



การส่งข้อมูลดิจิทัลและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแสง

INTENSITY MODULATED FIBER OPTIC COMMUNICATION



โดย
นายอาคม ศรีวรรณท์
นายชชาติ เดียงเกตุ
นายอัฐพร พลเดช

เลขเรียกหนังสือ... ขพ.ค591ก 1528
เลขทะเบียน... 041808
วัน เดือน ปี... 21/11/23

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

041808

การส่งข้อมูลดิจิทัลและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแสง
INTENSITY MODULATED FIBER OPTIC COMMUNICATION

โดย

นายอคม ศรีวรรณท์ 40013037

นายชชาติ เคียงเกตุ 40013047

นายณัฐพล พลเดช 40013049

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ สุรพล บุญจันทร์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2540

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การส่งข้อมูลดิจิทัลและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแสง

INTENSITY MODULATED OPTICAL FIBER COMMUNICATION

ผู้จัดทำ

1. นายอาคม ศรีวรานนท์ 40013037
2. นายชูชาติ เตียงเกตุ 40013047
3. นายณัฐพล พลเดช 40013039


.....
(อาจารย์สุรพล บุญจันทร์) อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การส่งข้อมูลดิจิทัลและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแสง

INTENSITY MODULATED OPTICAL FIBER COMMUNICATION

โดย นายอาคม ศรีวารานนท์ 40013037

นายชูชาติ เดียงนกฤ 40013047

นายณัฐพล พลเดช 40013039

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ สุรพล บุญจันทร์

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาออกแบบระบบการส่งข้อมูลดิจิทัลและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแสง โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์รับแสงที่เข้าคู่กัน สำหรับส่งข้อมูลดิจิทัลสองช่องสัญญาณและส่งสัญญาณเสียงอีกหนึ่งช่องสัญญาณ ช่องสัญญาณแรกจะส่งสัญญาณเสียงแบบเบสแบนด์ ส่วนช่องสัญญาณที่ สอง และสามจะส่งข้อมูลดิจิทัลสองช่องสัญญาณแบบบรอดแบนด์โดยใช้วงจรมอดูเลเตอร์ หลังจากนั้นจะรวมช่องสัญญาณทั้งสี่ช่องสัญญาณเข้าด้วยกันโดยใช้วงจรมัลติเพล็กซ์ แล้วขนาดของสัญญาณไฟฟ้าที่ได้ จะใช้ควบคุมความเข้มของสัญญาณแสงของอุปกรณ์กำเนิดแสง และป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยแสงต่อไป

ABSTRACT

This project presents a design system of digital data and audio signal transmission via the optical fiber by using a light source and photo diode. The light source and photo diode are matched each other. For transmitting two digital data and audio signal channel. First channel is transmitte signal in base band frequency, second and third channel are digital data transmitted in broadband frequency by modulator. After three channels are multiplexed by multiplex circuit., intensity of light source is controlled by amplitude level of composite signal. Finally, all the informations are transmitted through the optical fiber.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	2
2.1 ประวัติและวิวัฒนาการของการสื่อสารด้วยเส้นใยแสง	2
2.2 เส้นใยแสง	5
2.2.1 ลักษณะการเดินทางของแสงภายในเส้นใยแสง	6
2.2.2 ชนิดของเส้นใยแสง	8
2.2.3 โครงสร้างของเส้นใยแสง	11
2.2.4 การสูญเสียแสงในเส้นใยแสง	14
2.3 แหล่งกำเนิดแสง	20
2.3.1 โครงสร้างของการกำเนิดแสง	20
2.3.2 โครงสร้างของ Laser Diode(LD)	22
2.3.3 โครงสร้างของ LED(Light Emitting Diode)	24
2.3.4 คุณสมบัติต่างๆของอุปกรณ์กำเนิดแสง	25
2.4 อุปกรณ์รับแสง	26
2.4.1 การทำงานของการรับแสง	26
2.4.2 โครงสร้างของอุปกรณ์รับแสง	27
2.4.3 คุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง	29
2.5 การมอดูเลตแอมพลิจูด(Amplitude Modulation)	30
2.5.1 ตัวประกอบการมอดูเลต(Modulation Factor)	31
2.5.2 สเปกตรัมของAM และแบนด์วิดท์(AM Spectrum and Band width)	32
2.5.3 พื้นฐานของ AM	33
2.5.4 การโอเวอร์มอดูเลต(Over modulation)	36
2.5.5 การกำจัดคลื่นพาห์และไซด์แบนด์เดี่ยว	37
2.5.6 การตีเทคไซด์แบนด์คู่(DSB-AM Detection)	41
2.5.7 การตีเทคไซด์แบนด์คู่แบบกำจัดคลื่นพาห์ (DSB-SC Detection)	44
2.6 Frequency Shift Keying (FSK)	45
บทที่ 3 การออกแบบวงจร	48
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	57
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์	64

	หน้า
รูป 2.1 แสดงหลักการ โทรศัพท์แสง (Photo Phone) ของเบลล์	3
รูป 2.2 สายส่งแสงที่ใช้เลนส์มาวางเรียงเป็นชุด	4
รูป 2.3 ประวัติการพัฒนาเส้นใยแสงที่มีการสูญเสียต่ำ	4
รูป 2.4 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยแสง	6
รูป 2.5 แสดงผลของ NA และขนาดของ Core ที่มีต่อประสิทธิภาพ การเชื่อมต่อแสงระหว่างคันทันกับเส้นใยแสง	8
รูป 2.6 แสดงลักษณะการเดินทางของแสงใน Core ของเส้นใยแสงแต่ละชนิด	10
รูป 2.7 แสดงลักษณะการเดินทางของแสงใน GI fiber	10
รูป 2.8 แสดง Parameter ทางโครงสร้างของ Multi Mode optic fiber	13
รูป 2.9 แสดงสาเหตุต่างๆ ที่ทำให้เกิดการสูญเสียแสง	14
รูป 2.10 แสดงคุณสมบัติการสูญเสียจากการดูดแสงของเส้นใยแสงที่ทำด้วยแก้ว	15
รูป 2.11 แสดง scattering ของแสงในบรรยากาศ	17
รูป 2.12 แสดงสาเหตุต่างๆ ของการสูญเสียที่เกิดจากการต่อเส้นใยแสง	19
รูป 2.13 แสดงโครงสร้างและระดับพลังงานของอะตอม	20
รูป 2.14 แสดงระดับพลังงานและขั้นตอนของการ Transfer	21
รูป 2.15 แสดงโครงสร้างทั่วไปของ LD	22
รูป 2.16 แสดงโครงสร้าง ระดับพลังงาน และลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีการหักเหของ	23
รูป 2.17 แสดงโครงสร้างและระดับพลังงานของ LED	24
รูป 2.18 แสดง Depletion Zone	26
รูป 2.19 แสดงหลักการทำงานการรับแสงและระดับพลังงานของ PIN – PD	28
รูป 2.20 แสดงหลักการทำงานการรับแสงและระดับพลังงานของ APD	29
รูป 2.21 ความแตกต่างของการมอดูเลต	31
รูป 2.22 ความผิดเพี้ยนจากการเกิดโอเวอร์มอดูเลต	32
รูป 2.23 ความถี่ในแบบ AM	33
รูป 2.24 ผลของ AM เมื่อคลื่นพาห่มอดูเลตกับความถี่ 300-3000Hz	34
รูป 2.25 สเปกตรัมของกลุ่มคลื่นพาห้	35
รูป 2.26 การมอดูเลตคลื่นพาห้แบบต่างๆ	37
รูป 2.27 DSB-SC ในขอบเขตทางความถี่	38
รูป 2.28 SSB ในขอบเขตทางความถี่	39
รูป 2.29 การใช้สเปกตรัมเต็มแถบความถี่ของ DSB	40
รูป 2.30 สเปกตรัม SSB ซึ่งใช้ไซค์แบนด์ด้านต่ำ	40

รูป 2.31 การรบกวนกันเนื่องจากใช้ไซค์แบนด์กันคนละข้าง	41
รูป 2.32 สัญญาณขนาดเล็กและขนาดใหญ่ที่ดำเนินการ โดยการใช้ไดโอดดีเทค	42
รูป 2.33 คอสเทสตูป	44
รูป 2.34 FSK Oscillator	45
รูป 2.35 แสดงสัญญาณที่ได้จาก FSK	46
รูป 2.36 PLL-FSK demodulator	47
รูป 3.1 วงจร AM modulator	55
รูป 3.2 วงจร FSK modulator	55
รูป 3.3 วงจร AM oscillator	56
รูป 3.4 วงจร Low pass filter	56
รูป 3.5 วงจร Band pass filter	57
รูป 3.6 วงจร AM demodulator	57
รูป 3.7 วงจร FSK demodulator	58
รูป 3.8 วงจร drive LED และวงจรรับแสง	58
รูป 3.9 วงจร รวมทางภาคส่ง	59
รูป 3.10 วงจร AM Demodulatorรวม	60
รูป 3.11 วงจร FSK Demodulator ช่อง 1	61
รูป 3.12 วงจร FSK Demodulator ช่อง 2	62
รูป 4.1 สัญญาณ f_s ที่ได้จาก output ของ FSK Modulator(Ch1)	64
รูป 4.2 สัญญาณ f_m ที่ได้จาก output ของ FSK Modulator(Ch1)	65
รูป 4.3 สัญญาณ f_s ที่ได้จาก output ของ FSK Modulator (Ch2)	66
รูป 4.4 สัญญาณ f_m ที่ได้จาก output ของ FSK Modulator (Ch2)	67
รูป 4.5 สัญญาณ AM modulated signal	68
รูป 4.6 สัญญาณ modulated AM signal ที่ได้จาก low pass filter	69
รูป 4.7 สัญญาณเอาต์พุทของ FSK Demodulate 1	70
รูป 4.8 สัญญาณเอาต์พุทของ FSK Demodulate 2	71
รูป 4.9 สัญญาณเอาต์พุทของ FSK Demodulate 1 ที่ได้จาก fiber optic	72
รูป 4.10 สัญญาณเอาต์พุทของ FSK Demodulate 2 ที่ได้จาก fiber optic	73
รูป 4.11 สัญญาณเอาต์พุทของ AM Demodulate ที่ได้จาก fiber optic	74

