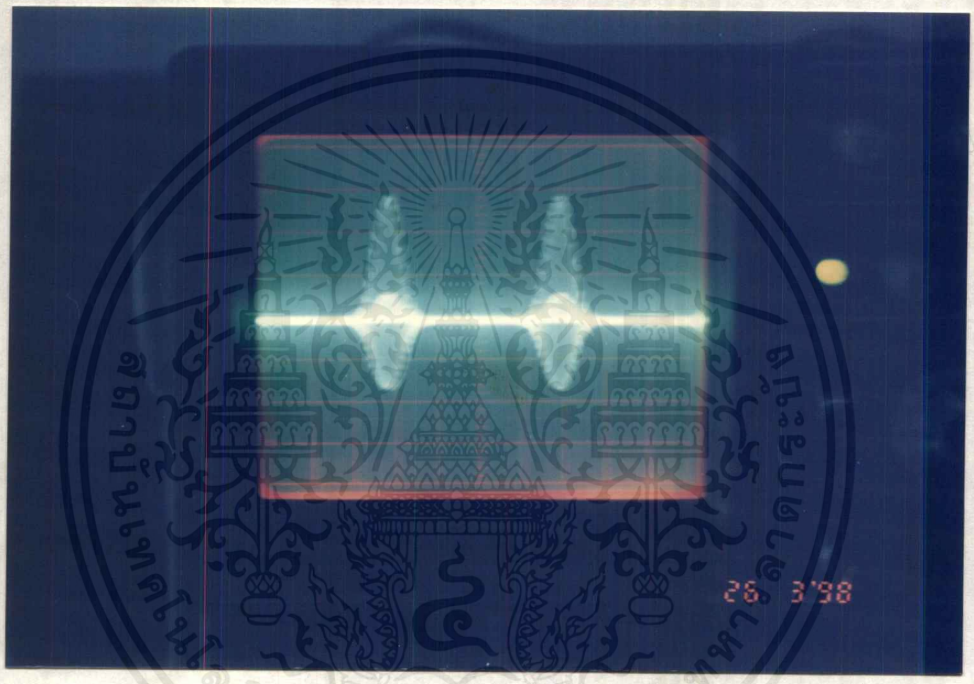


รูปที่ 6.4 แสดงลักษณะสัญญาณ FM ที่ความถี่อินพุท 500 Hz. แอมปลิจูด 7.0 Volts

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

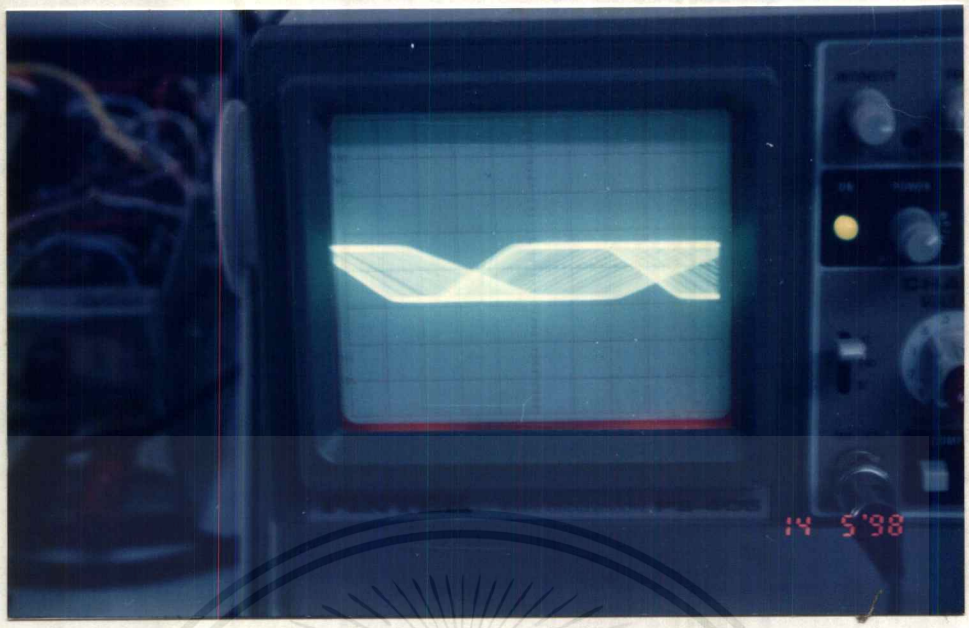
6.1.2 ผลการทดลองของวงจรส่งและFM

ลักษณะสัญญาณทั้ง AM และ FM ที่ผ่านวงจรขับออกสู่ขาอาโนดของ LED ที่ใช้ในการส่งเป็นดังรูปที่ 6.5 และ 6.6 การลดทอนของสัญญาณเกิดจากการลดทอนสัญญาณจากวงจรขับที่ต่อกับวงจรแหล่งกำเนิด AM และ FM และเส้นใยนำแสง



รูปที่ 6.5 แสดงสัญญาณ AM ที่ออกจาก LED ก่อนเข้าเส้นใยนำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

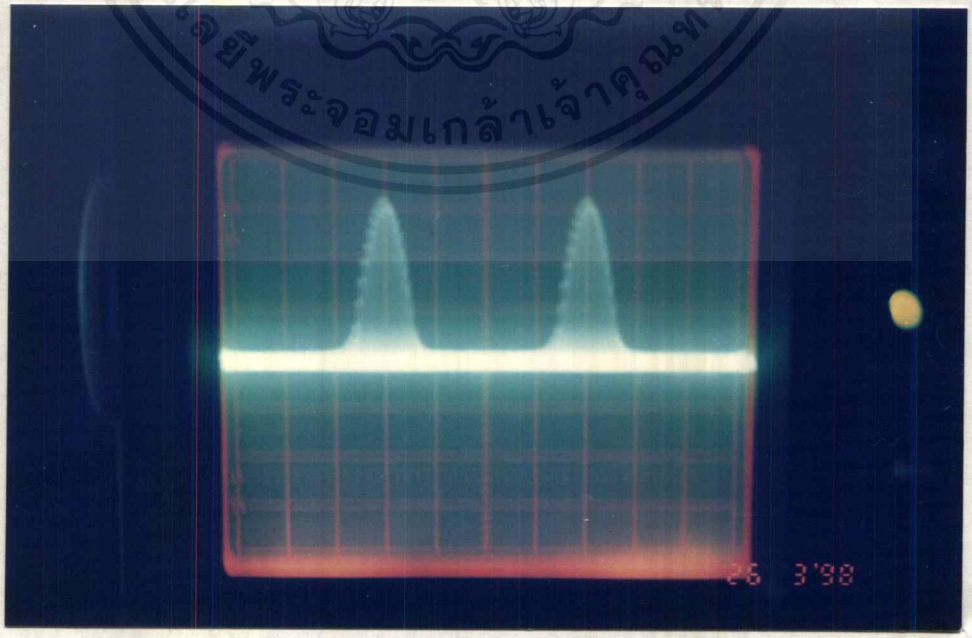


รูปที่ 6.6 แสดงสัญญาณ FM ที่ออกจาก LED ก่อนเข้าเส้นใยนำแสง

6.2 วงจรทางภาครับ

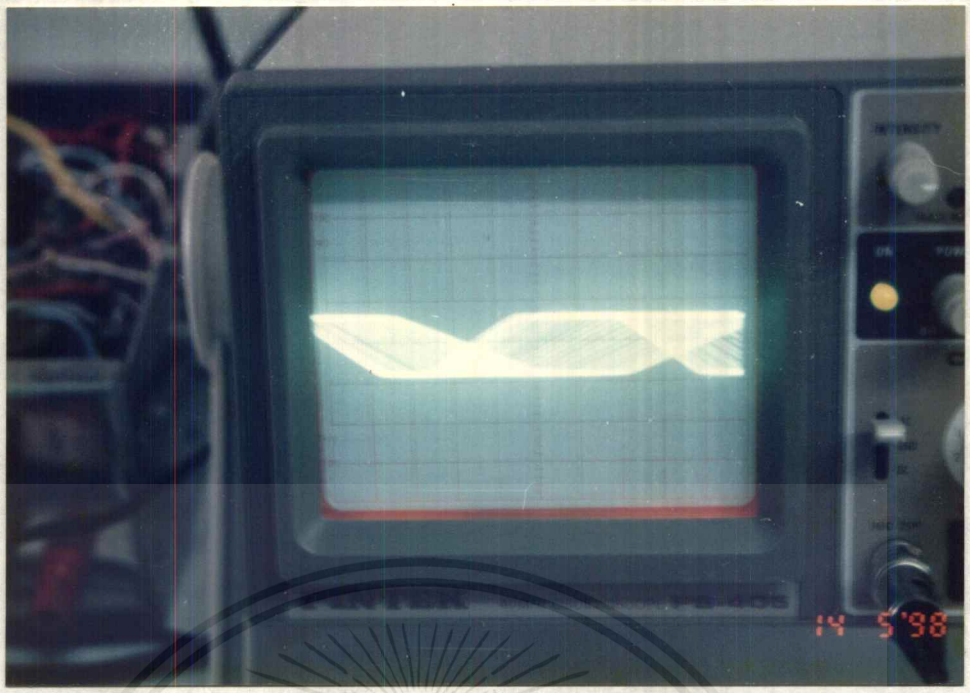
6.2.1 ผลการทดลองของวงจรรับ

หลังจากแสงผ่านเส้นใยนำแสงมาแล้ว วงจรรับจะรับแสงและทำการเปลี่ยนแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเหมือนเดิม ซึ่งสัญญาณจะถูกขยายน้อยมาก เนื่องจากกระแสของโฟโต้ไดโอดมีค่าต่ำมากตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ลักษณะของสัญญาณที่รับจากเส้นใยนำแสงคือรูปที่ 6.7 และ 6.8



รูปที่ 6.7 แสดงสัญญาณ AM ที่รับจากวงจรรับ

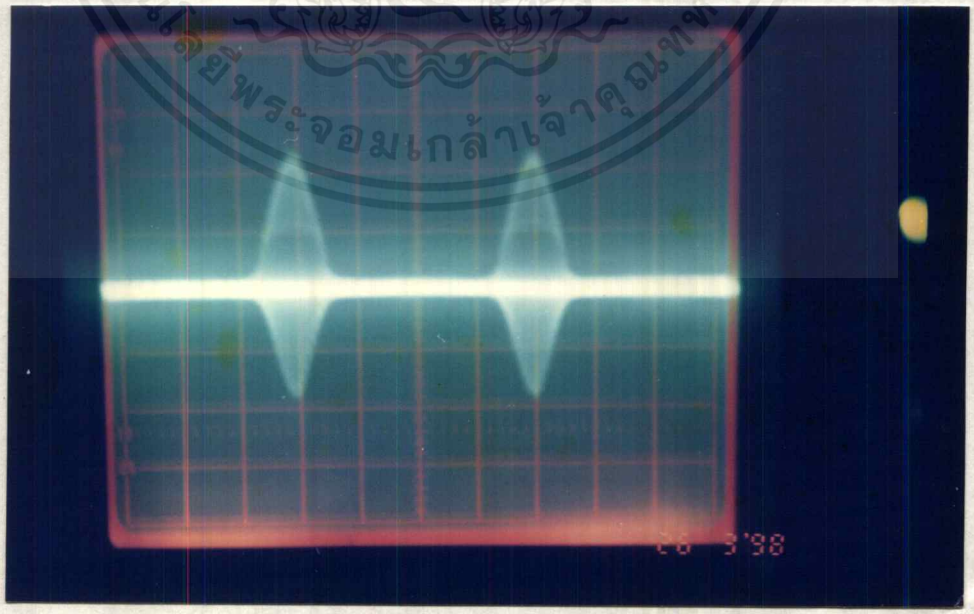
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.8 แสดงสัญญาณ FM ที่รับจากวงจรรับ

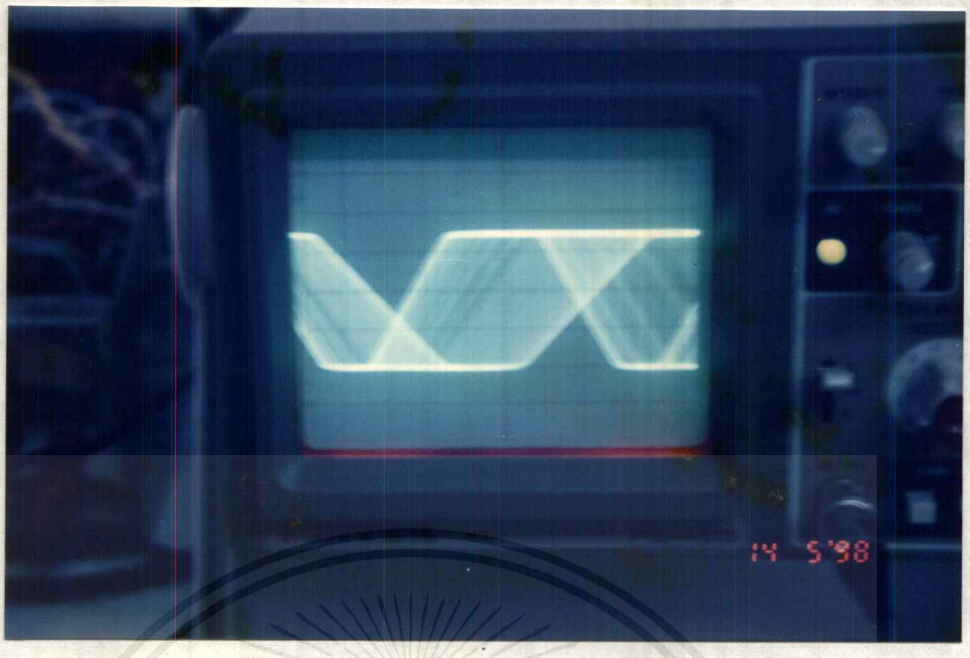
6.2.2 ผลการทำงานทางวงจรขยาย

หลังจากสัญญาณดังกล่าวผ่านวงจรขยายซึ่งมีอัตราขยายประมาณ 100 เท่า ทำให้สัญญาณที่รับได้มีแอมปลิจูดเพิ่มขึ้น เพื่อทำให้มีค่าเพียงพอกับวงจรภาคถัดไปคือวงจรดีมอดดูเลท โดยที่สัญญาณ AM มีแอมปลิจูดเพิ่มเป็น ??? V_{pp} และสัญญาณ FM มีแอมปลิจูดเพิ่มเป็น ??? V_{pp} ดังรูป 6.9 และ 6.10



รูปที่ 6.9แสดงลักษณะสัญญาณ AM ที่ถูกขยายขึ้น

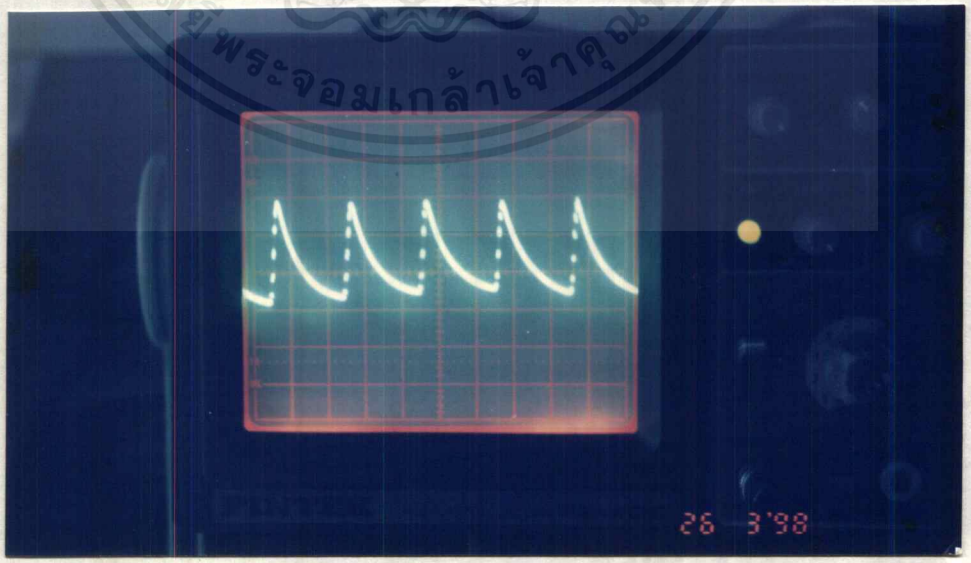
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.10 แสดงลักษณะสัญญาณ FM ที่ถูกขยายขึ้น

6.2.3 ผลการทำงานของวงจรดีมอดดูเลท

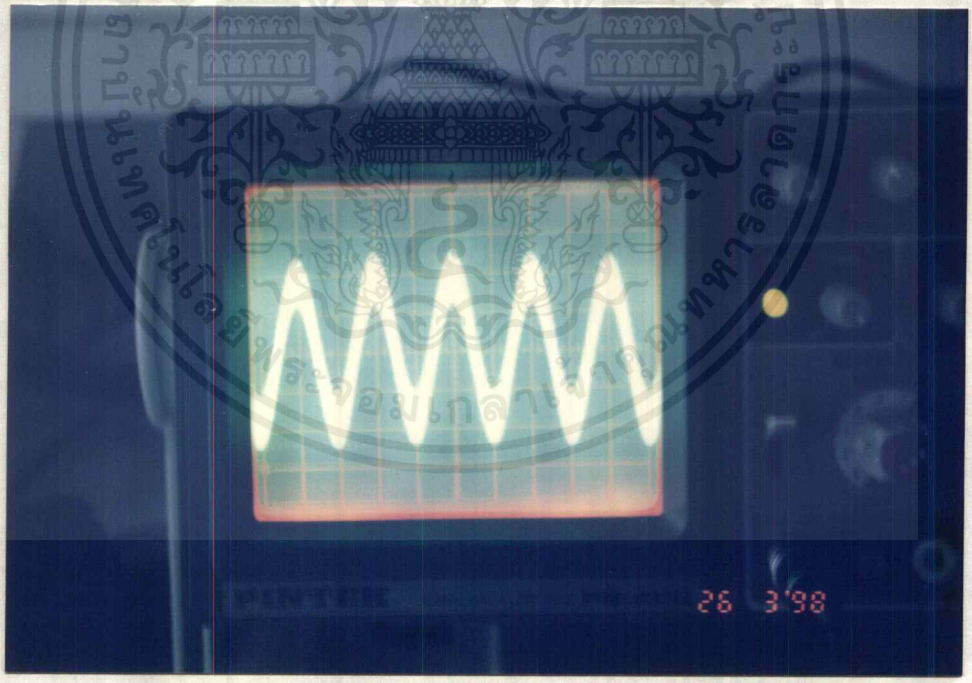
สัญญาณมอดดูเลททางขนาดหรือ AM มาจากเอาท์พุทของวงจรขยายจะถูกนำเข้าวงจรดีมอดดูเลท โดยใช้วงจรไดโอดดีเทคเตอร์เป็นตัวดีมอดดูเลทสัญญาณ ความถี่สัญญาณรูปไซน์ที่ผสมมากับคลื่นพาห์ 30 kHz. โดยสัญญาณข้อมูลที่ถูกมอดดูเลทแบบ AM จะมีลักษณะดังรูป ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์การมอดดูเลทยิ่งมากจะทำให้สัญญาณเอาท์พุทออกมามีขนาดแอมปลิจูดมากตามไปด้วย แต่ไม่เกินแอมปลิจูดของคลื่นพาห์ รูปที่ 6.12 แสดงเอาท์พุทของไดโอดดีเทคเตอร์



รูปที่ 6.12 แสดงลักษณะสัญญาณข้อมูลที่ได้จากการใช้ไดโอดดีเทคเตอร์ดีมอดดูเลทสัญญาณ AM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณมอดดูเลททางความถี่ที่ออกมาจากเอาท์พุทของวงจรขยายจะถูกนำเข้าวงจรดีมอดดูเลท โดยใช้เฟสล็อคลูปเป็นตัวดีมอดดูเลทความถี่สัญญาณรูปไซน์ที่ผสมมากับสัญญาณคลื่นพาห์ 30 kHz. เหมือนกัน ซึ่งจากวงจรเราสามารถทำการปรับความถี่ของเฟสล็อคลูปให้ไปล็อคสัญญาณมอดดูเลททางความถี่ที่เข้ามาทางขาอินพุท โดยการใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุดังที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งจะทำให้สัญญาณออกมามีลักษณะเหมือนสัญญาณทางอินพุทของวงจรส่ง ซึ่งก็คือสัญญาณที่มีความถี่ ??? Hz. จากนั้นหากต้องการขยายก็เข้าวงจรตามจุดประสงค์ที่ต้องการ โดยรูปที่ 6.13 แสดงรูปคลื่นไซน์ที่ออกมาจากเอาท์พุทของดีมอดดูเลทซึ่งเป็นแบบเฟสล็อคลูป



รูปที่ 6.13 แสดงลักษณะสัญญาณข้อมูลที่ได้จากการใช้เฟสล็อคลูปดีมอดดูเลทสัญญาณ FM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 เป็นการเก็บข้อมูลของสัญญาณ AM และ FM ที่ความถี่ต่างๆ และแอมปลิจูด ต่างๆ โดยยังไม่มีการเชื่อมต่อด้วยเส้นใยนำแสง

ตารางที่ 6.2 เป็นการเก็บข้อมูลสัญญาณ AM และ FM ที่ความถี่ต่างๆซึ่งใช้การเชื่อมต่อทางเส้นใยนำแสงเป็นการส่งสัญญาณทั้งสอง ซึ่งค่าเอาท์พุทที่ได้เป็นดังตารางและค่าคลาดเคลื่อนเป็นไปตามตาราง

ดังนั้นจะเห็นว่าการเชื่อมต่อทางเส้นใยนำแสงจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการเชื่อมต่อด้วยเส้นลวดทองแดงธรรมดา เนื่องจากค่าคลาดเคลื่อนที่อ่านได้จากตารางมีค่าน้อยกว่าแบบในตารางที่6.2

ในการหาค่าผิดพลาดเราสามารถหาได้จากสูตร

$$\frac{|\text{ค่ามาตรฐาน} - \text{ค่าที่ได้}|}{|\text{ค่ามาตรฐาน}|} * 100 = \text{ค่าผิดพลาด } \%$$

$$\text{ค่าผิดพลาดเฉลี่ย} = (\Sigma x_i / n) \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 แสดงค่าเอาท์พุทที่ได้จากการส่งสัญญาณโดยผ่านสายลวดทองแดง

ก). สัญญาณ AM โดยที่ ความถี่คลื่นพาห์คงที่ (fc) เปอร์เซ็นต์การมอดดูเลทคงที่ (m) = 93.5 แต่สัญญาณข้อมูลเปลี่ยนไป

ลำดับที่	ความถี่อินพุท (Hz)	ผลการทดลอง(Hz)	ค่าคลาดเคลื่อน(%)
1	307	303	1.302
2	242	241	0.413
3	140	139	0.714
4	184	185	0.543
5	217	217	0.0
6	270	270	0.0
7	357	357	0.0
8	430	428	0.465
9	105	102	2.857
10	152	153	0.657
11	227	222	2.202
12	248	244	1.612
13	354	357	0.847
14	426	416	2.347
15	491	490	0.203
16	599	588	1.836
17	748	741	0.935
18	165	161	2.424
19	197	196	0.507
20	231	227	1.731
21	303	303	0.0
22	331	333	0.604
23	359	357	0.557
24	389	384	1.285
25	483	476	1.499
เฉลี่ย			0.967

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข). สัญญาณ FM โดยที่ความถี่คลื่นพาห์คงที่ สัญญาณข้อมูลเปลี่ยนแปลง

ลำดับที่	ความถี่อินพุท (Hz)	ผลจากการอ่าน (Hz)	ค่าคลาดเคลื่อน(%)
1	331	333	0.604
2	204	200	1.960
3	183	182	0.546
4	106	104	1.886
5	238	238	0
6	278	275	1.079
7	302	303	0.33i
8	328	323	1.524
9	377	377	0
10	448	444	0.893
11	406	400	1.478
12	493	488	1.015
13	508	555	0.538
14	614	625	1.791
15	652	625	4.141
16	731	714	2.325
17	164	161	1.829
18	193	192	0.518
19	226	227	0.442
20	235	233	0.851
21	286	278	2.797
22	346	347	0.289
23	421	417	0.950
24	503	500	0.596
25	590	588	0.338
เฉลี่ย			1.123

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างความถี่เสียงที่ทุกบความถี่เอาท์พุทของการส่งสัญญาณ FM ผ่านสายลวดทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 แสดงค่าเอาท์พุทที่ได้จากการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสง

ก). สัญญาณ AM โดยที่ ความถี่คลื่นพาห์คงที่ (fc) เปอร์เซ็นต์การมอดดูเลทคงที่ (m) = 93.5 แต่สัญญาณข้อมูลเปลี่ยนไป

ลำดับที่	ความถี่อินพุท(Hz)	ผลจากการทดลอง (Hz)	ค่าคลาดเคลื่อน(%)
1	141	141	0.0
2	202	204	0.99
3	214	213	0.467
4	239	238	0.418
5	263	263	0.0
6	301	303	0.664
7	330	333	0.909
8	372	370	0.537
9	409	400	2.200
10	499	500	0.200
11	587	588	0.170
12	663	663	0.0
13	802	802	0.0
14	305	303	0.656
15	344	345	0.290
16	376	377	0.265
17	418	417	0.239
18	435	435	0.0
19	508	507	0.196
20	607	606	0.165
21	251	250	0.398
22	284	286	0.704
23	369	364	1.355
24	391	385	1.534
25	471	476	1.061
เฉลี่ย			0.615

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข). สัญญาณ FM โดยที่ความถี่คลื่นพาห์คงที่ สัญญาณข้อมูลเปลี่ยนแปลง

ลำดับที่	ความถี่อินพุท(Hz)	ผลการทดลอง(Hz)	ค่าคลาดเคลื่อน(%)
1	731	725	0.820
2	189	189	0.0
3	231	228	1.298
4	303	304	0.330
5	349	345	1.146
6	386	385	0.259
7	433	433	0.0
8	413	412	0.242
9	443	444	0.226
10	480	478	0.416
11	504	500	0.793
12	534	534	0.0
13	558	556	0.358
14	589	588	0.169
15	623	625	0.321
16	694	704	1.440
17	768	769	0.130
18	827	830	0.362
19	890	889	0.112
20	198	196	1.010
21	203	202	0.492
22	292	292	0.0
23	335	332	0.895
24	375	370	1.333
25	417	417	0.0
เฉลี่ย			0.496

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

หลักการสื่อสารทางเดียวด้วยเส้นใยนำแสงที่ทำขึ้นมาในโครงงานนี้ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการสื่อสาร ซึ่งใช้สัญญาณเสียงเป็นข่าวสารข้อมูล และทำการมอดดูเลทแบบ Amplitude Modulation และ Frequency Modulation สัญญาณที่ผ่านการมอดดูเลทแล้วจะถูกนำไปขับ LED โดยมีเส้นใยนำแสงเป็นตัวกลางในการนำพาหะข้อมูล โดยวงจรที่ใช้นี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ

7.1 วงจรภาคส่ง

จะทำการแปลงเสียงเป็นสัญญาณไฟฟ้า และทำการขยายสัญญาณอีกระดับ วงจรภาคถัดไปคือภาคมอดดูเลทสามารถทำการมอดดูเลทสัญญาณได้ แต่จะต้องไม่เกินระดับที่จะทำให้เกิดการโอเวอร์มอดดูเลท (Overmodulate) ในส่วนนี้จะใช้ VCO (Voltage Control Oscillator) เป็นตัวผสมสัญญาณเสียงเข้ากับความถี่พาหะโดยเลือกใช้อยู่ในช่วง 30 kHz. (ไม่จำเป็นเสมอไปค่าความถี่คลื่นพาห์ในสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่ 0.01Hz - 1MHz ตามคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดคลื่นพาห์) สัญญาณที่ได้ออกมาจะเป็นแบบ Frequency Modulation จากนั้นสัญญาณทั้ง 2 สัญญาณที่ทำการมอดดูเลทแล้วจะนำไปขับ LED เพื่อแปลงเป็นสัญญาณแสง และนำเข้าสู่เส้นใยนำแสง

7.2 วงจรภาครับ

แสงที่ออกมาจากเส้นใยนำแสงจะตกกระทบกับโฟโต้ไดโอด ซึ่งโฟโต้ไดโอดจะแปลงสัญญาณแสงเป็นกระแสซึ่งมีค่าไม่กี่ไมโครแอมป์ จากนั้นกระแสจะถูกแปลงให้เป็นโวลเตจโดยวงจรภาคก่อนขยาย และนำโวลเตจที่ได้ไปขยายอีกครั้งโดยวงจรขยาย สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากเอาท์พุทของวงจรขยายนั้น จะมีลักษณะเหมือนเดิมกับสัญญาณมอดดูเลททางความถี่ในวงจรภาคส่ง จากนั้นนำมาทำดีมอดดูเลท ซึ่งในที่นี้ใช้เฟสล็อคลูปเป็นตัวดีมอดดูเลท เอาท์พุทที่ได้ออกมาจากเฟสล็อคลูป จะนำไปขยายอีกครั้งโดยวงจรขยาย และนำไปขับลำโพงซึ่งจะได้เสียงออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองและผลการทดลองที่ได้รับนั้นเป็นที่น่าพอใจอยู่ในขั้นดี แต่ก็ยังมีข้อบกพร่องอยู่บางประการ เนื่องจากการออกแบบวงจร การเลือกใช้อุปกรณ์ยังไม่ดีพอ หรือการใช้ความถี่ที่เข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งเป็นคลื่นพาหะที่มีค่าประมาณ 30 kHz. ซึ่งเป็นความถี่ที่อาจจะมีค่าต่ำไปสำหรับแหล่งกำเนิดคลื่นพาห์โดยบางครั้งอาจทำให้เกิด Noise ทางด้านวงจรส่งเข้าไปในไฟเลี้ยง ซึ่งจะทำให้สัญญาณเสียงที่ได้ออกมาจะมีเสียงซ่าบ้างเล็กน้อย จึงต้องทำการกำจัดสัญญาณรบกวน