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีของระบบการสื่อสารโทรคมนาคมมีความก้าวหน้าขึ้นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็น การสื่อสารในระบบไมโครเวฟ การสื่อสารผ่านดาวเทียม การสื่อสารผ่านเส้นใยแสง และอื่นๆ แต่ข้อแตกต่างของระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงกับระบบการสื่อสารอื่นๆ ก็คือ การที่สามารถใช้ความถี่ซึ่งเป็นทรัพยากรที่จำกัดได้อย่างเต็มที่เนื่องจากเส้นใยแสงมีแบนด์วิดท์กว้าง คุณภาพของสัญญาณที่ส่งผ่านใยเส้นใยแสงก็มีคุณภาพดีกว่าการส่งสัญญาณผ่านสายส่งที่เป็นโลหะหรือสายโคแอกเชียล เนื่องจาก มีการสูญเสียและลดทอนต่ำ ทำให้ลดการใช้สถานีทวนสัญญาณลงได้ ไม่มีการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า มีน้ำหนักเบาและขนาดเล็ก ทำให้การติดตั้งและการซ่อมบำรุงทำได้สะดวก และอื่นๆ

จากประโยชน์ของการสื่อสารด้วยเส้นใยแสงดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ทำให้ถูกนำมาใช้ในการสื่อสารด้านต่างๆ เช่น การบริการ ISDN การบริการโทรศัพท์ทางไกลภายในประเทศและระหว่างประเทศ การส่งสัญญาณโทรทัศน์ระบบเคเบิลทีวีและอื่นๆ อีกมากมาย

สำหรับโครงงานนี้ได้ทำการศึกษาทดลองการส่งสัญญาณผ่านใยแก้วนำแสง โดยจะส่งสัญญาณเสียงพูด 1 ช่อง และข้อมูลข่าวสาร(DATA) 2 ช่อง สัญญาณเสียงจะทำการมอดูเลตเชิงแอมพลิจูด (Amplitude Modulation : AM) ข้อมูลข่าวสารจะทำการมอดูเลตแบบการเลื่อนความถี่(Frequency Shift Keying : FSK) เมื่อนำสัญญาณมอดูเลตที่ได้มารวมกันแล้วนำไปควบคุมแหล่งกำเนิดแสง (light source) ให้ปล่อยแสงเป็นความเข้มต่างกันสำหรับความถี่ที่ต่างกัน(Intensity Modulation : IM)

ทางด้านรับนั้น pin diode จะทำการเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วแยกแยะสัญญาณเพื่อทำการตีเทคต่อไป

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีของระบบการสื่อสารโทรคมนาคมมีความก้าวหน้าขึ้นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็น การสื่อสารในระบบไมโครเวฟ การสื่อสารผ่านดาวเทียม การสื่อสารผ่านเส้นใยแสง และอื่นๆ แต่ข้อแตกต่างของระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงกับระบบการสื่อสารอื่นๆก็คือ การที่สามารถใช้ความถี่ซึ่งเป็นทรัพยากรที่จำกัดได้อย่างเต็มที่เนื่องจากเส้นใยแสงมีแบนด์วิดท์กว้าง คุณภาพของสัญญาณที่ส่งผ่านใยแสงก็มีคุณภาพดีกว่าการส่งสัญญาณผ่านสายส่งที่เป็นโลหะหรือสายโคแอกเชียล เนื่องจาก มีการสูญเสียและลดทอนต่ำ ทำให้ลดการใช้สถานีทวนสัญญาณลงได้ ไม่มีการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า มีน้ำหนักเบาและขนาดเล็ก ทำให้การติดตั้งและการซ่อมบำรุงทำได้สะดวก และอื่นๆ

จากประโยชน์ของการสื่อสารด้วยเส้นใยแสงดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ทำให้ถูกนำมาใช้ในการสื่อสารด้านต่างๆ เช่น การบริการ ISDN การบริการโทรศัพท์ทางไกลภายในประเทศและระหว่างประเทศ การส่งสัญญาณโทรทัศน์ระบบเคเบิลทีวีและอื่นๆอีกมากมาย

สำหรับโครงการนี้ได้ทำการศึกษาทดลองการส่งสัญญาณผ่านใยแก้วนำแสง โดยจะส่งสัญญาณเสียงพูด 1 ช่อง และข้อมูลข่าวสาร(DATA) 2 ช่อง สัญญาณเสียงจะทำการมอดูเลตเชิงแอมพลิจูด (Amplitude Modulation : AM) ข้อมูลข่าวสารจะทำการมอดูเลตแบบการเลื่อนความถี่(Frequency Shift Keying : FSK) เมื่อนำสัญญาณมอดูเลตที่ได้มารวมกันแล้วนำไปควบคุมแหล่งกำเนิดแสง (light source) ให้ปล่อยแสงเป็นความเข้มต่างกันสำหรับความถี่ที่ต่างกัน(Intensity Modulation : IM)

ทางด้านรับนั้น pin diode จะทำการเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วแยกแยะสัญญาณเพื่อทำการตีเทคต่อไป

บทที่ 2

การสื่อสารด้วยเส้นใยแสง

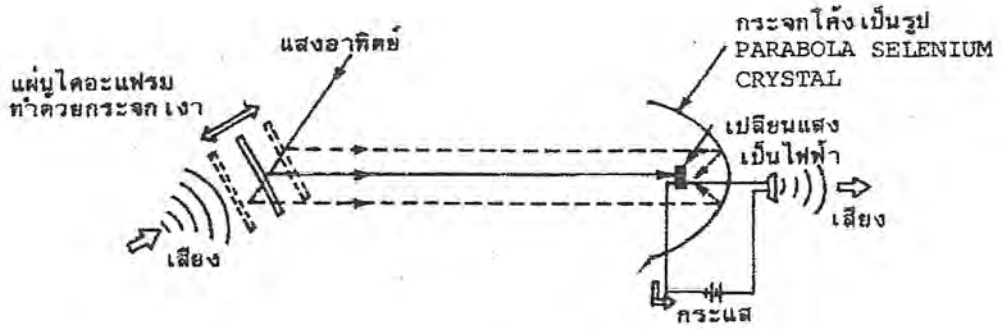
ในปัจจุบันความเจริญก้าวหน้าทางธุรกิจและการขยายตัวของสังคมเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงทำให้มีความต้องการในการแลกเปลี่ยนข้อมูลและข่าวสารเพิ่มขึ้นด้วย เพื่อเป็นการตอบสนองความต้องการนี้ทั้งในปัจจุบันและอนาคต จึงได้มีการพัฒนาระบบสื่อสารรูปแบบใหม่ขึ้นมาเรียกว่าระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสง (Optical Fiber Communication System) ซึ่งสามารถส่งข้อมูลและข่าวสารได้จำนวนมากในเวลาเดียวกัน และระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสงนี้ยังมีข้อดีอื่นๆอีกมากเมื่อเทียบกับระบบสื่อสารด้วยสายเคเบิล (Metallic Cable) ที่ใช้อยู่เดิม ในบทนี้จะกล่าวถึงประวัติ โครงสร้างและลักษณะที่พิเศษต่างๆของการสื่อสารด้วยเส้นใยแสง

2.1 ประวัติและวิวัฒนาการของการสื่อสารด้วยเส้นใยแสง

ในสมัยโบราณมนุษย์ได้คิดค้นวิธีต่างๆ ที่สามารถส่งข่าวสารให้แก่ผู้ที่อยู่ห่างไกลรับรู้ได้ แสงเป็นตัวกลางหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการสื่อสาร เช่น การใช้สัญญาณไฟ การทำให้แสงตะเกียงสว่างหรือมีการใช้สัญญาณธง และวิธีการอื่นๆ แนวความคิดเหล่านี้ก็เพื่อจุดประสงค์ในการส่งข่าวสารไปไกลๆนั่นเอง ซึ่งกระทำโดยการเปลี่ยนเนื้อหาข่าวสารที่ต้องการส่งออกไปให้อยู่ในรูปแบบต่างๆ ตามที่ได้ตกลงไว้ล่วงหน้า เช่น เปลี่ยนข่าวสารที่ต้องการส่งออกไปเป็นรูปร่างของควันไฟ หรือเปลี่ยนเป็นระลอกของแสงตะเกียงหรือวิธีการโบกธง ส่วนทางด้านรับนั้น จะใช้วิธีการแปลความหมายให้กลับเป็นข่าวสารตามเดิม โดยอาศัยข้อตกลงต่างๆตามที่ได้ตกลงไว้ วิธีการที่กล่าวมานี้จัดเป็นการสื่อสารแสงชนิดหนึ่งที่ใช้แสงธรรมชาติ

แม้ว่าจะได้มีการบันทึกของชนชาติกรีกโบราณที่กล่าวถึงเรื่องเกี่ยวกับเรื่องของแสงซึ่งสามารถเดินทางไปตามสายน้ำที่ไหลอยู่ในท่อระบายน้ำซึ่งคาดเดาก็ตาม แต่ก็ดูเหมือนว่าไม่มีใครที่ใส่ใจในเรื่องนี้อย่างจริงจังเลย จนกระทั่งในปี ค.ศ.1870 JOHN TYDAL ได้ทำการทดลองแสดงให้เห็นว่าแสงนั้นสามารถเดินทางตามสายน้ำที่เทออกมาจากภาชนะซึ่งมีแสงสว่างอยู่ภายในได้ และกล่าวกันว่าบันทึกเรื่องราวต่างๆเหล่านี้คือต้นเหตุที่มาของการคิดค้นเกี่ยวกับเส้นใยแสงในปัจจุบัน