สำหรับแนวทางการแก้ไขปัญหา ก็คือ ที่วงจรส่งแสงนั้นเลือกใช้ทรานซิสเตอร์โดยต้องตั้งจุดทำงานไว้ที่จุดหนึ่งเพื่อไม่ให้รับสัญญาณอินพุทโดยตรงโดยอาจจะเลือกใช้แบบคลาสเอหรือคลาสบีแล้วแต่ความเหมาะสม เลือกช่วงความถี่คลื่นพาห์ให้เหมาะสมตามสัญญาณข้อมูลทั้งแบบ AM และ FM ในส่วนวงจรภาครับเพื่อทำให้สัญญาณที่ถูกดีมอดดูเลทเป็นสัญญาณข้อมูลเดิมที่ดีขึ้นควรเปลี่ยนตัวเก็บประจุให้มีค่ามากหรือน้อยตามค่าที่เพียงพอสำหรับการกรองคลื่นพาห์ออก และอาจจะเพิ่มวงจร Band Pass Filter เข้าไปในส่วนวงจรภาครับเพื่อกรองเอาเฉพาะย่านความถี่ที่ต้องการ และลดสัญญาณรบกวน หรือสัญญาณที่มีความถี่นอกเหนือไปจากย่านความถี่ที่ต้องการ หรืออาจจะเปลี่ยนเป็นใช้การส่งแบบดิจิตอลหรือแบบ Pulse Code Modulation (PCM) ซึ่งการส่งแบบ PCM นี้เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการสื่อสารโทรศัพท์ทั่วๆไป วิธีนี้มีข้อดีคือ สามารถลดสัญญาณรบกวนของระบบลงไปได้มาก คุณภาพสัญญาณที่ได้กลับคืนมาดีและมีอัตราการส่งข้อมูลที่ไม่สูงมากนัก

จากการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองแสดงว่าระบบการทำงานของโครงงานนั้นเชื่อถือได้และเป็นไปตามทฤษฎีของ Analog Modulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

National Semiconductor

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 ($A_{VMIN} = 5$)

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

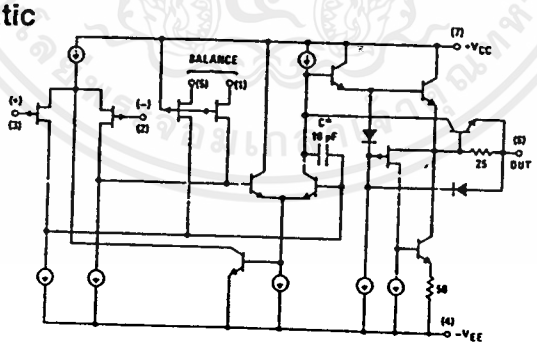
(LF155A, LF156A, LF157A)

- 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 µV/°C
- Low input noise current: 0.01 pA/$\sqrt{Hz}$
- 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/µs
■ Wide gain bandwidth	2.5	5	20	MHz
■ Low input noise voltage	20	12	12	nV/$\sqrt{Hz}$

Simplified Schematic



*3 pF in LF157 series.

TL/H/5646–1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings

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

(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°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			670 mW	670 mW
J-Package		1260 mW	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			130°C/W	130°C/W
J-Package		100°C/W	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 kΩ)	1200V	1200V	1200V	1200V

DC Electrical Characteristics (Note 3) $T_A = T_j = 25°C$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DC Electrical Characteristics (Note 3) $T_A = T_j = 25°C$ (Continued)

Symbol	Parameter	Conditions	LF155A/6A/7A			LF355A/6A/7A			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V_{CM}	Input Common-Mode Voltage Range	$V_S = \pm 15V$	±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 $T_A = T_j = 25°C$, $V_S = \pm 15V$

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 Hz f = 1000 Hz		 25 25			 15 12			 15 12		 nV/√Hz nV/√Hz
i_n	Equivalent Input Noise Current	f = 100 Hz f = 1000 Hz		0.01 0.01			0.01 0.01			0.01 0.01		pA/√Hz pA/√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	$R_S = 50\Omega$, $T_A = 25°C$ Over Temperature		3	5 7		3	5 6.5		3	10 13	mV mV
$\Delta V_{OS}/\Delta T$	Average TC of Input Offset Voltage	$R_S = 50\Omega$		5			5			5		μV/°C
$\Delta TC/\Delta V_{OS}$	Change in Average TC with V_{OS} Adjust	$R_S = 50\Omega$, (Note 4)		0.5			0.5			0.5		μV/°C per mV
I_{OS}	Input Offset Current	$T_j = 25°C$, (Notes 3, 5) $T_j \leq T_{HIGH}$		3	20 20		3	20 1		3	50 2	pA nA
I_B	Input Bias Current	$T_j = 25°C$, (Notes 3, 5) $T_j \leq T_{HIGH}$		30	100 50		30	100 5		30	200 8	pA nA
R_{IN}	Input Resistance	$T_j = 25°C$		10^{12}			10^{12}			10^{12}		Ω
A_{VOL}	Large Signal Voltage Gain	$V_S = \pm 15V$, $T_A = 25°C$ $V_O = \pm 10V$, $R_L = 2k$ Over Temperature	50 25	200		50 25	200		25 15	200		V/mV V/mV
V_O	Output Voltage Swing	$V_S = \pm 15V$, $R_L = 10k$ $V_S = \pm 15V$, $R_L = 2k$	±12 ±10	±13 ±12		±12 ±10	±13 ±12		±12 ±10	±13 ±12		V V
V_{CM}	Input Common-Mode Voltage Range	$V_S = \pm 15V$	±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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DC Electrical Characteristics $T_A = T_j = 25°C$, $V_S = \pm 15V$

Parameter	LF155A/155, LF255, LF355A/355B		LF355		LF156A/156, LF256/356B		LF356A/356		LF157A/157 LF257/357B		LF357A/357		Units
	Typ	Max	Typ	Max	Typ	Max	Typ	Max	Typ	Max	Typ	Max	
Supply Current	2	4	2	4	5	7	5	10	5	7	5	10	mA

AC Electrical Characteristics $T_A = T_j = 25°C$, $V_S = \pm 15V$

Symbol	Parameter	Conditions	LF155/255/ 355/355B	LF156/256, LF356B	LF156/256/ 356/356B	LF157/257, LF357B	LF157/257/ 357/357B	Units
			Typ	Min	Typ	Min	Typ	
SR	Slew Rate	LF155/6: $A_V = 1$, LF157: $A_V = 5$	5	7.5	12	30	50	V/μs V/μs
GBW	Gain Bandwidth Product		2.5		5		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 Hz f = 1000 Hz	25 20		15 12		15 12	nV/√Hz nV/√Hz
i_n	Equivalent Input Current Noise	f = 100 Hz f = 1000 Hz	0.01 0.01		0.01 0.01		0.01 0.01	pA/√Hz pA/√Hz
C_{IN}	Input Capacitance		3		3		3	pF

Notes for Electrical Characteristics

Note 1: The maximum power dissipation for these devices must be derated at elevated temperatures and is dictated by T_{jMAX}, θ_{jA}, and the ambient temperature, T_A. The maximum available power dissipation at any temperature is $P_d = (T_{jMAX} - T_A)/\theta_{jA}$ or the 25°C P_{dMAX}, whichever is less.

Note 2: Unless otherwise specified the absolute maximum negative input voltage is equal to the negative power supply voltage.

Note 3: Unless otherwise stated, these test conditions apply:

	LF155A/6A/7A LF155//6/7	LF255//6/7	LF355A/6A/7A	LF355B/6B/7B	LF355//6/7
Supply Voltage, V_S	$\pm 15V \le V_S \le \pm 20V$	$\pm 15V \le V_S \le \pm 20V$	$\pm 15V \le V_S \le \pm 18V$	$\pm 15V \le V_S \pm 20V$	$V_S = \pm 15V$
T_A	$-55°C \le T_A \le +125°C$	$-25°C \le T_A \le +85°C$	$0°C \le T_A \le +70°C$	$0°C \le T_A \le +70°C$	$0°C \le T_A \le +70°C$
T_{HIGH}	+125°C	+85°C	+70°C	+70°C	+70°C

and V_{OS}. I_B and I_{OS} are measured at $V_{CM} = 0$.

Note 4: The Temperature Coefficient of the adjusted input offset voltage changes only a small amount (0.5μV/°C typically) for each mV of adjustment from its original unadjusted value. Common-mode rejection and open loop voltage gain are also unaffected by offset adjustment.

Note 5: The input bias currents are junction leakage currents which approximately double for every 10°C increase in the junction temperature, T_j. Due to limited production test time, the input bias currents measured are correlated to junction temperature. In normal operation the junction temperature rises above the ambient temperature as a result of internal power dissipation, Pd. $T_j = T_A + \theta_{jA}$ Pd where θ_{jA} is the thermal resistance from junction to ambient. Use of a heat sink is recommended if input bias current is to be kept to a minimum.

Note 6: Supply Voltage Rejection is measured for both supply magnitudes increasing or decreasing simultaneously, in accordance with common practice.

Note 7: Settling time is defined here, for a unity gain inverter connection using 2 kΩ resistors for the LF155/6. It is the time required for the error voltage (the voltage at the inverting input pin on the amplifier) to settle to within 0.01% of its final value from the time a 10V step input is applied to the inverter. For the LF157, $A_V = -5$, the feedback resistor from output to input is 2 kΩ and the output step is 10V (See Settling Time Test Circuit).

Note 8: Refer to RETS155AX for LF155A, RETS155X for LF155, RETSF156AX for LF156A, RETS156X for LF156, RETS157A for LF157A and RETS157X for LF157 military specifications.

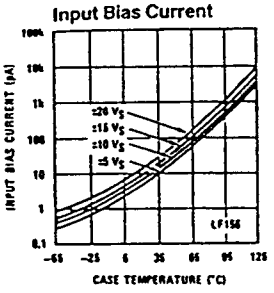
Note 9: Max. Power Dissipation is defined by the package characteristics. Operating the part near the Max. Power Dissipation may cause the part to operate outside guaranteed limits.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

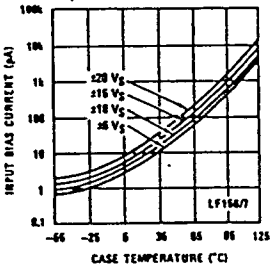
Typical DC Performance Characteristics

Curves are for LF155, LF156 and LF157 unless otherwise specified.

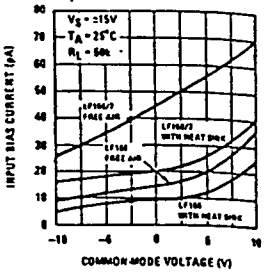
Input Bias Current



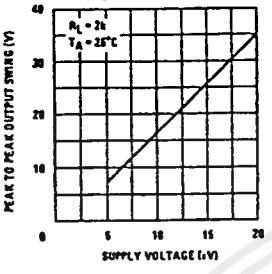
Input Bias Current



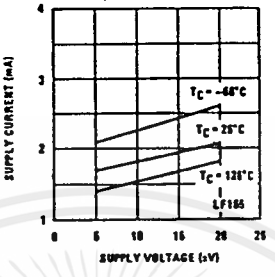
Input Bias Current



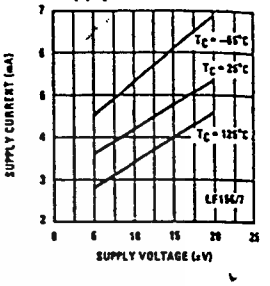
Voltage Swing



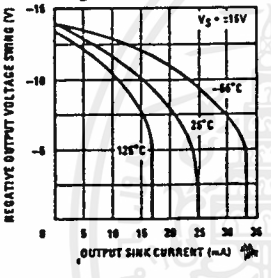
Supply Current



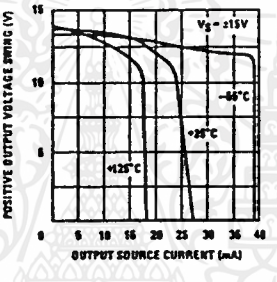
Supply Current



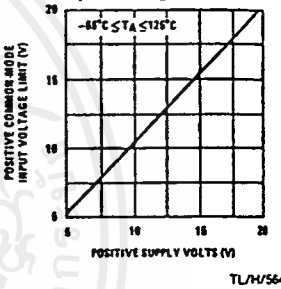
Negative Current Limit



Positive Current Limit

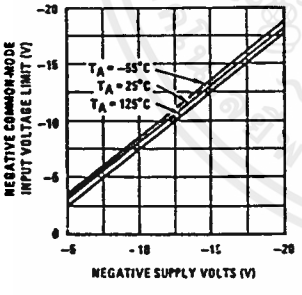


Positive Common-Mode Input Voltage Limit

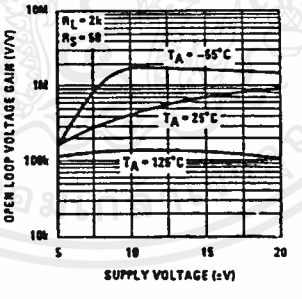


TL/H/5646-2

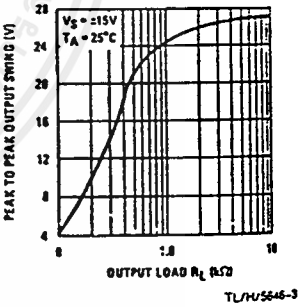
Negative Common-Mode Input Voltage Limit



Open Loop Voltage Gain



Output Voltage Swing

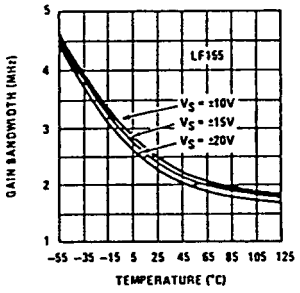


TL/H/5646-3

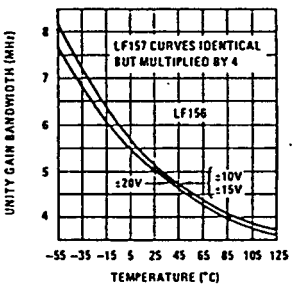
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical AC Performance Characteristics

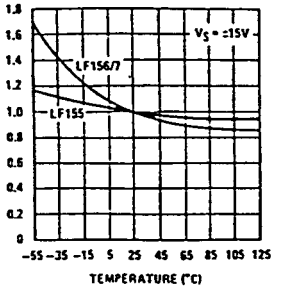
Gain Bandwidth



Gain Bandwidth

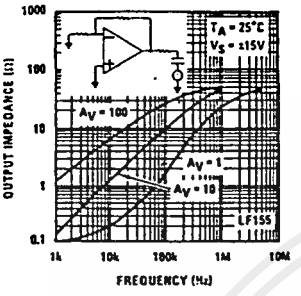


Normalized Slew Rate

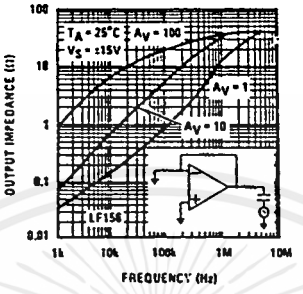


TL/H/5646–4

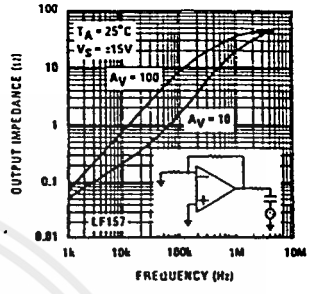
Output Impedance



Output Impedance

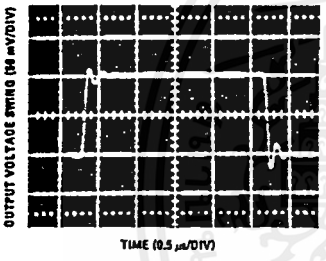


Output Impedance



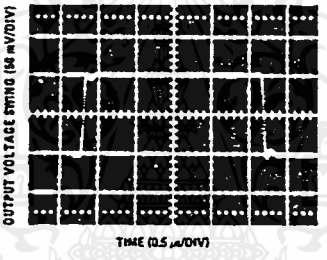
TL/H/5646–12

LF155 Small Signal Pulse Response, $A_V = +1$



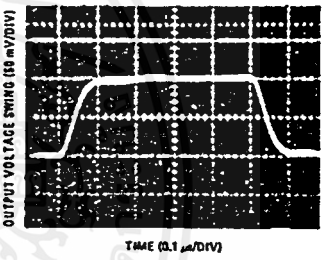
TL/H/5646–5

LF156 Small Signal Pulse Response, $A_V = +1$



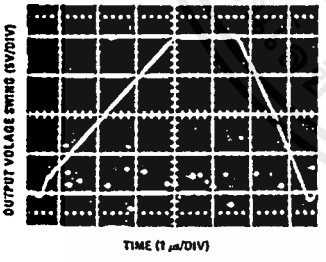
TL/H/5646–6

Small Signal Pulse Response, $A_V = +5$



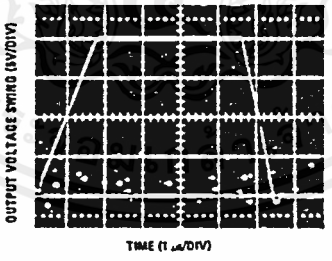
TL/H/5646–7

LF155 Large Signal Pulse Response, $A_V = +1$



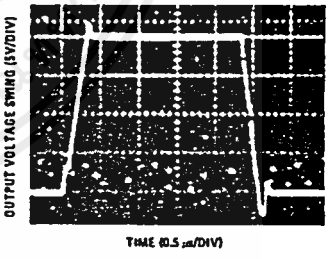
TL/H/5646–8

LF156 Large Signal Pulse Response, $A_V = +1$



TL/H/5646–9

LF157 Large Signal Pulse Response, $A_V = +5$

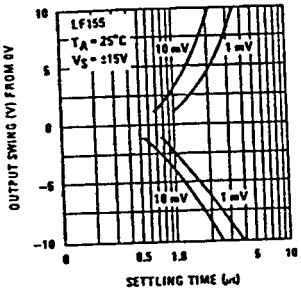


TL/H/5646–10

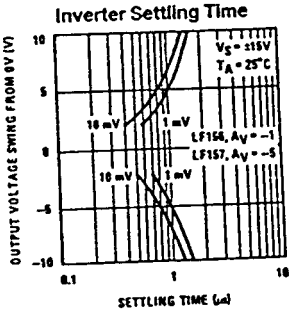
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical AC Performance Characteristics (Continued)

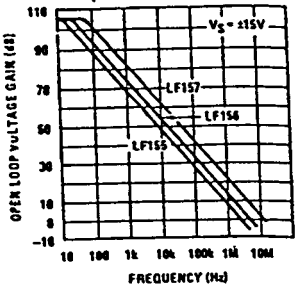
Inverter Settling Time



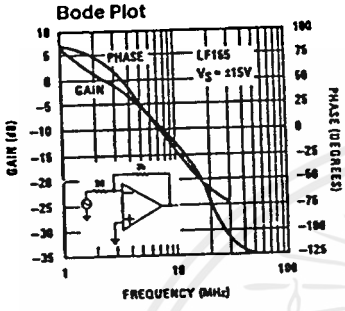
Inverter Settling Time



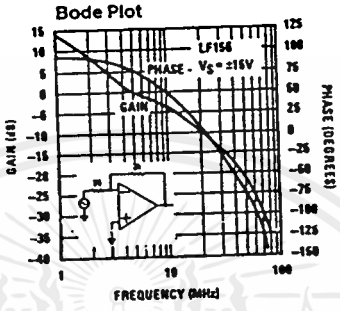
Open Loop Frequency Response



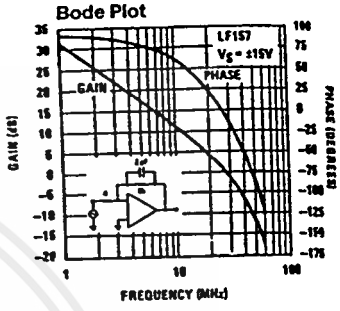
Bode Plot



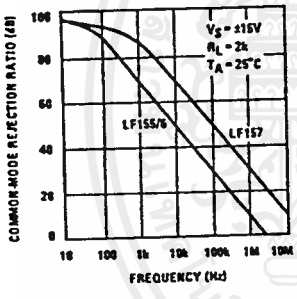
Bode Plot



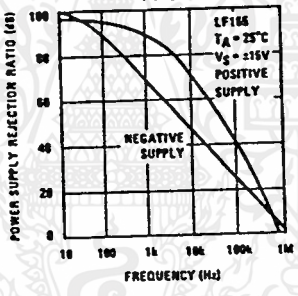
Bode Plot



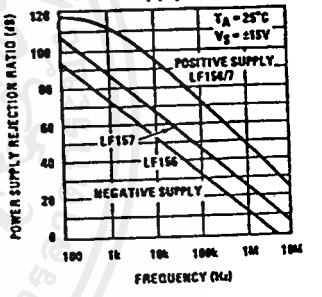
Common-Mode Rejection Ratio



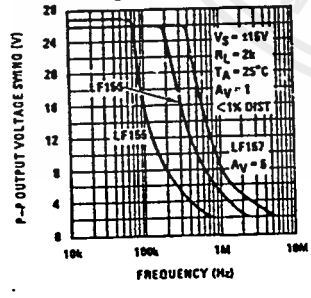
Power Supply Rejection Ratio



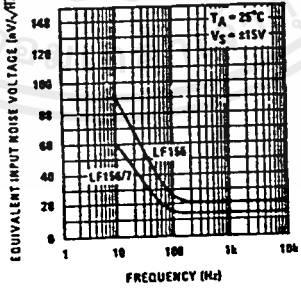
Power Supply Rejection Ratio



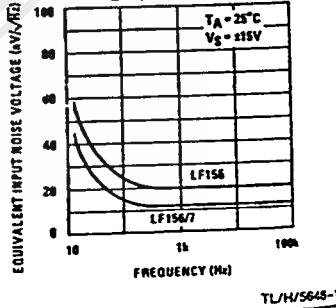
Undistorted Output Voltage Swing



Equivalent Input Noise Voltage



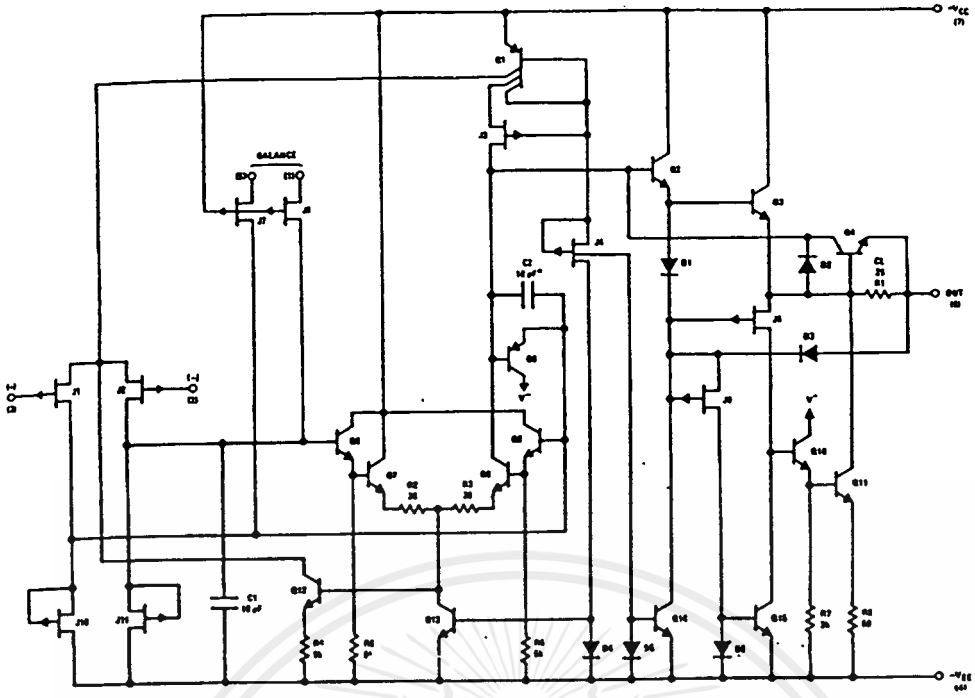
Equivalent Input Noise Voltage (Expanded Scale)



TL/H/5645-11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Detailed Schematic

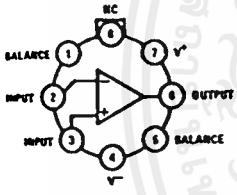


*C = 3 pF in LF157 series.

TL/H/5646–13

Connection Diagrams (Top Views)

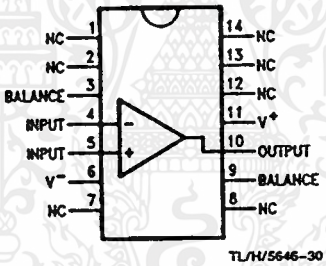
Metal Can Package (H)



TL/H/5646–14

Order Number
LF155AH, LF156AH, LF157AH, LF155H, LF156H, LF157H, LF255H, LF256H, LF257H, LF355AH, LF356AH, LF357AH, LF355BH, LF356BH, LF357BH, LF355H, LF356H or LF357H
See NS Package Number H08C

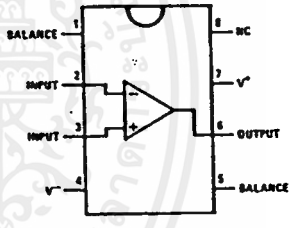
Dual-In-Line Package (J)



TL/H/5646–30

Order Number
LF155J, LF156J, LF157J, LF355J, LF356J, LF357J, LF355BJ, LF356BJ or LF357BJ
See NS Package Number J14A

Dual-In-Line Package (M and N)



TL/H/5646–29

Order Number
LF355M, LF356M, LF357M, LF356BM, LF355BN, LF356BN, LF357BN, LF355N, LF356N or LF357N
See NS Package Number M08A or N08E

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Application Hints

The LF155/6/7 series are op amps with JFET input devices. These JFETs have large reverse breakdown voltages from gate to source and drain eliminating the need for clamps across the inputs. Therefore large differential input voltages can easily be accomodated without a large increase in input current. The maximum differential input voltage is independent of the supply voltages. However, neither of the input voltages should be allowed to exceed the negative supply as this will cause large currents to flow which can result in a destroyed unit.

Exceeding the negative common-mode limit on either input will force the output to a high state, potentially causing a reversal of phase to the output. Exceeding the negative common-mode limit on both inputs will force the amplifier output to a high state. In neither case does a latch occur since raising the input back within the common-mode range again puts the input stage and thus the amplifier in a normal operating mode.

Exceeding the positive common-mode limit on a single input will not change the phase of the output however, if both inputs exceed the limit, the output of the amplifier will be forced to a high state.

These amplifiers will operate with the common-mode input voltage equal to the positive supply. In fact, the common-mode voltage can exceed the positive supply by approximately 100 mV independent of supply voltage and over the full operating temperature range. The positive supply can therefore be used as a reference on an input as, for example, in a supply current monitor and/or limiter.

Precautions should be taken to ensure that the power supply for the integrated circuit never becomes reversed in polarity or that the unit is not inadvertently installed backwards in a socket as an unlimited current surge through the resulting forward diode within the IC could cause fusing of the internal conductors and result in a destroyed unit.

Because these amplifiers are JFET rather than MOSFET input op amps they do not require special handling.

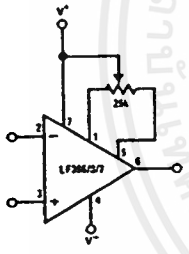
All of the bias currents in these amplifiers are set by FET current sources. The drain currents for the amplifiers are therefore essentially independent of supply voltage.

As with most amplifiers, care should be taken with lead dress, component placement and supply decoupling in order to ensure stability. For example, resistors from the output to an input should be placed with the body close to the input to minimize "pickup" and maximize the frequency of the feedback pole by minimizing the capacitance from the input to ground.

A feedback pole is created when the feedback around any amplifier is resistive. The parallel resistance and capacitance from the input of the device (usually the inverting input) to ac ground set the frequency of the pole. In many instances the frequency of this pole is much greater than the expected 3 dB frequency of the closed loop gain and consequently there is negligible effect on stability margin. However, if the feedback pole is less than approximately six times the expected 3 dB frequency a lead capacitor should be placed from the output to the input of the op amp. The value of the added capacitor should be such that the RC time constant of this capacitor and the resistance it parallels is greater than or equal to the original feedback pole time constant.

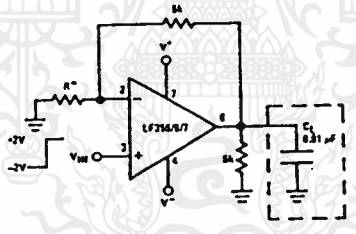
Typical Circuit Connections

V_{OS} Adjustment



- V_{OS} is adjusted with a 25k potentiometer
- The potentiometer wiper is connected to V^+
- For potentiometers with temperature coefficient of 100 ppm/°C or less the additional drift with adjust is ≈ 0.5 µV/°C/mV of adjustment
- Typical overall drift: 5 µV/°C ± (0.5 µV/°C/mV of adj.)

Driving Capacitive Loads



*LF155/6 R = 5k

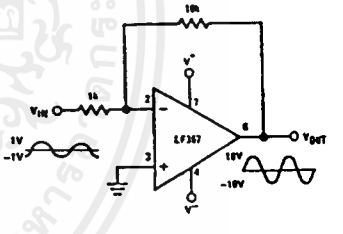
LF157 R = 1.25k

Due to a unique output stage design, these amplifiers have the ability to drive large capacitive loads and still maintain stability. $C_{L(MAX)} \approx 0.01$ µF.