การทดลองการสื่อสารด้วยแสงที่ใช้แสงธรรมชาติที่จะขอกกล่าวถึงในที่นี้คือ การทดลองของเบลล์ (BELL) นักประดิษฐ์ที่มีชื่อเสียงของประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ.1880 เขาได้ประดิษฐ์โทรศัพท์ใช้แสง (Photo Phone) ซึ่งใช้แสงอาทิตย์ขึ้นดังแสดงในรูป 2.1 เสียงจะถูกเปลี่ยนเป็นแสงและส่งไปได้ไกลถึง 213 เมตร และที่ทางด้านรับจะเปลี่ยนแสงกลับเป็นเสียงอย่างเดิมอีก



รูป 2.1 แสดงหลักการ โทรศัพท์แสง (Photo Phone) ของเบลล์

ต่อจากนั้นมาได้มีการประดิษฐ์ หลอดโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Tube) ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้าได้ และได้คิดวิธีการที่ทางด้านส่งจะทำการเปลี่ยนความสว่างของหลอดไฟให้เป็นไปตามสัญญาณไฟฟ้า แล้วส่งไปในอากาศ ทางด้านรับจะใช้หลอดโฟโตอิเล็กทริกเปลี่ยนแสงให้กลับเป็นสัญญาณไฟฟ้าอย่างเดิม จากวิธีการที่กล่าวมานี้จะเห็นได้ว่าการใช้แสงเพื่อส่งข่าวสารนั้น ได้มีการคิดกันมาเป็นเวลานานแล้ว แต่เนื่องจากสายส่งระหว่างจุดส่งกับจุดรับเป็นอากาศ ทำให้แสงกระจายกว้างออกไปหรือเกิดแตกกระจายออกไปหมด (Scatter) ทำให้เป็นการยากที่จะส่งออกไปในระยะทางไกลๆ ได้ วิธีการเหล่านี้จึงเป็นแต่เพียงวิธีที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้ในการสื่อสารระยะใกล้เท่านั้น

การค้นพบเส้นใยแสง

การส่งแสงผ่านอากาศนั้นไม่สามารถหลีกเลี่ยงการรบกวนของสิ่งต่างๆ เช่น ฝน หมอก และสิ่งกีดขวางต่างๆ ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีสายส่งที่มีความเชื่อถือได้สูง (Reliability) โดยที่การส่งนั้นจะไม่ถูกรบกวนจากสัญญาณภายนอกได้เลย

สายส่งสำหรับการส่งสัญญาณแสงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ระบบนำแสงไปในอากาศ เช่น การนำเลนส์มาเรียงกันเป็นชุด การใช้กระจกสะท้อนมาเรียงกันเป็นชุด การใช้ glass lens เป็นชุด เป็นต้น กับระบบสายนำแสงที่ทำด้วยไดอิเล็กทริก (Dielectric) ได้แก่ เส้นใยแสง

สารไดอิเล็กทริก เป็นสารที่นำไฟฟ้ายาก เช่น แก้ว เป็นต้น ตัวอย่างของสายส่งแสงที่เป็นระบบนำแสงไปในอากาศ แสดงในรูป 2.2 โดยการนำเอาเลนส์หรือกระจกเงาไปติดตั้งไว้เป็นระยะๆ ในท่อที่วางบนพื้นดินหรือฝังอยู่ใต้ดิน และส่งแสงผ่านไป

(Impurity) ที่มีอยู่ในแก้วออกอย่างเพียงพอแล้วจะสามารถทำให้การสูญเสียของแสงต่ำลงเหลือประมาณ 20 dB/km (เมื่อแสงเดินทางไปได้ 150 เมตร กำลังของแสงจะตกลงเหลือครึ่งหนึ่ง) บทความนี้ได้กลายเป็นสิ่งเร้ากระตุ้นให้แต่ละประเทศเริ่มต้นการวิจัยที่มุ่งจะสร้างเส้นใยแสงที่มีการสูญเสียแสงต่ำ และในปี ค.ศ.1970 บริษัท CORNING GLASS ของประเทศอเมริกาก็ประสบความสำเร็จ ในการทดลองสร้างเส้นใยแสงที่มีการสูญเสียแสงต่ำอย่างน่าอัศจรรย์สำหรับในสมัยนั้นคือมีการสูญเสียแสง 20 dB/km นับตั้งแต่นั้นมาจนถึงปัจจุบันเทคโนโลยีของเส้นใยแสงที่มุ่งพัฒนาให้เส้นใยแสงมีการสูญเสียแสงต่ำ ได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็วดังแสดงในรูป 2.3

จากรูปจะเห็นว่า การพัฒนาเส้นใยแสงให้มีค่าที่สูญนั้น ประสบผลสำเร็จรวดเร็วกว่าคือปี ค.ศ.1972 การสูญเสียลดลงเหลือ 7 dB/km ปี ค.ศ.1973 ลดลงเป็น 2.5 dB/km และในปี ค.ศ.1976 ลดลงเป็น 0.47 dB/km นอกจากนั้นในปี ค.ศ.1979 ก็สามารทำให้ลดลงเป็น 0.2 dB/km นั้นหมายความว่าในปัจจุบันสามารถผลิตเส้นใยแสงที่มีการสูญเสียแสงต่ำ จนกระทั่งเข้ามาใกล้ขีดจำกัดทางทฤษฎีของเส้นใยแสงที่ทำด้วย Silica Glass แล้ว

เส้นใยแสงที่มีการสูญเสียแสง 0.2 dB/km นี้สามารถที่จะส่งได้ไกล 15 กิโลเมตร กำลังของแสงจึงจะตกลงเป็นครึ่งหนึ่งถ้าเป็นกระจกหน้าต่างธรรมดาจะส่งได้ไม่กี่เซนติเมตร แม้แต่แก้วพวกออปติคัล (Optical glass) ก็สามารส่งได้ไกลเพียงไม่กี่เมตร ดังนั้น จะเห็นได้ว่าเส้นใยแสงมีความใสมาก

2.2 เส้นใยแสง (Optical Fiber)

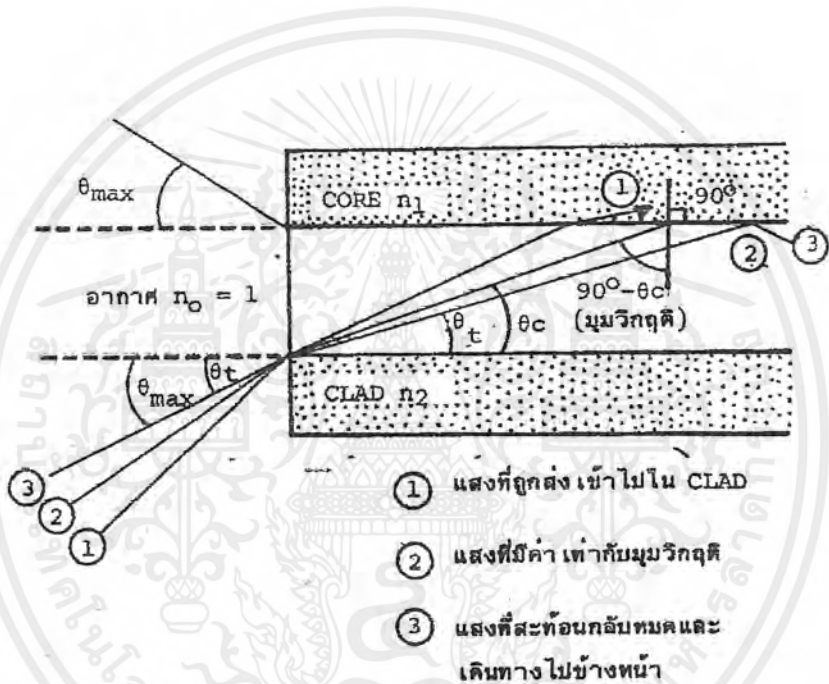
เส้นใยแสงคือ เส้นใยขนาดเล็กที่ทำหน้าที่เป็นตัวนำแสง โครงสร้างของเส้นใยแสงประกอบด้วย ส่วนที่แสงเดินทางผ่านเรียกว่า Core และส่วนที่หุ้ม Core อยู่เรียกว่า Clad ทั้ง Core และ Clad เป็น Dielectric ใส 2 ชนิด (Dielectric หมายถึงสารที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น แก้ว พลาสติก) โดยการทำให้ค่าดัชนีการหักเหของ Clad มีค่าน้อยกว่าดัชนีการหักเหของ Core เล็กน้อยประมาณ 0.2~3% และอาศัยปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดของแสง สามารถทำให้แสงที่ป้อนเข้าไปใน Core เดินทางไปได้ นอกจากนั้นเนื่องจากเส้นใยแสงมีขนาดเล็กมากขนาดเท่าเส้นผมนั้นหมายถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของ Clad ซึ่งมีขนาดประมาณ 0.1 มม. ส่วน Core ที่แสงเดินทางผ่านนั้นมีขนาดเล็กลงไปอีกคือประมาณหลาย μm ~ หลายสิบล μm ($1\mu\text{m} = 10^{-3}\text{mm}$) ซึ่งมีค่าหลายเท่า~หลายสิบลเท่าของความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ งาน ค่าต่างๆเหล่านี้เป็นค่าที่กำหนดขึ้นจากคุณสมบัติการส่งและคุณสมบัติทางเมคานิกส์ที่ต้องการ