Overshoot ≤ 20%

Settling time (t_s) ≈ 5 µs

LF157. A Large Power BW Amplifier



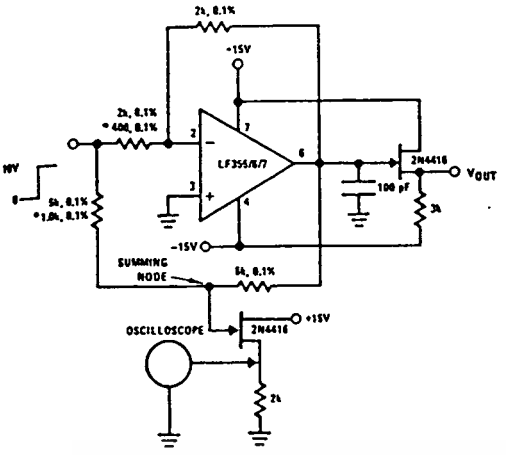
TL/H/5646–15

For distortion ≤ 1% and a 20 Vp-p V_{OUT} swing, power bandwidth is: 500 kHz.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications

Settling Time Test Circuit

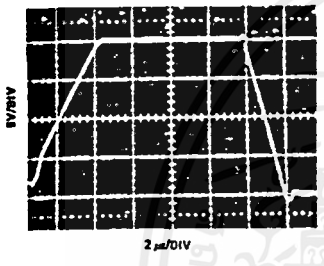


- Settling time is tested with the LF155/6 connected as unity gain inverter and LF157 connected for $A_V = -5$
- FET used to isolate the probe capacitance
- Output = 10V step
- $A_V = -5$ for LF157

TL/H/5646–16

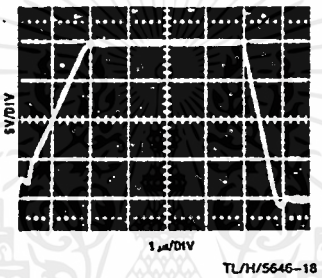
Large Signal Inverter Output, V_{OUT} (from Settling Time Circuit)

LF355



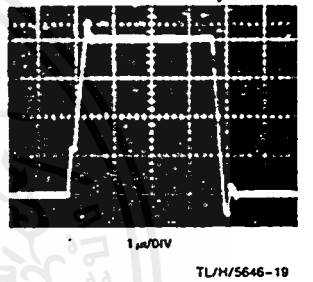
TL/H/5646–17

LF356



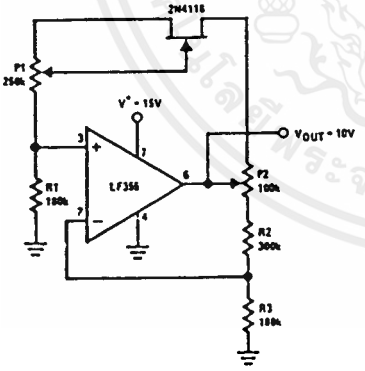
TL/H/5646–18

LF357



TL/H/5646–19

Low Drift Adjustable Voltage Reference



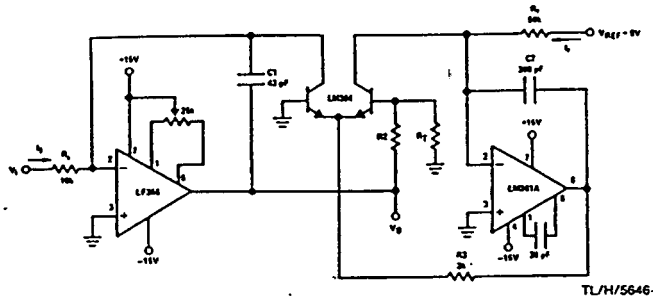
- $\Delta V_{OUT}/\Delta T = \pm 0.002\%/°C$
- All resistors and potentiometers should be wire-wound
- P1: drift adjust
- P2: V_{OUT} adjust
- Use LF155 for
  - Low I_B
  - Low drift
  - Low supply current

TL/H/5646–20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications (Continued)

Fast Logarithmic Converter

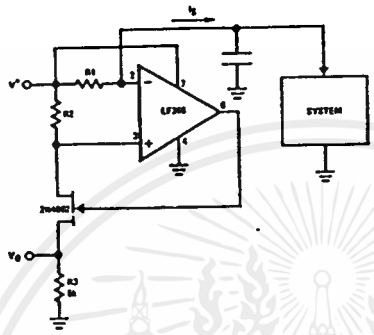


TL/H/5646–21

- Dynamic range: 100 μA ≤ I_i ≤ 1 mA (5 decades), $|V_O|$ = 1V/decade
- Transient response: 3 μs for ΔI_i = 1 decade
- C1, C2, R2, R3: added dynamic compensation
- V_{OS} adjust the LF156 to minimize quiescent error
- R_T: Tel Labs type C81 + 0.3%/°C

$$|V_{OUT}| = \left[1 + \frac{R2}{R_T}\right]\frac{kT}{q}\ln V_i\left[\frac{R_T}{V_{REF}\,R1}\right] = \log V_i \frac{1}{R1}\,R2 = 15.7k,\ R_T = 1k,\ 0.3\%/°C \text{ (for temperature compensation)}$$

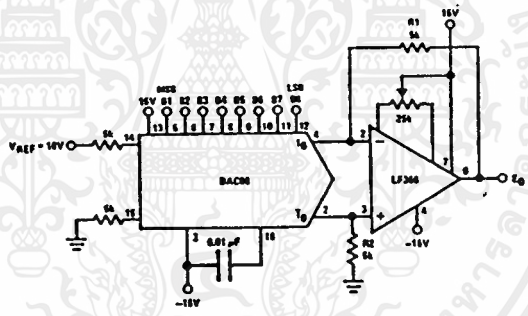
Precision Current Monitor



TL/H/5646–31

- V_O = 5 R1/R2 (V/mA of I_S)
- R1, R2, R3: 0.1% resistors
- Use LF155 for
  - Common-mode range to supply range
  - Low I_B
  - Low V_{OS}
  - Low Supply Current

8-Bit D/A Converter with Symmetrical Offset Binary Operation



TL/H/5646–32

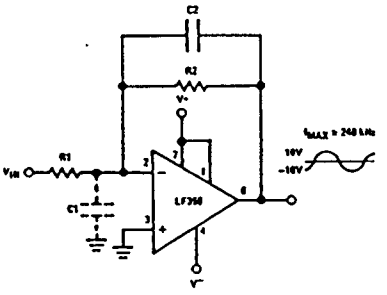
- R1, R2 should be matched within ±0.05%
- Full-scale response time: 3μs

E_O	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	Comments
+9.920	1	1	1	1	1	1	1	1	Positive Full-Scale
+0.040	1	0	0	0	0	0	0	0	(+) Zero-Scale
−0.040	0	1	1	1	1	1	1	1	(−) Zero-Scale
−9.920	0	0	0	0	0	0	0	0	Negative Full-Scale

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

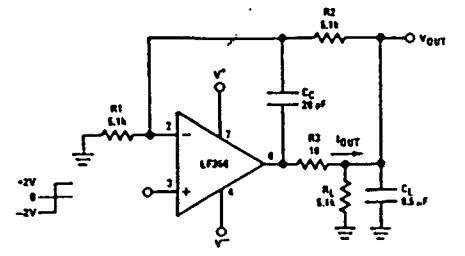
Typical Applications (Continued)

Wide BW Low Noise, Low Drift Amplifier



- Power BW: $f_{MAX} = \frac{S_r}{2\pi V_P} \approx 240$ kHz
- Parasitic input capacitance C1 ≈ (3 pF for LF155, LF156 and LF157 plus any additional layout capacitance) interacts with feedback elements and creates undesirable high frequency pole. To compensate add C2 such that: R2C2 ≈ R1C1.

Isolating Large Capacitive Loads

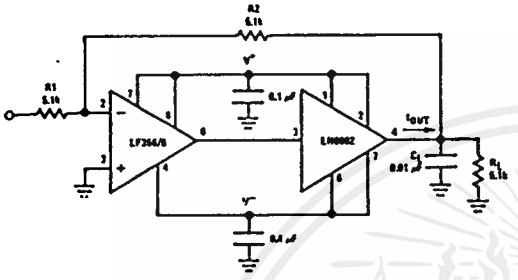


- Overshoot 6%
- t_s 10 μs
- When driving large C_L, the V_{OUT} slew rate determined by C_L and $I_{OUT(MAX)}$:

$$\frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta T} = \frac{I_{OUT}}{C_L} = \frac{0.02}{0.5} V/\mu s = 0.04\ V/\mu s \text{ (with } C_L \text{ shown)}$$

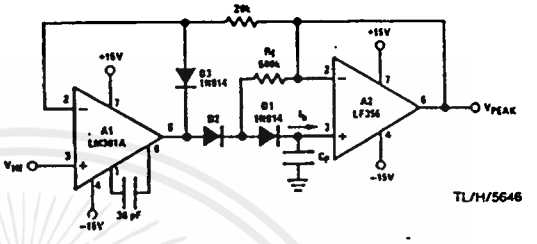
TL/H/5646–22

Boosting the LF156 with a Current Amplifier



- $I_{OUT(MAX)} \approx 150$ mA (will drive $R_L \geq 100\Omega$)
- $\frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta T} = \frac{0.15}{10^{-2}} V/\mu s$ (with C_L shown)
- No additional phase shift added by the current amplifier

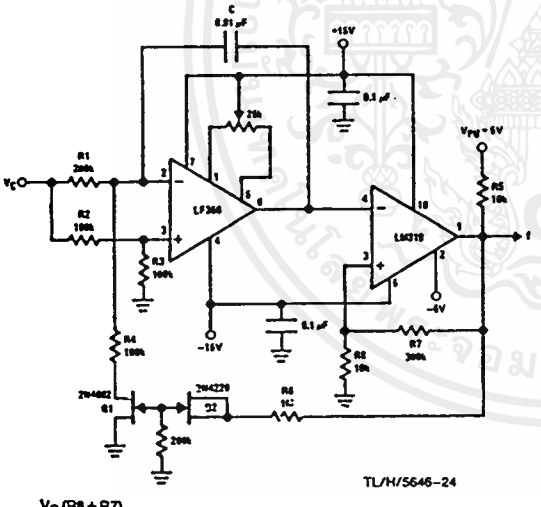
Low Drift Peak Detector



TL/H/5646

- By adding D1 and R_f, $V_{D1} = 0$ during hold mode. Leakage of D2 provided by feedback path through R_f.
- Leakage of circuit is essentially I_B (LF155, LF156) plus capacitor leakage of Cp.
- Diode D3 clamps V_{OUT} (A1) to $V_{IN} - V_{D3}$ to improve speed and to limit reverse bias of D2.
- Maximum input frequency should be $<< \frac{1}{2}\pi R_f C_{D2}$ where C_{D2} is the shunt capacitance of D2.

3 Decades VCO

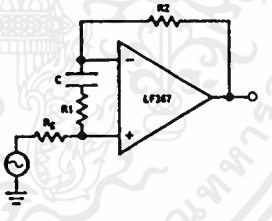


TL/H/5646–24

$$f = \frac{V_C (R8 + R7)}{(8\ V_{PU}\ R8\ R1)\ C},\ 0 \leq V_C \leq 30V,\ 10\ Hz \leq f \leq 10\ kHz$$

R1, R4 matched. Linearity 0.1% over 2 decades.

Non-Inverting Unity Gain Operation for LF157



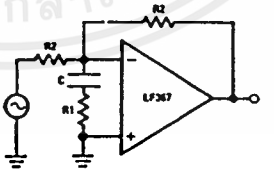
$$R1C \geq \frac{1}{(2\pi)\ (5\ MHz)}$$

$$R1 = \frac{R2 + R_S}{4}$$

$$A_{V(DC)} = 1$$

$$f_{-3\ dB} \approx 5\ MHz$$

Inverting Unity Gain for LF157



$$R1C \geq \frac{1}{(2\pi)\ (5\ MHz)}$$

$$R1 = \frac{R2}{4}$$

$$A_{V(DC)} = -1$$

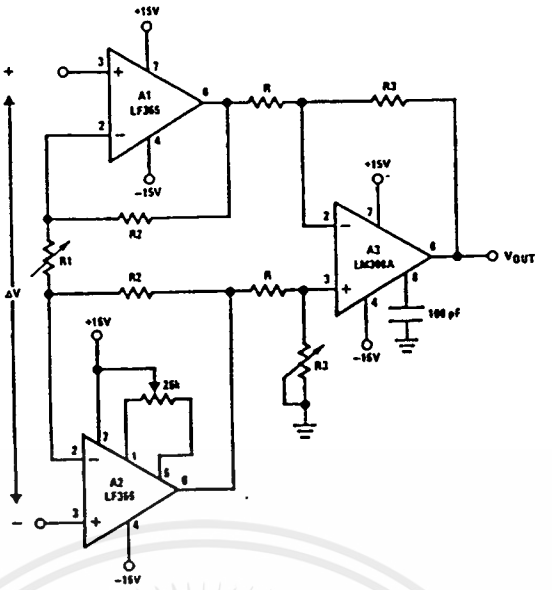
$$f_{-3\ dB} \approx 5\ MHz$$

TL/H/5646–25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications (Continued)

High Impedance, Low Drift Instrumentation Amplifier



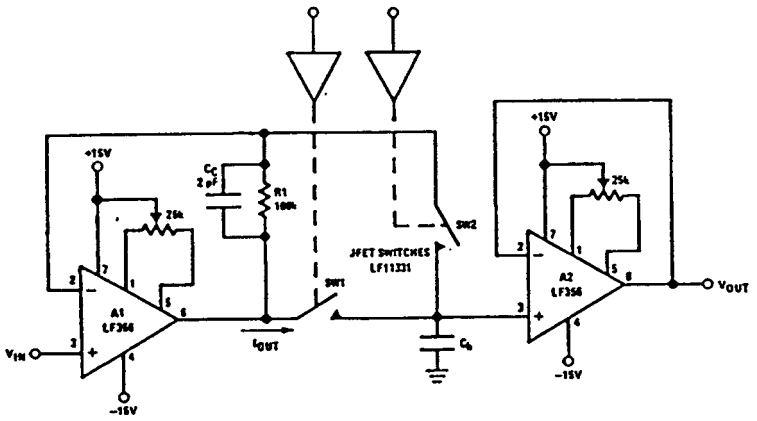
TL/H/5648–26

- $V_{OUT} = \frac{R3}{R}\left[\frac{2R2}{R1} + 1\right]\Delta V, V^- + 2V \leq V_{IN}$ common-mode $\leq V^+$
- System V_{OS} adjusted via A2 V_{OS} adjust
- Trim R3 to boost up CMRR to 120 dB. Instrumentation amplifier resistor array recommended for best accuracy and lowest drift

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications (Continued)

Fast Sample and Hold



TL/H/5646–33

- Both amplifiers (A1, A2) have feedback loops individually closed with stable responses (overshoot negligible)
- Acquisition time T_A, estimated by:

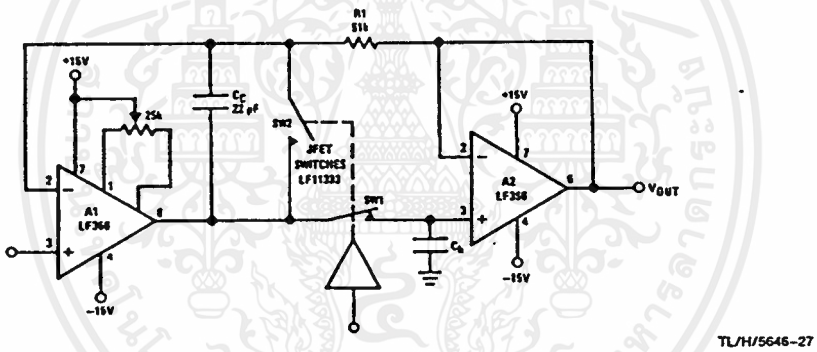
$$T_A \approx \left[\frac{2R_{ON} \cdot V_{IN} \cdot C_h}{S_r}\right] \text{ ½ provided that:}$$

$$V_{IN} < 2\pi S_r R_{ON} C_h \text{ and } T_A > \frac{V_{IN} C_h}{I_{OUT(MAX)}}, \; R_{ON} \text{ is of SW1}$$

$$\text{If inequality not satisfied: } T_A \approx \frac{V_{IN} C_h}{20\ \text{mA}}$$

- LF156 develops full S_r output capability for $V_{IN} \geq 1V$
- Addition of SW2 improves accuracy by putting the voltage drop across SW1 inside the feedback loop
- Overall accuracy of system determined by the accuracy of both amplifiers, A1 and A2

High Accuracy Sample and Hold



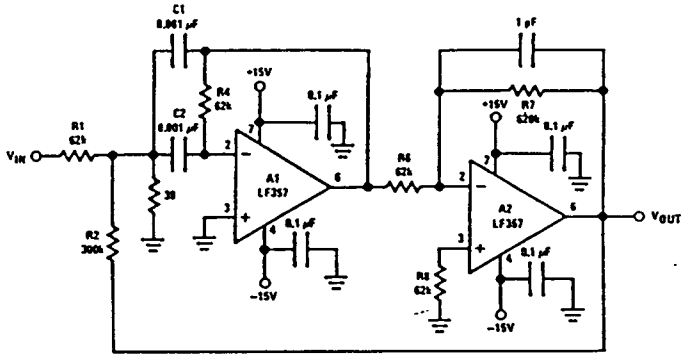
TL/H/5646–27

- By closing the loop through A2, the V_{OUT} accuracy will be determined uniquely by A1. No V_{OS} adjust required for A2.
- T_A can be estimated by same considerations as previously but, because of the added propagation delay in the feedback loop (A2) the overshoot is not negligible.
- Overall system slower than fast sample and hold
- R1, C_C additional compensation
- Use LF156 for
  - Fast settling time
  - Low V_{OS}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications (Continued)

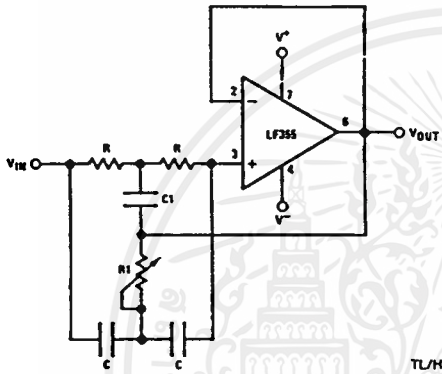
High Q Band Pass Filter



TL/H/5646–28

- By adding positive feedback (R2) Q increases to 40
- $f_{BP} = 100$ kHz
- $\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = 10\sqrt{Q}$
- Clean layout recommended
- Response to a 1 Vp-p tone burst: 300 µs

High Q Notch Filter



TL/H/5646–34

- $2R1 = R = 10\ M\Omega$
  $2C = C1 = 300$ pF
- Capacitors should be matched to obtain high Q
- $f_{NOTCH} = 120$ Hz, notch = −55 dB, Q > 100
- Use LF155 for
  - Low I_B
  - Low supply current

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EXAR

XR-2206

Monolithic Function Generator

GENERAL DESCRIPTION

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

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

FEATURES

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

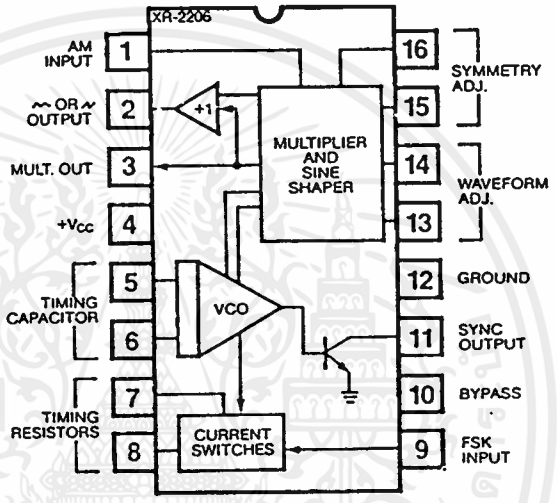
APPLICATIONS

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

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

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

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



ORDERING INFORMATION

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

SYSTEM DESCRIPTION

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XR-2206

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

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

PARAMETERS	XR-2206M			XR-2206C			UNITS	CONDITIONS
	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX		
GENERAL CHARACTERISTICS								
Single Supply Voltage	10		26	10		26	V	
Split-Supply Voltage	±5		±13	±5		±13	V	
Supply Current		12	17		14	20	mA	$R_1 \geq 10\ k\Omega$
OSCILLATOR SECTION								
Max. Operating Frequency	0.5	1		0.5	1		MHz	$C = 1000\ pF$, $R_1 = 1\ k\Omega$
Lowest Practical Frequency		0.01			0.01		Hz	$C = 50\ \mu F$, $R_1 = 2\ M\Omega$
Frequency Accuracy		±1	±4		±2		% of f_O	$f_O = 1/R_1C$
Temperature Stability		±10	±50		±20		ppm/°C	$0°C \leq T_A \leq 70°C$, $R_1 = R_2 = 20\ k\Omega$
Supply Sensitivity		0.01	0.1		0.01		%/V	$V_{LOW} = 10V$, $V_{HIGH} = 20V$, $R_1 = R_2 = 20\ k\Omega$
Sweep Range	1000:1	2000:1			2000:1		f_H:f_L	f_H @ $R_1 = 1\ k\Omega$, f_L @ $R_1 = 2\ M\Omega$
Sweep Linearity								
10:1 Sweep		2			2		%	$f_L = 1$ kHz, $f_H = 10$ kHz
1000:1 Sweep		8			8		%	$f_L = 100$ kHz, $f_H = 100$ kHz
FM Distortion		0.1			0.1		%	±10% Deviation
Recommended Timing Components								
Timing Capacitor: C	0.001		100	0.001		100	μF	See Figure 4.
Timing Resistors: R_1 & R_2	1		2000	1		2000	kΩ	
Triangle Sine Wave Output								See Note 1, Figure 2.
Triangle Amplitude		160			160		mV/kΩ	Figure 1, S_1 Open
Sine Wave Amplitude	40	60	80		60		mV/kΩ	Figure 1, S_1 Closed
Max. Output Swing		6			6		V p-p	
Output Impedance		600			600		Ω	
Triangle Linearity		1			1		%	
Amplitude Stability		0.5			0.5		dB	For 1000:1 Sweep
Sine Wave Amplitude Stability		4800			4800		ppm/°C	See Note 2.
Sine Wave Distortion								
Without Adjustment		2.5			2.5		%	$R_1 = 30\ k\Omega$
With Adjustment		0.4	1.0		0.5	1.5	%	See Figures 6 and 7.
Amplitude Modulation								
Input Impedance	50	100		50	100		kΩ	
Modulation Range		100			100		%	
Carrier Suppression		55			55		dB	
Linearity		2			2		%	For 95% modulation
Square-Wave Output								
Amplitude		12			12		V p-p	Measured at Pin 11.
Rise Time		250			250		nsec	$C_L = 10\ pF$
Fall Time		50			50		nsec	$C_L = 10\ pF$
Saturation Voltage		0.2	0.4		0.2	0.6	V	$I_L = 2\ mA$
Leakage Current		0.1	20		0.1	100	μA	$V_{11} = 26V$
FSK Keying Level (Pin 9)	0.8	1.4	2.4	0.8	1.4	2.4	V	See section on circuit controls
Reference Bypass Voltage	2.9	3.1	3.3	2.5	3	3.5	V	Measured at Pin 10.

Note 1: Output amplitude is directly proportional to the resistance, R_3, on Pin 3. See Figure 2.
Note 2: For maximum amplitude stability, R_3 should be a positive temperature coefficient resistor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

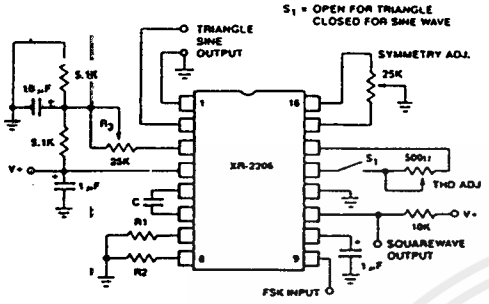


Figure 1. Basic Test Circuit.

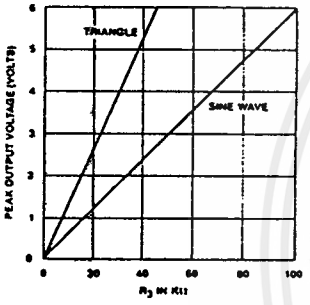


Figure 2. Output Amplitude as a Function of the Resistor, R_3, at Pin 3.

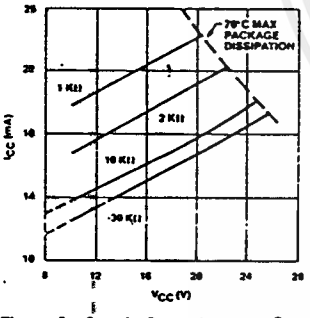


Figure 3. Supply Current versus Supply Voltage, Timing, R.

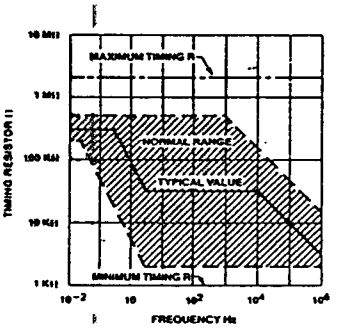


Figure 4. R versus Oscillation Frequency.

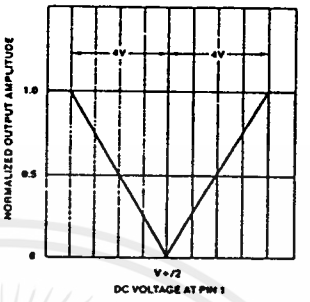


Figure 5. Normalized Output Amplitude versus DC Bias at AM Input (Pin 1).

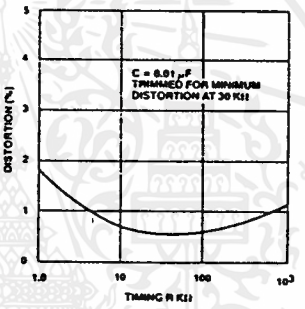


Figure 6. Trimmed Distortion versus Timing Resistor.

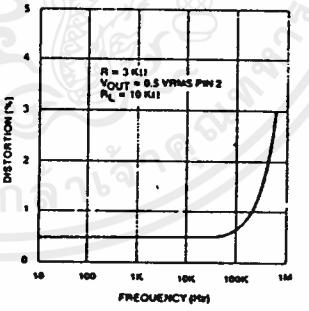


Figure 7. Sine Wave Distortion versus Operating Frequency with Timing Capacitors Varied.

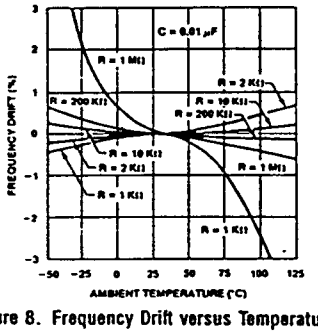


Figure 8. Frequency Drift versus Temperature.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

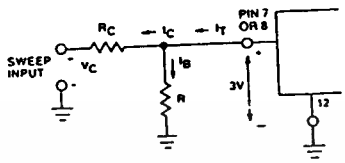


Figure 9. Circuit Connection for Frequency Sweep.

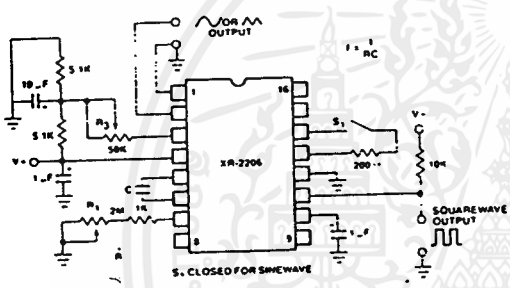


Figure 10. Circuit for Sine Wave Generation without External Adjustment. (See Figure 2 for Choice of R_3).

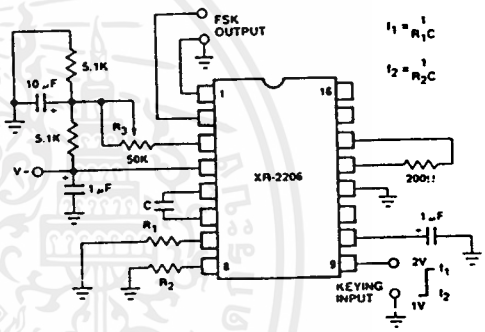


Figure 12. Sinusoidal FSK Generator.

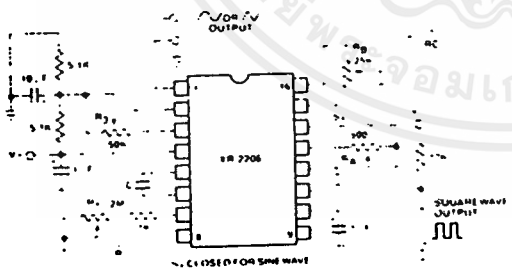


Figure 11. Circuit for Sine Wave Generation with Minimum Harmonic Distortion. (R_3 Determines Output Swing—See Figure 2.)

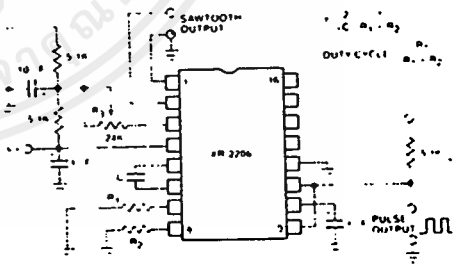


Figure 13. Circuit for Pulse and Ramp Generation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Frequency-Shift Keying:

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

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

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

Output DC Level Control:

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

APPLICATIONS INFORMATION

Sine Wave Generation

Without External Adjustment:

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

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

With External Adjustment:

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

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

Triangle Wave Generation

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

FSK Generation

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

Pulse and Ramp Generation

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

PRINCIPLES OF OPERATION

Description of Controls

Frequency of Operation:

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

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

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

Frequency Sweep and Modulation:

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

CAUTION: For safety operation of the circuit, I_T should be limited to ≤3 mA.