2.2.1 ลักษณะการเดินทางของแสงภายในเส้นใยแสง

ปัญหาอันดับแรกที่ต้องคำนึงถึงก็คือ ทำอย่างไรจึงจะสามารถป้อนแสงเข้าไปใน Core ที่มีขนาดเล็กมากของเส้นใยแสงได้ และเมื่อป้อนแสงเข้าไปแล้ว แสงนั้นจะเดินทางอย่างไรใน Core ซึ่งเราจะทำการศึกษาถึงปัญหาพื้นฐานเหล่านี้

1. การป้อนเส้นใยแสง

เนื่องจากว่าแสงที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงนั้น จะกระจายกว้างออกเนื่องจากปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของแสง ในการที่จะป้อนแสงเข้าไปใน Core ที่มีขนาดเล็กมากานั้น ต้องใช้ Lens ทำการรวมแสง แต่ทว่าแสงที่รวมนั้นไม่ใช่ว่าจะถูกป้อนเข้าไปในเส้นใยแสงทั้งหมด แสงที่มีมุมตกกระทบที่เหมาะสมเท่านั้นจึงจะสามารถเข้าไปในเส้นใยแสงได้ ตามรูป 2.4 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยแสง จากรูปจะเห็นว่าที่จุดป้อนแสงของเส้นใยแสงนั้นจะเป็นจุดต่อของตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสงต่างกัน 3 ชนิด



รูป 2.4 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยแสง

ตัวกลางทั้ง 3 ชนิดนี้คือ อากาศ Core ของเส้นใยแสงและClad ของเส้นใยแสง ถ้าให้ค่าดัชนีการหักเหของแสงของตัวกลางทั้ง 3 ชนิด เป็น $n_0(n_0=1)$, n_1 และ n_2 ตามลำดับ จะเกิดการหักเห การสะท้อนกลับของแสงที่รอยต่อของอากาศกับ Core และ Core กับ Clad ในที่นี้ให้มุมรับแสงของเส้นใยแสงที่มีค่ามากที่สุดเป็น θ_{max} จากรูป 2.4 จะเห็นว่าลำแสงที่ 2 นั้นมุมรับแสงตรงรอยต่อของ Core กับ Clad นั้นมีค่าเป็นมุมวิกฤติ (Critical Angle) ตรงรอยต่อของอากาศกับ Core และของ Core กับ Clad นั้นจากกฎของ SNELL จะได้ว่า

$$\sin \theta_{max} = n_1 \sin \theta \dots\dots\dots(1)$$

$$\sin (90^\circ - \theta_c) = \cos \theta_c = n_2/n_1 \dots\dots\dots (2)$$

กรณีที่มีมุมรับแสง θ_{max} มีค่าสูงสุดได้นั้น $n_1 \cong n_2$ จากสมการ (1) และ (2) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sin^2 \theta_{\max} = (n_1^2 - n_2^2) / n_1^2$$

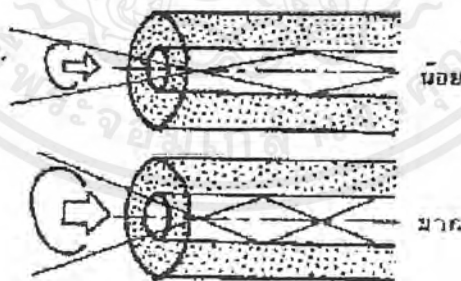
เรียกว่า อัตราส่วนของผลต่างของดัชนีการหักเหของแสง

สำหรับ $\sin \theta_{\max}$ นี้เรียกว่า Numerical Aperture เขียนย่อว่า “NA” หมายถึงขนาดของการเปิดรับให้แสงผ่าน และใช้เป็นตัวแสดงเงื่อนไขการป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยแสง นอกจากนั้นยังถือเป็นตัวประกอบพื้นฐานอันหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเชื่อมต่อแสง ระหว่างคั่นกำเนิดแสงกับเส้นใยแสงด้วย ยกตัวอย่างเช่น สมมุติว่า เส้นใยแสงมี $n_1 = 1.475$ และ $n_2 = 1.46$ (ถ้าอัตราส่วนผลต่างของดัชนีการหักเหของแสง = 1%) ในกรณีนี้มีค่า NA = 0.21 รูป 2.5 แสดงความหมายของ NA และขนาดของ Core ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเชื่อมต่อแสงระหว่างคั่นกำเนิดแสงกับเส้นใยแสง

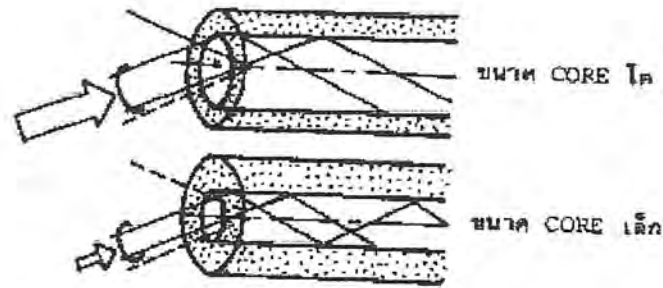
จากรูปจะเห็นว่าถ้าหากขนาดของ Core และ NA มีค่าคงที่แล้วจะกำหนดปริมาณของแสงที่ป้อนเข้าไปใน Core ได้ทันทีที่เส้นใยแสงที่มี Core ขนาดใหญ่และมีค่า NA มากจะมีประสิทธิภาพการเชื่อมต่อแสงระหว่างคั่นกำเนิดแสงกับเส้นใยแสงสูงมาก

2. การเดินทางของแสงภายในเส้นใยแสง (Propagation Mode)

แสงที่ป้อนเข้าไปในเส้นใยแสงด้วยค่าของมุมรับแสงที่อยู่ในช่วงของมุมรับแสงสูงสุดนั้นแสงจะเดินทางในเส้นใยแสงด้วยลักษณะที่เกิดการสะท้อนกลับไปมาตรงรอยต่อของ Core กับ Clad โดยที่สะท้อนกลับไปมาและเคลื่อนที่ไปข้างหน้าพร้อมกันด้วย แต่ทว่าจาก Interference ของแสง ภายใน Core นั้น มุมสะท้อนกลับที่รอยต่อจะเกิดขึ้นได้จำเป็นต้องมีเงื่อนไขที่เหมาะสม



(ก) กรณีขนาด Core โตเท่ากัน แต่ค่า NA ต่างกัน



(ข) กรณีค่า NA เท่ากันแต่ขนาด Core ต่างกัน

รูป 2.5 แสดงผลของ NA และขนาดของ Core ที่มีต่อประสิทธิภาพ การเชื่อมต่อแสงระหว่างคันทันกับเคเบิลแสงกับเส้นใยแสง

2.2.2 ชนิดของเส้นใยแสง

วิธีการแบ่งชนิดของเส้นใยแสงมีหลายวิธีกล่าวคือ แบ่งตามชนิดของสาร Dielectric ที่ใช้ แบ่งตามจำนวน Propagation Mode แบ่งตามลักษณะของดัชนีการหักเหของ Core ดังแสดงในตาราง 2.1

1. การแบ่งชนิดของเส้นใยแสงตามชนิดของ Dielectric

สามารถแบ่ง Dielectric ที่ใช้ทำเส้นใยแสงได้เป็น 3 ชนิด คือ

(1) Silica glass optic fiber ซึ่งใช้ Dielectric ที่เป็น Silica glass หรือใช้ Silica (SiO_2) ที่บริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ แล้วยังใช้สารอื่นเติมลงไปเพื่อทำให้ค่าดัชนีการหักเหเปลี่ยนแปลงตามต้องการ สารอื่นที่เติมลงไปนี้เรียกว่า Dopant ได้แก่ Germanium (Ge), Boron (B), Fluorine (F) เป็นต้น

(2) Multi component glass optic fiber ซึ่งใช้ Dielectric ที่เป็นแก้วหลายชนิดปนกัน ส่วนมากจะใช้ Soda Calcium, แก้ว, แก้วที่มี Boron และ Silicon ผสม และอื่นๆเป็นสารหลัก ส่วน Dopant ได้แก่ โซเดียม (Na), แคลเซียม (Ca)

(3) Plastic optic fiber ซึ่งใช้ Dielectric ที่เป็นพลาสติก จำพวก Silicon Resin, Acryl Resin (เช่น Polymethyl Methacrylate : PMMA)

สำหรับเคเบิลเส้นใยแสงที่ใช้ในข่ายการสื่อสารโทรคมนาคม (Telecommunication Network) นั้น นิยมใช้ Silica glass optic fiber เพราะมีข้อดีคือ การสูญเสีย (loss) ต่ำและคุณสมบัติการส่ง (Transmission Characteristic) คงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

แต่สำหรับงานที่ต้องการคุณสมบัติการส่งด้อยลงมา ใช้งานง่าย (ต่อง่าย หักยากแม้จะงอเส้นใยแสงมากๆ เป็นต้น) และใช้กับการสื่อสารระยะทางใกล้ ใช้กับการเดินสายในรถยนต์ (Wire Harness) และอื่นๆ ในกรณีนี้นิยมใช้ เส้นใยแสงที่เป็น Plastic optic fiber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตาราง 2.1 การแบ่งชนิดของเส้นใยแสง

แบ่งตามชนิดของสาร Dielectric ที่ใช้	Silica glass optic fiber
	Multi component glass optic fiber
	Plastic optic fiber
แบ่งตามจำนวน Propagation mode	Single Mode optic fiber
	Multi Mode optic fiber
แบ่งตามลักษณะของ ดัชนีการหักเหของ Core	Step Index optic fiber
	Graded Index optic fiber