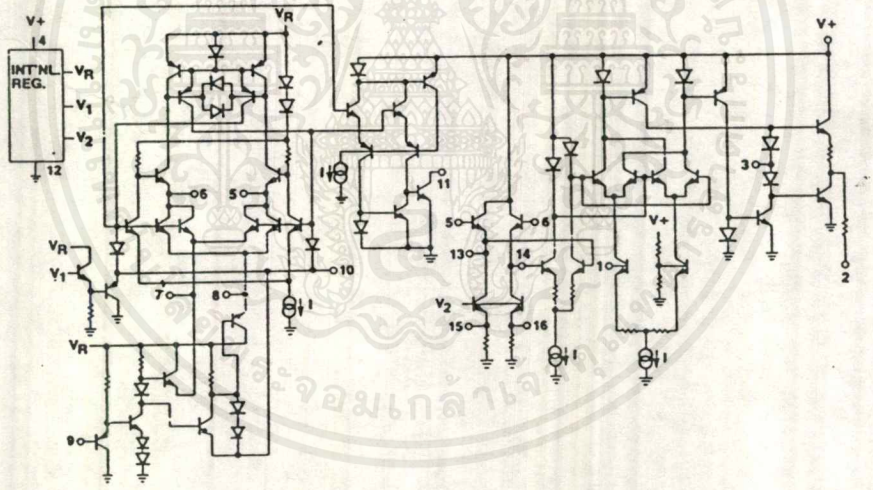
Output Amplitude:

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

Amplitude Modulation:

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

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



EQUIVALENT SCHEMATIC DIAGRAM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IF-E91

PLASTIC FIBER OPTIC EMITTER

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

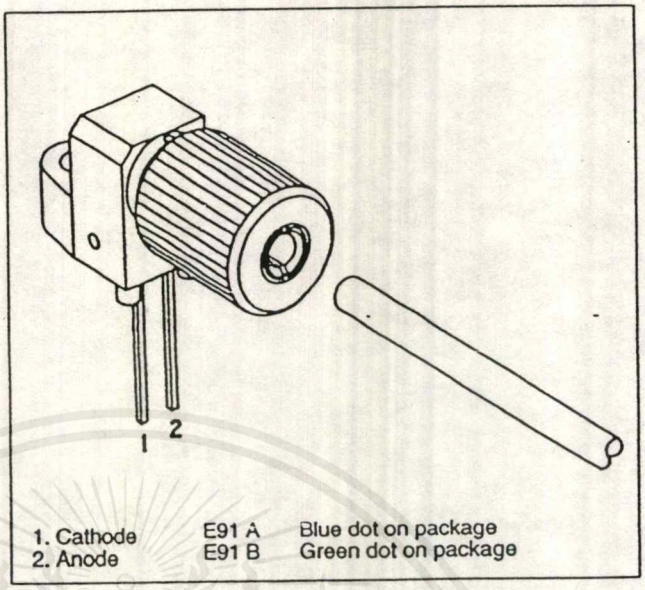
APPLICATIONS

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.



1. Cathode
2. Anode

E91 A Blue dot on package
E91 B Green dot on package

Maximum Ratings (T_A=25°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≤5s ..... 240° C
Reverse Voltage (V_R) ..... 3 V
Power Dissipation (P_{TOT}) T_A=25°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≤10 µsec	2 A	2 A

Characteristics (T_A=25°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 Ω, 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

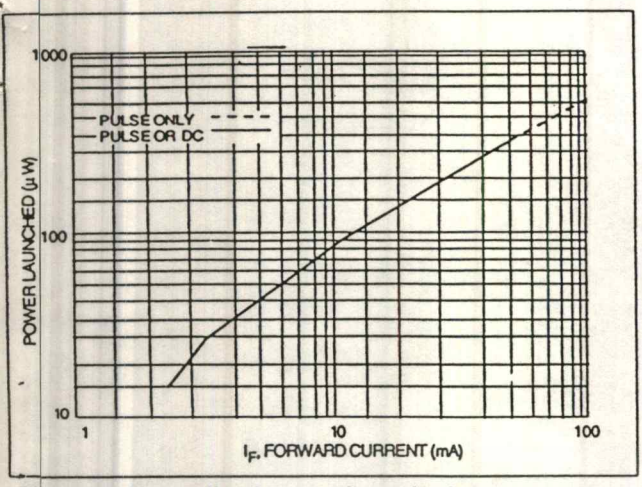


Figure 1. Normalized power launched versus forward current.

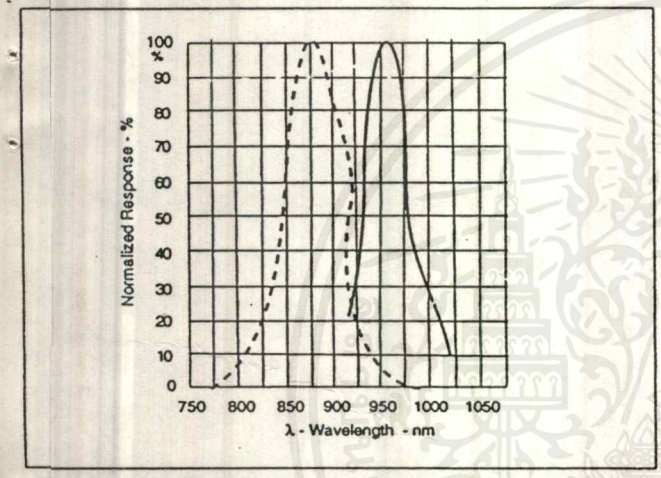
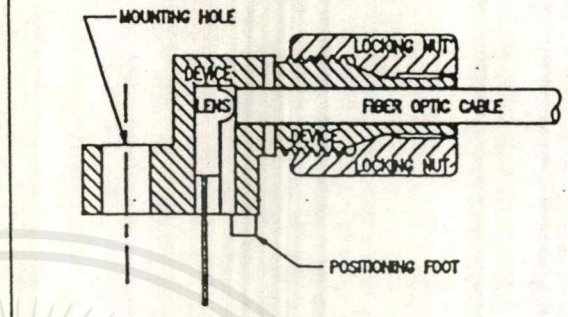


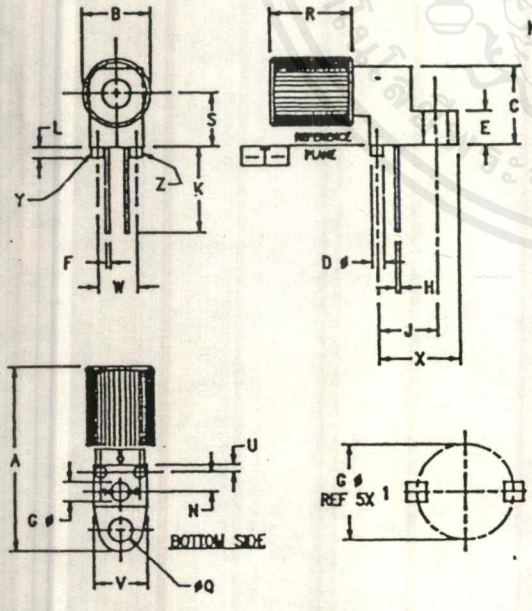
Figure 2. Typical spectral output versus wavelength.



Fiber termination instructions:

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

Figure 3. Cross-section of fiber optic device.



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

STYLE 1:
PIN 1. ANODE
PIN 2. CATHODE

	MILLIMETERS		INCHES	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	23.24	25.27	.915	.995
B	8.64	9.14	.340	.360
C	9.91	10.41	.390	.410
D	1.52	1.63	.060	.064
E	4.19	4.70	.165	.185
F	0.43	0.58	.017	.023
G	2.54 BSC		.100 BSC	
H	0.43	0.58	.017	.023
J	7.62 BSC		.300 BSC	
K	10.35	11.87	.408	.468
L	1.14	1.65	.045	.065
N	2.54 BSC		.100 BSC	
Q	.305	3.30	.120	.130
R	10.48	10.99	.413	.433
S	6.98 BSC		.275 BSC	
U	0.83	1.06	.032	.042
V	6.86	7.11	.270	.280
W	5.08 BSC		.200 BSC	
X	10.10	10.68	.397	.427

Figure 4. Case outline.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INDUSTRIAL FIBER OPTICS — IF-D91

PLASTIC FIBER OPTIC PHOTODIODE

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

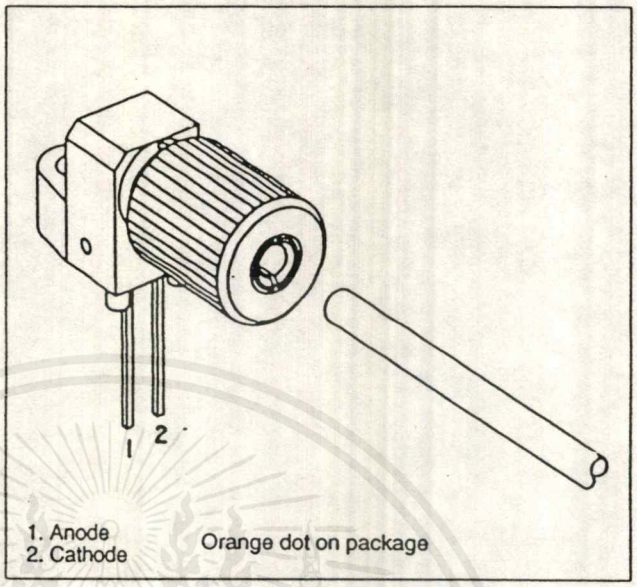
APPLICATIONS

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

DESCRIPTION

The IF-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.



1. Anode
2. Cathode

Orange dot on package

Maximum Ratings (T_A=25°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≤5s.....240°C
Power Dissipation (P_{TOT}) T_A=25°C.....100 mW
De-rate Above 25°C.....1.33 mW/°C

Characteristics (T_A=25°C)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

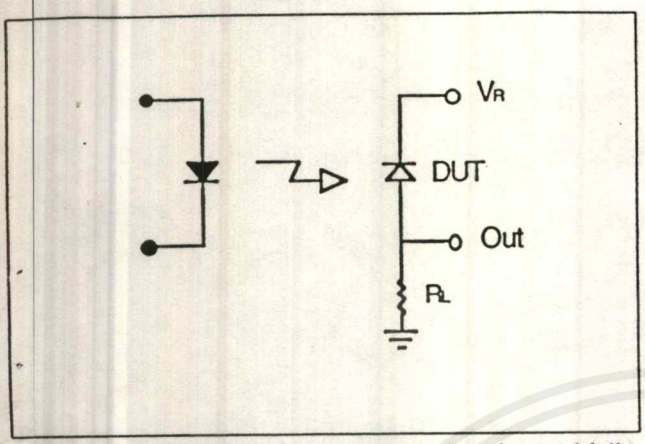


Figure 1. Circuit diagram for measuring rise and fall times.

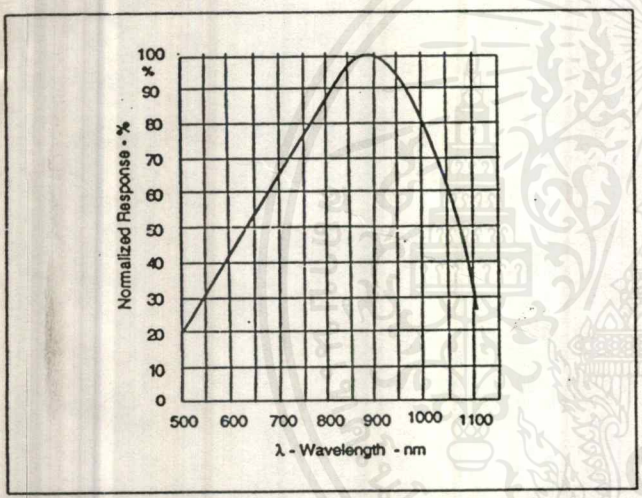
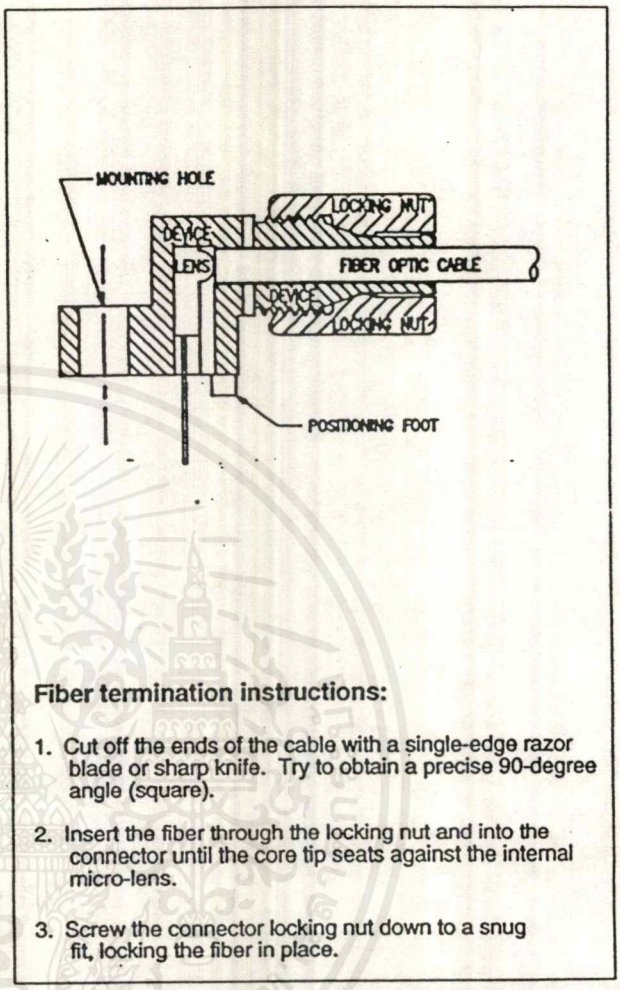


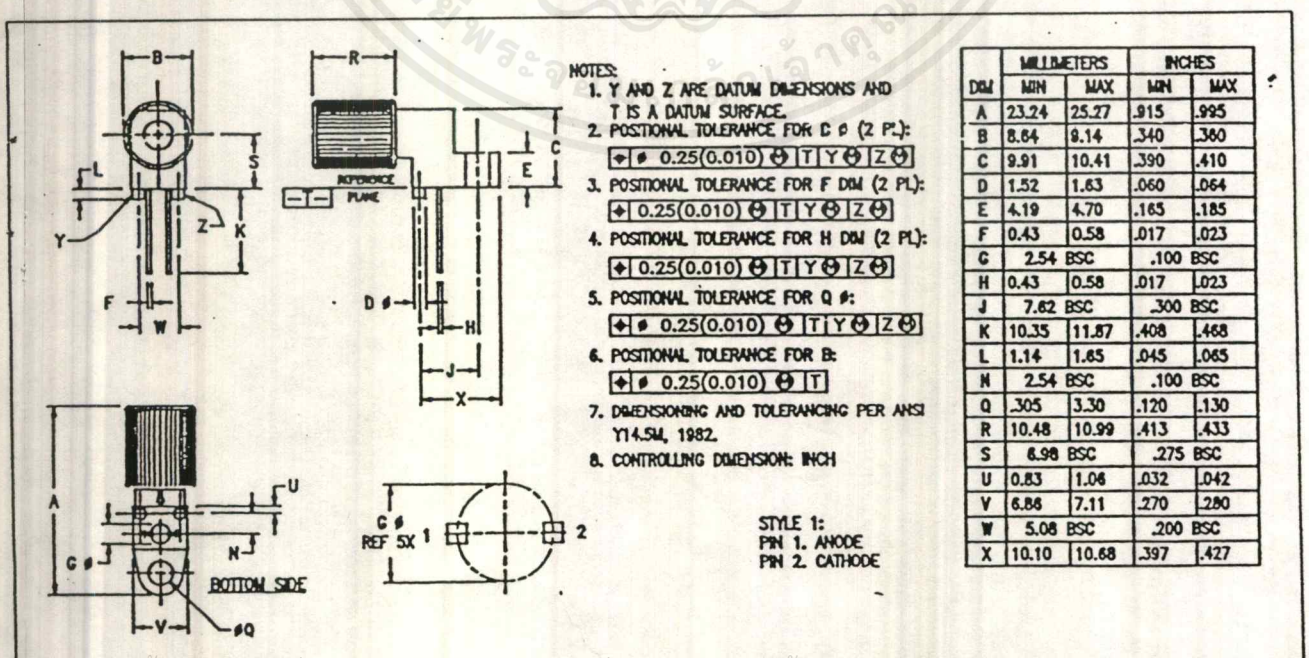
Figure 2. Typical detector response versus wavelength.



Fiber termination instructions:

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

Figure 3. Cross-section of fiber optic device.



NOTES:
1. Y AND Z ARE DATUM DIMENSIONS AND T IS A DATUM SURFACE.
2. POSITIONAL TOLERANCE FOR C ø (2 PL):
   ⌖ ø 0.25(0.010) Ⓜ T Ⓜ Y Ⓜ Z Ⓜ
3. POSITIONAL TOLERANCE FOR F DIM (2 PL):
   ⌖ 0.25(0.010) Ⓜ T Ⓜ Y Ⓜ Z Ⓜ
4. POSITIONAL TOLERANCE FOR H DIM (2 PL):
   ⌖ 0.25(0.010) Ⓜ T Ⓜ Y Ⓜ Z Ⓜ
5. POSITIONAL TOLERANCE FOR Q ø:
   ⌖ ø 0.25(0.010) Ⓜ T Ⓜ Y Ⓜ Z Ⓜ
6. POSITIONAL TOLERANCE FOR B:
   ⌖ ø 0.25(0.010) Ⓜ T
7. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
8. CONTROLLING DIMENSION: INCH

STYLE 1:
PIN 1. ANODE
PIN 2. CATHODE

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	23.24	25.27	.915	.995
B	8.64	9.14	.340	.360
C	9.91	10.41	.390	.410
D	1.52	1.63	.060	.064
E	4.19	4.70	.165	.185
F	0.43	0.58	.017	.023
G	2.54 BSC		.100 BSC	
H	0.43	0.58	.017	.023
J	7.62 BSC		.300 BSC	
K	10.35	11.87	.408	.468
L	1.14	1.65	.045	.065
N	2.54 BSC		.100 BSC	
Q	.305	3.30	.120	.130
R	10.48	10.99	.413	.433
S	6.98 BSC		.275 BSC	
U	0.83	1.06	.032	.042
V	6.86	7.11	.270	.280
W	5.08 BSC		.200 BSC	
X	10.10	10.68	.397	.427

Figure 4. Case outline.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

National Semiconductor Corporation

LM386 Low Voltage Audio Power Amplifier

General Description

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

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

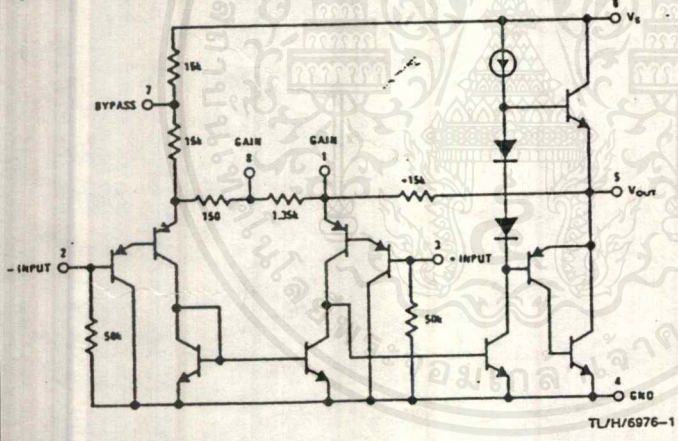
Features

- Battery operation — 4V–12V or 5V–18V
- Minimum external parts
- Wide supply voltage range
- Low quiescent current drain — 4 mA
- Voltage gains from 20 to 200
- Ground referenced input
- Self-centering output quiescent voltage
- Low distortion
- Eight pin dual-in-line package

Applications

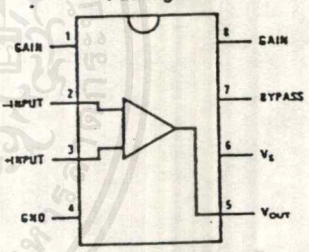
- AM-FM radio amplifiers
- Portable tape player amplifiers
- Intercoms
- TV sound systems
- Line drivers
- Ultrasonic drivers
- Small servo drivers
- Power converters

Equivalent Schematic and Connection Diagrams



TL/H/6976–1

Dual-In-Line and Small Outline Packages



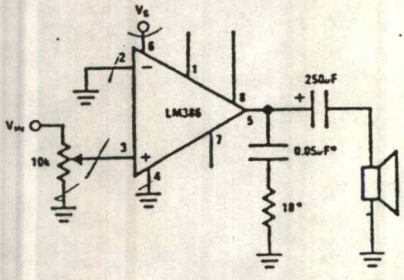
TL/H/6976–2

Top View

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

Typical Applications

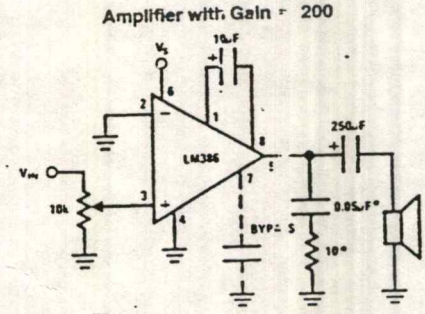
Amplifier with Gain = 20
Minimum Parts



TL/H/6976–3

*Required for LM386N-4 only.

Amplifier with Gain = 200



TL/H/6976–4

*Required for LM386N-4 only.

Absolute Maximum Ratings

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

Supply Voltage (LM386N-1, -3, LM386M-1)	15V
Supply Voltage (LM386N-4)	22V
Package Dissipation (Note 1) (LM386N-4)	1.25W
Input Voltage	±0.4V
Storage Temperature	−65°C to +150°C
Operating Temperature	0°C to +70°C
Junction Temperature	+150°C
Soldering Information	
Dual-In-Line Package	
Soldering (10 sec)	+260°C
Small Outline Package	
Vapor Phase (60 sec)	+215°C
Infrared (15 sec)	+220°C

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

Electrical Characteristics $T_A = 25°C$

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
Operating Supply Voltage (V_S)					
LM386N-1, -3, LM386M-1		4		12	V
LM386N-4		5		18	V
Quiescent Current (I_Q)	V_S = 6V, V_{IN} = 0		4	8	mA
Output Power (P_{OUT})					
LM386N-1, LM386M-1	V_S = 6V, R_L = 8Ω, THD = 10%	250	325		mW
LM386N-3	V_S = 9V, R_L = 8Ω, THD = 10%	500	700		mW
LM386N-4	V_S = 16V, R_L = 32Ω, THD = 10%	700	1000		mW
Voltage Gain (A_V)	V_S = 6V, f = 1 kHz		26		dB
	10 μF from Pin 1 to 8		46		dB
Bandwidth (BW)	V_S = 6V, Pins 1 and 8 Open		300		kHz
Total Harmonic Distortion (THD)	V_S = 6V, R_L = 8Ω, P_{OUT} = 125 mW f = 1 kHz, Pins 1 and 8 Open		0.2		%
Power Supply Rejection Ratio (PSRR)	V_S = 6V, f = 1 kHz, C_{BYPASS} = 10 μF Pins 1 and 8 Open, Referred to Output		50		dB
Input Resistance (R_{IN})			50		kΩ
Input Bias Current (I_{BIAS})	V_S = 6V, Pins 2 and 3 Open		250		nA

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

Application Hints

GAIN CONTROL

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

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

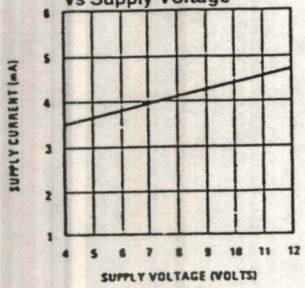
INPUT BIASING

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

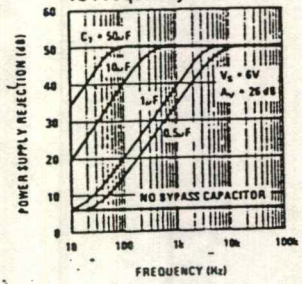
When using the LM386 with higher gains (bypassing the 1.35 kΩ resistor between pins 1 and 8) it is necessary to bypass the unused input, preventing degradation of gain and possible instabilities. This is done with a 0.1 μF capacitor or a short to ground depending on the dc source resistance on the driven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

Typical Performance Characteristics

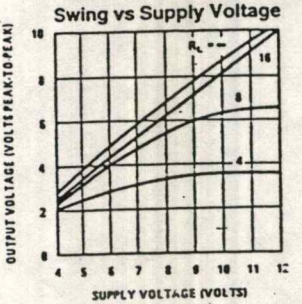
Quiescent Supply Current vs Supply Voltage



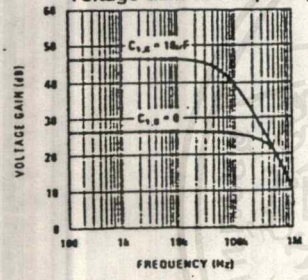
Power Supply Rejection Ratio (Referred to the Output) vs Frequency



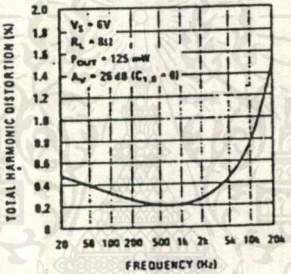
Peak-to-Peak Output Voltage Swing vs Supply Voltage



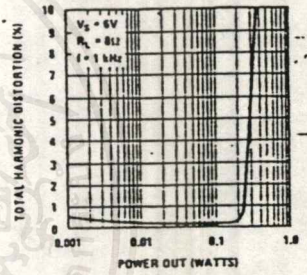
Voltage Gain vs Frequency



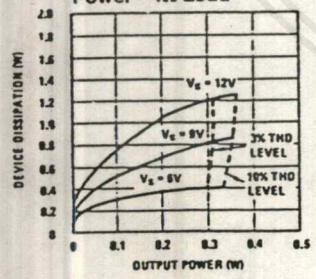
Distortion vs Frequency



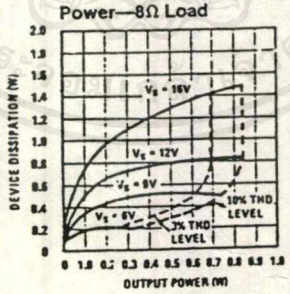
Distortion vs Output Power



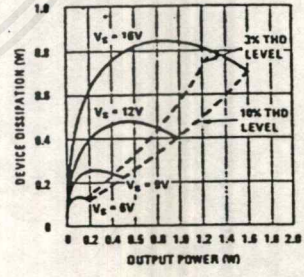
Device Dissipation vs Output Power—4Ω Load



Device Dissipation vs Output Power—8Ω Load



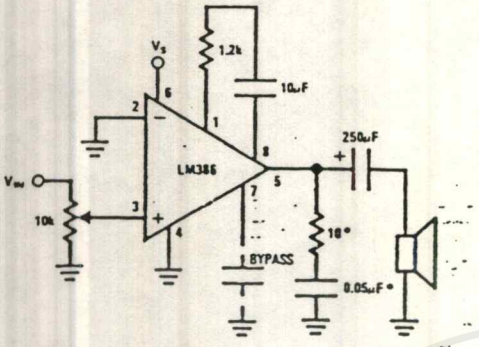
Device Dissipation vs Output Power—16Ω Load



TL/H/6976–5

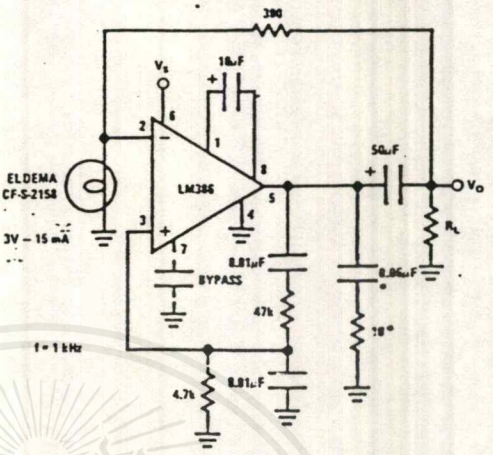
Typical Applications (Continued)

Amplifier with Gain = 50



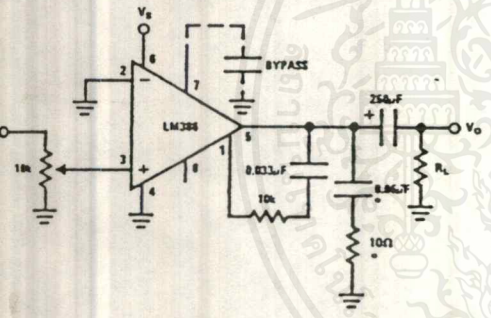
TL/H/6976–6

Low Distortion Power Wienbridge Oscillator



TL/H/6976–7

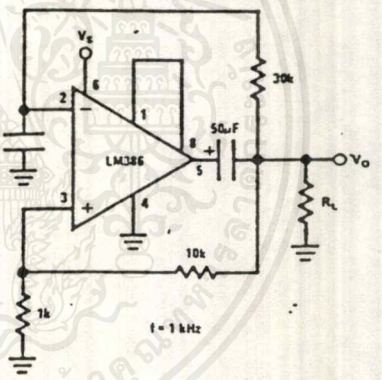
Amplifier with Bass Boost



TL/H/6976–8

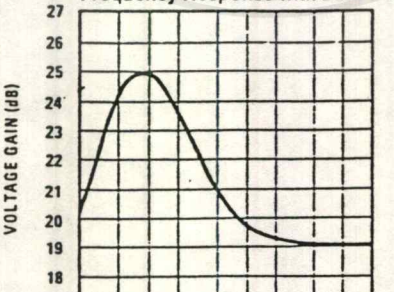
*Required for LM386N-4 only.

Square Wave Oscillator



TL/H/6976–9

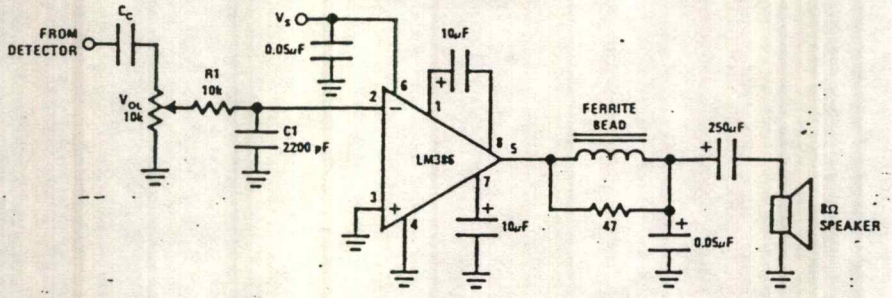
Frequency Response with Bass Boost



TL/H/6976–10

Typical Applications (Continued)

AM Radio Power Amplifier



TL/H/6976–11

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

Note 2: Twist speaker lead and ground very tightly.

Note 3: Ferrite bead is Ferroxcube K5-001-001/3B with 3 turns of wire.

Note 4: R1C1 band limits input signals.

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

เอกสารอ้างอิง

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

****

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

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

****

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้