2. การแบ่งชนิดของเส้นใยแสงตามจำนวน Propagation mode

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ Single Mode optic fiber ใช้ชื่อย่อว่า SM fiber และอีกชนิดหนึ่งคือ Multi Mode optic fiber

3. การแบ่งชนิดของเส้นใยแสงตามลักษณะของดัชนีการหักเห

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหคือ

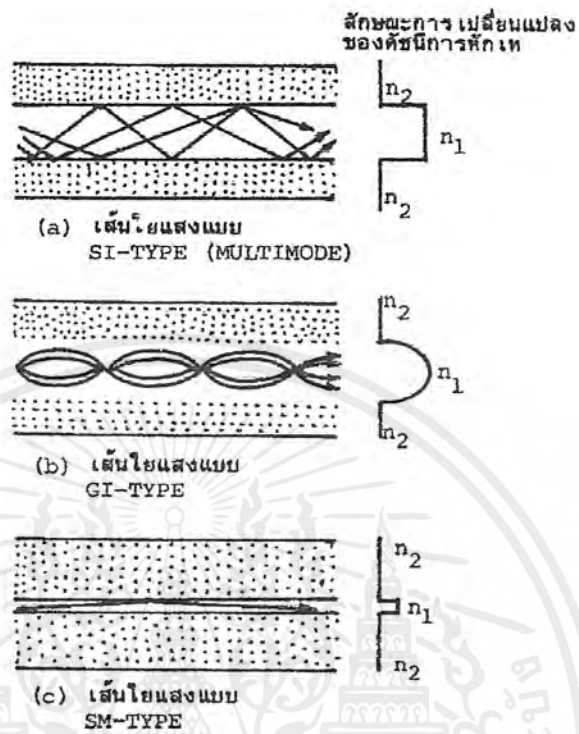
(1) Step Index optic fiber (SI fiber) เป็นเส้นใยแสงที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหระหว่าง Core กับ Clad เป็นลักษณะขั้นบันได (Step) จึงเรียกว่า Step Index optic fiber

(2) Graded Index optic fiber (GI fiber) เป็นเส้นใยแสงที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหระหว่าง Core กับ Clad ค่อยๆลดลงทีละน้อย ต่างกับ (1) จึงเรียกว่า Graded Index optic fiber

ชพ
๒๕๖๓
๒๕๖๓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ

๐๕18๐๘



รูป 2.6 แสดงลักษณะการเดินทางของแสงใน Core ของเส้นใยแสงแต่ละชนิด



รูป 2.7 แสดงลักษณะการเดินทางของแสงใน GI fiber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SM fiber นั้นจัดอยู่ในพวกของ SI fiber เหมือนกันแต่ว่าเนื่องจากจุดประสงค์ต้องการให้เป็น Single Mode จึงทำให้อัตราส่วนผลต่างของค่าดัชนีการหักเหของ Core และ Clad มีค่าน้อยมาก จึงแบ่งชนิดแยกออกมาต่างหาก ดังนั้นในกรณีที่เรียกว่า SI fiber นั้น โดยทั่วไปจะหมายถึง Multi Mode optic fiber ที่มีผลต่างของดัชนีการหักเหเปลี่ยนแปลงเป็นขั้นบันได (Step) ลักษณะการเดินทางของแสงภายใน Core ของเส้นใยแสงแต่ละชนิดแสดงดังรูป 2.6 GI fiber เป็นเส้นใยแสงที่จัดทำขึ้นเป็นพิเศษเพื่อการส่ง Multi Mode รูป 2.7 แสดงถึง propagation mode ของ GI fiber

จากรูป 2.7 จะเห็นว่า ค่าดัชนีการหักเหของ GI fiber นี้จะค่อยๆ ลดลงทีละน้อยในแนวรัศมีของเส้นใยแสง ดังนั้นลำแสง (1) ที่มี Mode ต่ำและเดินทางในระยะทางสั้นนั้น จะสะท้อนกลับก่อนที่จะเดินทางไปถึงรอยต่อของ Core และ Clad ซึ่งกล่าวได้ว่าส่วนใหญ่จะผ่านส่วนที่มีค่าดัชนีการหักเหสูงของ Core ส่วนลำแสงที่มี Mode สูง และเดินทางในระยะทางไกลนั้น ส่วนใหญ่จะผ่านส่วนที่มีค่าดัชนีการหักเหต่ำของ Core อนึ่งความเร็วในการเดินทางของแสงนั้นจะเป็นสัดส่วนกลับกับค่าดัชนีการหักเห ดังนั้นสำหรับ Propagation Mode (1) และ (2) นั้นโดยการเลือกลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเห (เรียกว่า Profile) ให้เหมาะสมแล้ว เราจะทำให้เวลาที่ใช้ในการเดินทางในระยะทางอันหนึ่งของ Propagation Mode (1) และ (2) มีค่าเท่ากันได้ด้วยจุดประสงค์อันนี้ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีการหักเหที่เหมาะสมที่สุด เพื่อทำให้ผลต่างของเวลาการเดินทางระหว่าง Propagation Mode ต่างๆ มีค่าน้อยที่สุดได้นั้น กล่าวกันว่าจะต้องมีรูปร่างเป็นลักษณะพาราโบลา (Parabola) ดังนั้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีการหักเหของ GI fiber จึงต้องทำให้มีรูปร่างดังแสดงในรูป 2.7

2.2.3 โครงสร้างของเส้นใยแสง

องค์ประกอบพื้นฐานที่จะกำหนดรูปร่างของเส้นใยแสงคือ เส้นผ่านศูนย์กลางของ Core, เส้นผ่านศูนย์กลางของนอก (เส้นผ่านศูนย์กลางของ Clad), Numerical Aperture (NA) และอื่นๆ องค์ประกอบเหล่านี้เรียกว่าเป็น parameter ทางโครงสร้างของเส้นใยแสง parameter ทางโครงสร้างเหล่านี้นอกจากจะมีผลต่อการสูญเสีย, transmission bandwidth, ความแข็งแรงทางเมคานิกและคุณสมบัติอื่นๆ ของเส้นใยแสงแล้ว ยังเป็นองค์ประกอบสำคัญสำหรับการเชื่อมต่อของเส้นใยแสงกับเส้นใยแสง หรือการต่อของเส้นใยแสงกับอุปกรณ์แสง (Optical Device) อีกด้วย นอกจากนี้ยังมี parameter ประกอบทางโครงสร้างเพิ่มเติมอีกได้แก่ เปอร์เซ็นต์การคลาดเคลื่อนของศูนย์กลาง (Eccentricity), อัตราความเพี้ยนของวงกลม (Non-circular rate) สำหรับ parameter ประกอบนี้จะไม่ผลอะไรทางด้านคุณสมบัติการส่ง (Transmission Characteristic) แต่ทว่ามันจะมีผลอย่างมากต่อการสูญเสียของการต่อ (Connection loss) ของเส้นใยแสง

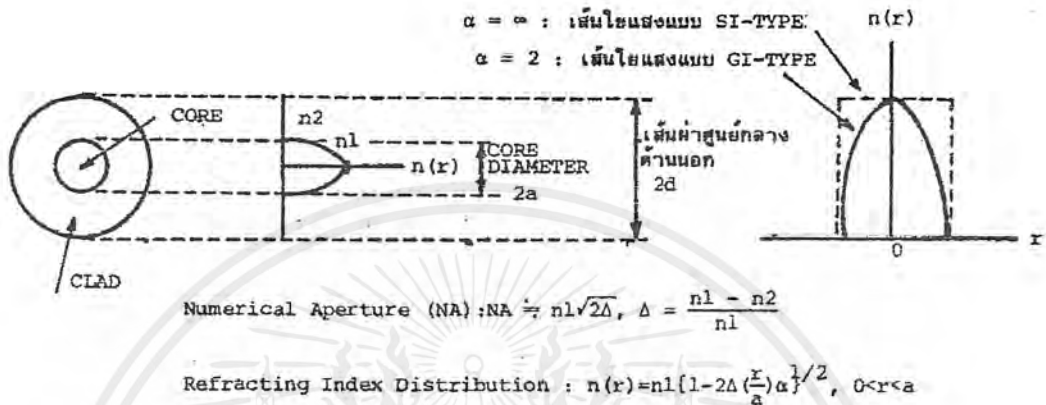
ตาราง 2.2 ค่ามาตรฐานของ Parameter ทางโครงสร้างของเส้นใยแสงที่ CCITT แนะนำ

Parameter	Graded Index optic fiber	Single Mode optic fiber
ความยาวคลื่นที่ใช้	(a) 0.85 μm (b) 1.30 μm	(a) 1.30 μm (b) 1.55 μm
เส้นผ่านศูนย์กลางของ Core	50 $\mu\text{m} \pm 6\%$	—
เส้นผ่านศูนย์กลางของ Mode Field	—	9 ~ 10 $\mu\text{m} \pm 10\%$
Cut off wave length	—	1.10 ~ 1.28 μm (1)
เส้นผ่านศูนย์กลางนอก	1.25 $\mu\text{m} \pm 2.4 \%$	125 $\mu\text{m} \pm 2.4\%$
เปอร์เซ็นต์การคลาดเคลื่อนของศูนย์กลาง	< 6%	0.5 ~ 3.0 μm
อัตราความเพี้ยนของวงกลมของ Core	< 6%	
อัตราความเพี้ยนของวงกลมของ Clad	< 2%	< 2%
Numerical Aperture (NA)	(a) 0.18 ~ 0.24 ± 0.02 (0.85 μm) (b) 0.15 ~ 0.30 ± 0.02 (1.3 μm)	(2)

หมายเหตุ : (1) CCITT กำลังพิจารณาอยู่

(2) ถ้าบอกเส้นผ่านศูนย์กลางของ Mode Field และ Cut off wave length แล้วไม่จำเป็นต้องบอกค่า NA

ตัวอย่างเช่น ในการกำหนดโครงสร้างของเส้นใยแสงชนิด Multi Mode optic fiber จะต้องอาศัย Parameter 4 อัน คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของ Core, เส้นผ่านศูนย์กลางนอก, Numerical Aperture (NA) และ ลักษณะของค่าดัชนีการหักเห ดังแสดงในรูป 2.8



รูป 2.8 แสดง Parameter ทางโครงสร้างของ Multi Mode optic fiber

ในการกำหนดค่าต่างๆของ Parameter ทางโครงสร้างทั้ง 4 เหล่านี้จำเป็นต้องคำนึงถึงผล Parameter ทางโครงสร้างแต่ละอันที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆของเส้นใยแสง, การสร้างได้ง่ายและความประหยัด

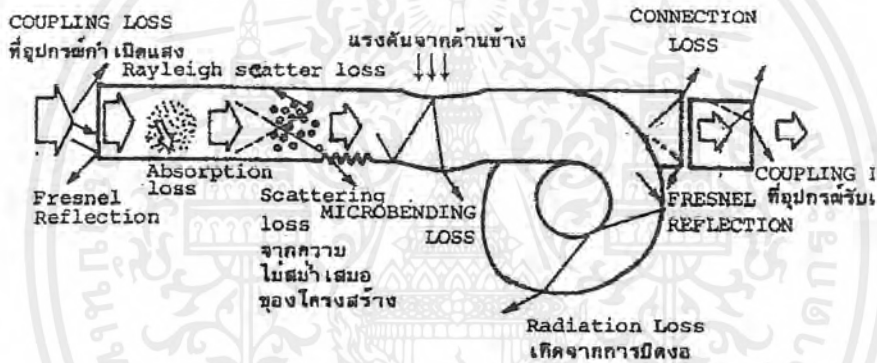
สำหรับโครงสร้างของ Single Mode optic fiber จะกำหนดจาก Parameter 3 อัน คือเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของ Mode Field, เส้นผ่านศูนย์กลางนอก และ Cut off wave length ซึ่งต่างกับกรณีของ Multi Mode optic fiber ที่กล่าวมาแล้ว สาเหตุที่ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของ Mode Field เป็น Parameter ทางโครงสร้างของ Single Mode optic fiber แทนการใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของ Core นั้นก็คือว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของ Mode Field มีค่ามาก

กล่าวคือเป็นค่าเส้นผ่านศูนย์กลางตรงจุดที่ความเข้มของแสงลดลงเป็น $1/e$ (e ในที่นี้มีค่า 2.71828) ของค่าสูงสุด (คือค่าตรงจุดศูนย์กลางของ Core) และค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของ Core ของ Single Mode optic fiber มีค่าน้อยยิ่งกว่านั้นอัตราส่วนของผลต่างของค่าดัชนีการหักเหก็มีค่าน้อยด้วย ทำให้เป็นการยากที่จะบ่งบอกส่วนที่เป็นรอยต่อของ Core กับ Clad ได้ชัดเจน ด้วยเหตุนี้เพื่อความสะดวกจึงใช้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของ Mode Field แทนค่ามาตรฐานของ Parameter ทางโครงสร้างของเส้นใยแสงที่ CCITT แนะนำ

2.2.4 การสูญเสียแสงในเส้นใยแสง

ในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสง มีองค์ประกอบสำคัญ 2 อันที่จะกำหนดความเร็วในการส่ง (Transmission Speed) และระยะห่างของการถ่ายทอคสัญญาณ (Repeater Span) องค์ประกอบเหล่านั้นคือ การสูญเสียแสง กับ band width ของการส่ง (transmission band width) การสูญเสียแสง (optical loss) เป็นตัวบ่งชี้ให้ทราบว่า กำลังของแสงที่เดินทางไปในเส้นใยแสงนั้นจะลดลงไปจากเดิมเท่าไร ซึ่งการสูญเสียแสงนี้ยังมีค่าน้อยเท่าไรจะทำให้สามารถส่งสัญญาณแสงได้ไกลมากยิ่งขึ้น

การสูญเสียแสง แบ่งออกตามความแตกต่างของโครงสร้างที่เกิดขึ้นได้เป็น การสูญเสียที่มีอยู่ในตัวของเส้นใยแสงเอง (fixed loss) และการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นมา (additional loss) เมื่อตอนนำเส้นใยแสงไปใช้ในระบบการสื่อสาร สาเหตุที่ทำให้เกิดการสูญเสียแสง แสดงดังรูป 2.9



รูป 2.9 แสดงสาเหตุต่างๆ ที่ทำให้เกิดการสูญเสียแสง

การสูญเสียแสงที่เกิดจากตัวเส้นใยแสงเอง (Fixed loss) เกิดจากสาเหตุต่างๆ ดังนี้

1. การดูดแสงของแก้ว (Absorption loss)
2. การกระจัดกระจายของแสงแบบเรย์ลี (Rayleigh Scattering loss)
3. การกระจัดกระจายของแสงเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้าง (Ununiformity loss)

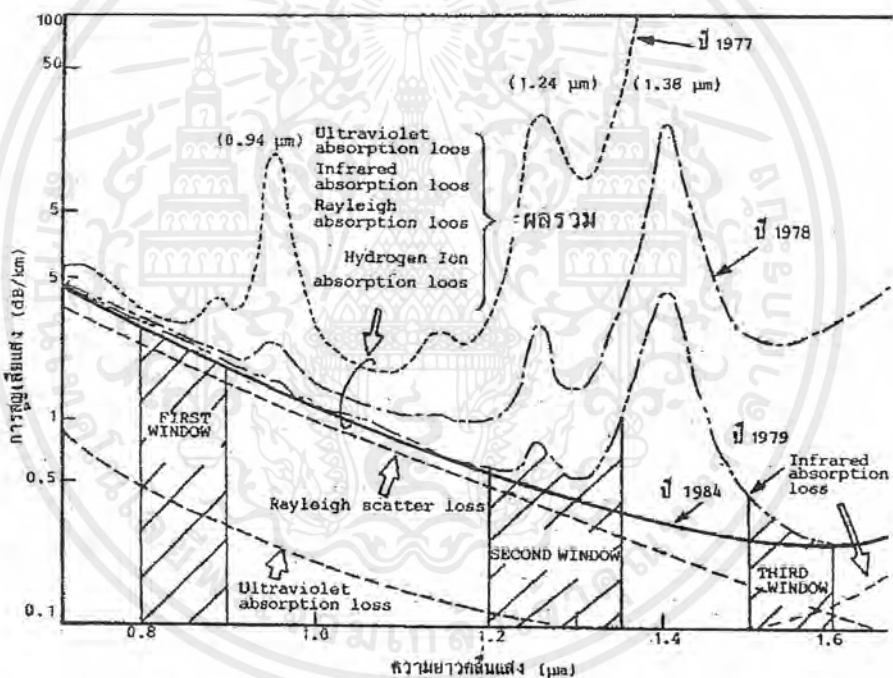
การสูญเสียแสงที่เพิ่มขึ้นมาจากการนำไปใช้งาน (Additional loss) มีดังนี้

1. การโค้งงอของเส้นใยแสง (Bending loss)
2. การโค้งงอแบบ Microbending (Microbending loss)
3. การเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์กำเนิดแสงหรืออุปกรณ์รับแสงกับเส้นใยแสง (Coupling loss)
4. การต่อเส้นใยแสง (Connection loss)

1. การสูญเสียแสงที่เกิดจากการดูดแสง (Absorption loss)

การสูญเสียแสงที่เกิดจากการดูดแสงนี้ เป็นลักษณะทำนองเดียวกันกับม่านสีดำที่ดูดแสงได้ดี กล่าวคือ สารที่ใช้ผลิตเส้นใยแสงเองนั้นจะเป็นตัวดูดแสงที่เดินทางในเส้นใยแสง แล้วเปลี่ยนเป็นการสูญเสียทางความร้อนโดยทั่วไป แล้วจะมีการดูดแสงอันเนื่องมาจากแก้วเอง (สารที่ใช้ผลิตเส้นใยแสง) และเนื่องมาจากสารอื่นที่เจือปนอยู่ในแก้ว (Impurity)

สำหรับการสูญเสียจากการดูดแสงของแก้วนั้น มันจะดูดแสง Ultraviolet กับแสง Infrared การดูดแสง Ultraviolet นั้นจะดูดมากที่สุดที่ความยาวคลื่นใกล้กับ $0.1 \mu\text{m}$ และการดูดแสง Infrared จะดูดมากที่สุดที่ความยาวคลื่นใกล้กับ $10 \mu\text{m}$ ส่วนที่ความยาวคลื่นอื่นๆนั้น การสูญเสียจากการดูดแสงจะลดลงอย่างมาก ดังแสดงในรูป 2.10 จะเห็นว่าจากความยาวคลื่นประมาณ $1.0 \mu\text{m}$ ไปจนถึงประมาณ $1.6 \mu\text{m}$ การสูญเสียจะตกลงเป็นเสมือนหุบเขา (Valley)



รูป 2.10 แสดงคุณสมบัติการสูญเสียจากการดูดแสงของเส้นใยแสงที่ทำด้วยแก้ว

การสูญเสียจากการดูดแสงอันเนื่องมาจากสารแปลกปลอม (Impurity) ปนอยู่นั้น ในตอนแรกทีพัฒนาเส้นใยแสงใหม่นั้นปรากฏว่า ส่วนใหญ่เป็น ION ของโลหะต่างๆ เช่น ION ของเหล็ก ION ของทองแดงและอื่นๆ แต่ต่อมาเทคนิคในการทำให้การสูญเสียแสงต่ำลง ได้พัฒนาไปมาก สามารถกำจัด ION ของโลหะต่างๆออกไปได้ ในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็น Hydroxyl ION (OH-) นั่นคือกล่าวได้ว่าประวัติศาสตร์ของการทำให้การสูญเสียแสงที่มีอยู่ในเส้นใยแสงให้มีค่าน้อยนั้น เป็นการกำจัด Absorption loss อันเนื่อง

จาก ION ของโลหะและ Hydroxyl ION เหล่านี้แน่นอนในรูปแบบ 2.10 จะเห็นว่าการสูญเสียแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ของแสงในเส้นใยแสงที่ทำด้วยแก้ว ตัวเลข ค.ศ. ที่ค่าสูญเสียสูงสุดต่างข้านั้นบอกให้ทราบถึงประวัติศาสตร์ของการทำให้การสูญเสียแสงน้อยลง ค่าสูญเสียแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น $0.94 \mu\text{m}$, $1.24 \mu\text{m}$ และ $1.38 \mu\text{m}$ นั้นเป็นการสูญเสียที่เกิดจากการดูดของ Hydroxyl ION ที่กล่าวมาข้างต้น และส่วนตรงที่เป็นหุบเขา (เรียกว่า Window ของเส้นใยแสง) บริเวณใกล้เคียงกับความยาวคลื่น $0.85 \mu\text{m}$, $1.35 \mu\text{m}$ และ $1.55 \mu\text{m}$ (เรียกว่า Window ที่ 1, ที่ 2, ที่ 3) นั้นมีการสูญเสียแสงต่ำ ซึ่งนำมาใช้ในการสื่อสารด้วยเส้นใยแสง

2. การสูญเสียแสงที่เกิดจากการกระจัดกระจายแสงแบบเรย์ลี (Rayleigh Scattering loss)

การสูญเสียแบบนี้เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น เมื่อแสงไปกระทบกับวัตถุที่มีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่น แล้วทำให้แสงนั้นแตกกระจัดกระจายออกไปในทิศทางต่างๆ ตัวอย่างของปรากฏการณ์เช่นนี้ แสดงดังรูป 2.11 คือการที่เรามองเห็นท้องฟ้าเป็นสีน้ำเงิน, และมองเห็นท้องฟ้าเป็นสีแดงตอนตะวันตกดินนั้น เกิดจากการแตกกระจัดกระจายของแสง ผู้ที่ทำการอธิบายปรากฏการณ์การแตกกระจัดกระจายของแสงนี้คือนักฟิสิกส์ชื่อ Rayleigh ดังนั้นจึงใช้ชื่อของเขาเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Rayleigh Scattering

สำหรับการผลิตเส้นใยแสงนั้น ทำได้โดยการให้ความร้อนประมาณ $2,000^{\circ}\text{C}$ แก่แท่งแก้วซึ่งเรียกว่า Preform ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจากหลายมิลลิเมตร ไปจนถึงหลายสิบลมิลลิเมตร จากนั้นจึงทำการดึงแท่งแก้วให้เป็นเส้นใยแสงขนาดเล็ก และในตอนนี้ต้องทำให้เส้นใยแสงนั้นมีอุณหภูมิลดลงจาก $2,000^{\circ}\text{C}$ เป็นอุณหภูมิห้องประมาณ 20°C อย่างรวดเร็ว โดยการทำเช่นนี้จะทำให้ความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นที่เกิดขึ้นตอนให้ความร้อน $2,000^{\circ}\text{C}$ (หรือนั่นคือ ความไม่สม่ำเสมอของค่าดัชนีการหักเห) ตกค้างอยู่อย่างนั้นในเส้นใยแสง และเป็นสาเหตุทำให้เกิด Rayleigh Scattering ขึ้นในเส้นใยแสง จัดเป็นสาเหตุการเกิดการสูญเสียแสงที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในขั้นตอนการผลิต ถือเป็น การสูญเสียแสงที่มีประจำอยู่ในตัวของเส้นใยแสง ขนาดของ Rayleigh Scattering loss จะเป็นสัดส่วนกลับกับความยาวแสงยกกำลัง 4 ด้วยเหตุนี้ จะเห็นว่าในรูป 2.11 ความยาวของคลื่นแสงที่เดินทางยังมีค่ามาก Rayleigh Scattering จะมีค่าน้อยลง ยกตัวอย่างเช่น เมื่อความยาวคลื่นเป็น $1 \mu\text{m}$ ค่า Rayleigh Scattering loss จะมีค่าประมาณ 1 dB/km และเมื่อความยาวคลื่นเป็น $1.6 \mu\text{m}$ ค่า Rayleigh loss จะมีค่าประมาณ 0.1 dB/km



รูป 2.11 แสดง scattering ของแสงในบรรยากาศ

นอกจากนั้นขนาดของ Rayleigh Scattering ยังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิในตอนที่ทำการดึง Preform ให้เป็นเส้นใยแสง ถ้าหากสามารถทำให้อุณหภูมิต่ำลงได้ Rayleigh Scattering loss จะน้อยลง ยกตัวอย่างเช่นอุณหภูมิความร้อนที่ใช้ในการดึง glass fiber ที่มีสาร Fluoride ปนอยู่มีค่าประมาณ 700°C ทำให้ Rayleigh Scattering loss มีค่าเป็น $1/3$ ของ glass fiber ธรรมดา ยิ่งกว่านั้นสำหรับ glass fiber ที่มีสาร Fluoride ปนอยู่ยังทำให้การสูญเสียแสงที่เกิดจากการดูดแสง Infrared เลื่อนต่ำออกไปในย่านที่มีความยาวคลื่นมากขึ้นดังแสดง window ที่ 3 ของรูป 2.10 จากข้อคิดอื่นนี้ร่วมกับ Rayleigh Scattering loss ที่มีค่าต่ำดังกล่าวข้างบน ทำให้สามารถได้เส้นใยแสงที่มีการสูญเสียต่ำมาก คือประมาณ 10^{-3} dB/km ($= 0.01$ dB/km)

3. การสูญเสียจากการกระจายแสง เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในเส้นใยแสง (Ununiformity loss)

สำหรับเส้นใยแสงที่สร้างมาจริงๆนั้น จากสาเหตุต่างๆในการสร้างทำให้ไม่สามารถได้เส้นใยแสงที่มีลักษณะกลม 100% นอกจากนั้น Core และ Clad ที่ประกอบกันเป็นเส้นใยแสงก็ไม่สามารถทำให้ได้ลักษณะรูปทรงกระบอกที่สม่ำเสมออย่างสมบูรณ์ ตลอดความยาวของเส้นใยแสงได้ กล่าวคือ ตรงรอยต่อของ Core กับ Clad นั้นจะไม่สม่ำเสมอตลอด กล่าวคือจะมีลักษณะคล้ายถนนขรุขระ เมื่อมีรอยต่อไม่เรียบสม่ำเสมอเช่นนี้จะทำให้เกิดการกระจายของแสงดังในรูป 2.9 ทำให้แสงบางส่วนไม่สามารถเดินทางไปใน Core ได้จะกระจายออกไปข้างนอก ดังนั้นรอยต่อที่ไม่เรียบสม่ำเสมอจะทำให้แสง

ที่เดินทางเกิดการสะท้อนกลับอย่างสะเปะสะปะทำให้การสูญเสียแสงเพิ่มขึ้น การสูญเสียแสงเช่นนี้เรียกว่า การสูญเสียจากการกระจัดกระจายแสงอันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในเส้นใยแสง

4. การสูญเสียจากการกระจายแสงอันเนื่องมาจากการงอโค้งของเส้นใยแสง (Bending loss)

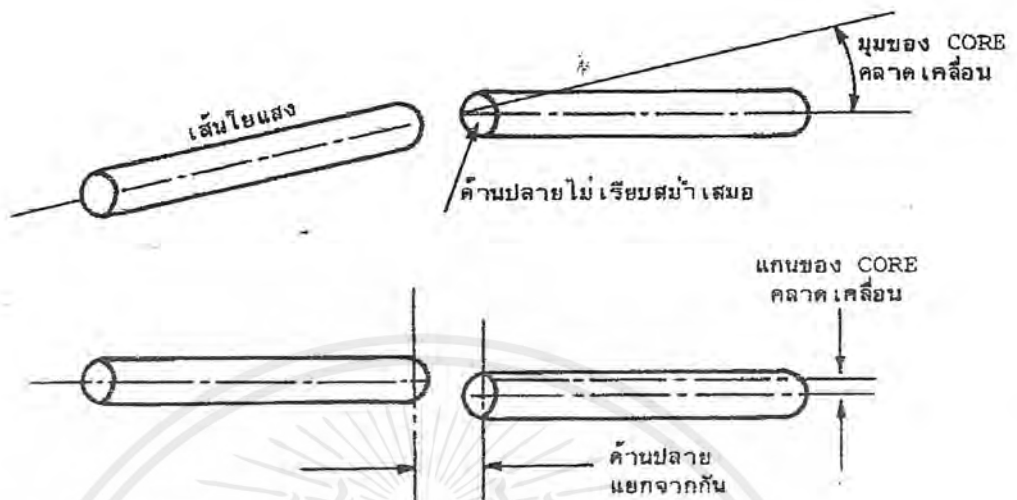
เป็นการสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อเส้นใยแสงถูกทำให้งอโค้งไป สำหรับการงอโค้งเส้นใยแสงดังแสดง ในรูป 2.9 แสงที่มีมุมงอโค้งมากกว่ามุมวิกฤตแล้ว แสงนั้นจะกระจายออกไปนอก Core ทำให้เกิดการสูญเสียเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสง จะต้องระมัดระวังอย่าให้เกิดมีการงอเส้นใยแสงเป็นส่วนโค้งที่มีรัศมีเกินกว่ารัศมีที่ยอมให้งอโค้งได้ เช่นไม่เกิน 40 ม.ม. เป็นต้น

5. การสูญเสียที่เกิดจากการงอโค้งแบบ Micro bending

เป็นการสูญเสียที่เกิดจากการที่มีแรงกดที่ไม่สม่ำเสมอมากระทำต่อด้านข้างของเส้นใยแสง ทำให้แกนของเส้นใยแสงบิดงอไปเล็กน้อย (ประมาณ $2.3 \mu\text{m}$) เป็นเหตุให้การสูญเสียเพิ่มขึ้น การสูญเสียนี้เรียกว่า Micro bending loss ด้วยเหตุนี้ในการออกแบบโครงสร้างเส้นใยแสงจะต้องทำการป้องกันแรงกดจากทางด้านข้าง เช่นทำชั้น (Layer) ป้องกันการกระแทกหุ้มเส้นใยแสง เป็นต้น

6. การสูญเสียที่เกิดจากการต่อเส้นใยแสง (Connection loss)

การต่อเส้นใยแสงนั้นคล้ายกับการต่อท่อของน้ำประปาหรือท่อแก๊ส กล่าวคือต้องต่อเข้ากันอย่างดี ไม่ให้น้ำประปาหรือแก๊สที่อยู่ข้างในท่อรั่วออกไปข้างนอก กรณีที่ทำการต่อเส้นใยแสง 2 เส้นเข้าด้วยกันนั้น อันดับแรกจำเป็นต้องทำการปรับ Core ทั้งสองที่แสงเดินทางผ่านให้ตรงกันพอดี ถ้าหากว่า Core ทั้งสองต่อกันไม่สนิทอย่างสมบูรณ์นั้น แสงที่ออกจาก Core ด้านหนึ่งบางส่วนของมันจะไม่เข้าไปใน Core อีกด้านหนึ่ง แต่จะกระจายออกไปข้างนอกทำให้เกิดการสูญเสีย สาเหตุการเกิดการสูญเสียอย่างนี้แสดงในรูป 2.12 กล่าวคือมีทั้งการคลาดเคลื่อนของแกนของ Core และอื่นๆ แต่สำหรับการสูญเสียในส่วนใหญ่มักจะมาจากคลาดเคลื่อนของแกนของ Core อนึ่งตรงส่วนที่ทำการต่อนั้น กรณีที่มีช่องว่าง (Gap) เพียงเล็กน้อยจะทำให้เกิดการสูญเสียจากการสะท้อนกลับถ้าหากช่องว่างโตมากขึ้นกว่านี้ จะเกิดการสะท้อนกลับที่เรียกว่า Fresnel Reflection



รูป 2.12 แสดงสาเหตุต่างๆ ของการสูญเสียที่เกิดจากการต่อเส้นใยแสง

7. การสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างเส้นใยแสงกับอุปกรณ์กำเนิดแสงและอุปกรณ์รับแสง (Coupling loss)

แสงที่ปล่อยออกจากอุปกรณ์ต้นกำเนิดแสงนั้น มีเงื่อนไขในการที่จะป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยแสง นั่นคือค่า NA (Numerical Aperture) กรณีที่ใช้อุปกรณ์ต้นกำเนิดแสงได้แก่ Laser Diode (LD) หรือ Light Emitting Diode (LED) จะมีความแตกต่างกันทางความกว้างของลำแสงที่ปล่อยออกมาจากต้นกำเนิดแสง ถึงแม้จะใช้เลนส์รวมแสงแล้วก็ตาม LD จะมีการสูญเสียของการเชื่อมต่อแสงน้อยกว่า นอกจากนั้น โครงสร้างของเส้นใยแสงที่จะถูกป้อนแสงเข้าไปนั้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Core ของเส้นใยแสงแบบ SM และแบบ GI จะมีค่าต่างกันทำให้ขนาดของการสูญเสียของการเชื่อมต่อแสงมีค่าต่างกันไปด้วย

เกี่ยวกับการสูญเสียของการเชื่อมต่อแสงระหว่างเส้นใยแสงกับอุปกรณ์รับแสงนั้น เส้นใยแสงที่มี NA มาก นั่นคือแสงที่ออกจากเส้นใยแสงแบบ GI จะมีลำแสงที่ออกจากเส้นใยแสงแบบ SM ทำให้การสูญเสียแสงมีมากกว่า

2.3 แหล่งกำเนิดแสง (Light Source)

เส้นใยแสงถ้าหากเปรียบเทียบกับอวัยวะในร่างกายของคนเราแล้ว สามารถกล่าวได้ว่ามันทำหน้าที่ที่เป็นเสมือนเส้นโลหิต และแสงที่เดินทางในเส้นใยแสงเปรียบเสมือนโลหิตที่ไหลในเส้นโลหิตนั่นเอง ส่วนที่ทำหน้าที่เป็นเหมือนหัวใจซึ่งผลิตแสง (โลหิต) ออกมาได้แก่อุปกรณ์กำเนิดแสง (ตัวเปลี่ยนไฟฟ้า --> แสง) ซึ่งจะกล่าวถึง โครงสร้างและการทำงานในการเปลี่ยนไฟฟ้าเป็นแสงต่อไป

2.3.1 โครงสร้างของการกำเนิดแสง

โดยทั่วไปแล้วอะตอม (Atom) ที่ประกอบอยู่ในสารต่างๆ (ก๊าซ, ของเหลว, ของแข็ง) จะมีโครงสร้างดังรูป 2.13 นั่นคือมีส่วนที่เป็น Nucleus อยู่ตรงกลางและรอบๆ Nucleus จะมีอิเล็กตรอน (Electron) จำนวนหนึ่งหมุนอยู่รอบ Nucleus โดยมีระยะห่างที่แน่นอน

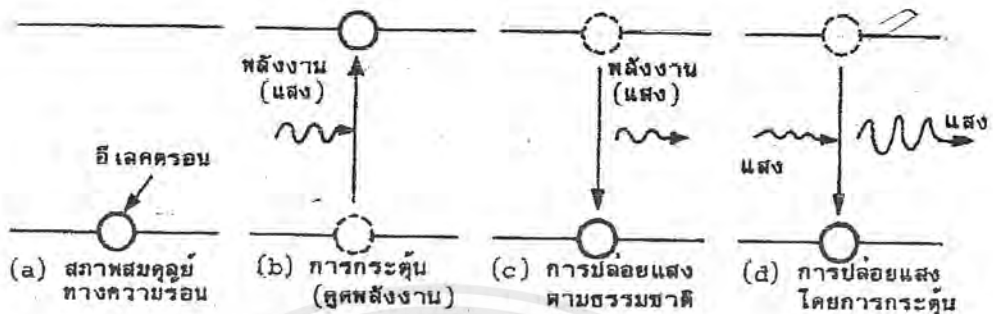


รูป 2.13 แสดงโครงสร้างและระดับพลังงานของอะตอม

อิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีพลังงานที่เป็นสัดส่วน กับระยะทางจาก Nucleus (พลังงานนี้เรียกว่าระดับพลังงานหรือ Energy Level) ระดับพลังงานที่อยู่ต่ำสุดเรียกว่า Ground State Level และระดับพลังงานที่สูงกว่านี้เรียกว่า Stimulated Level จำนวนอิเล็กตรอนที่มีอยู่ในระดับพลังงานนั้นจะมีจำนวนแน่นอนขึ้นอยู่กับชนิดของสาร แต่โดยปกติแล้วอิเล็กตรอนจะออกันอยู่ที่ระดับพลังงานต่ำ อันนี้เป็นคุณสมบัติโดยธรรมชาติของอิเล็กตรอน

สมมุติว่ามีอิเล็กตรอนอยู่ในระดับพลังงาน 1 (ระดับพลังงานต่ำ) และไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ในระดับพลังงาน 2 (ระดับพลังงานสูง) เลขดังรูป 2.14(a) ในสภาวะนี้ถ้าหากให้พลังงานที่มีค่าเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานทั้งสอง (นั่นคือถ้า E_1 เป็นพลังงานของระดับพลังงาน 1 และ E_2 เป็นพลังงานของระดับพลังงาน 2 จะได้ผลต่างเป็น $E_2 - E_1$) แล้วอิเล็กตรอนจะดูดเอาพลังงานนี้และจะเลื่อนจากระดับพลังงานต่ำ E_1 ขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงานสูง E_2 ดังรูป 2.14(b) การให้พลังงานจากภายนอกแก่อิเล็กตรอนเพื่อทำให้มัน

เลื่อนขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงานสูงนี้เรียกว่า การกระตุ้น (Stimulation) และการที่อิเล็กตรอนเลื่อนไปยังระดับพลังงานอื่นนั้นเรียกว่าการถ่ายเท (Transfer)



รูป 2.14 แสดงระดับพลังงานและขั้นตอนของการ Transfer

และเมื่อปล่อยอิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะเลื่อนขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานสูง E_2 ไว้เช่นนั้นมันจะถูก Nucleus ดึงกลับมาอยู่ในสภาวะเดิมซึ่งเรียกว่า Stable State ดังรูป 2.14(a) อีก ในการที่อิเล็กตรอนกลับลงมาสู่สภาวะเดิม นั่นคือลงมาสู่ระดับพลังงานต่ำ E_1 นั้นจะเหมือนกันกับกระแสน้ำที่ไหลจากที่สูงสู่ที่ต่ำ อิเล็กตรอนจะปล่อยพลังงานออกมาตามธรรมชาติ (Natural Emission) กรณีที่ปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงจะเรียกว่า Natural Light Emission อุปกรณ์กำเนิดแสงที่ใช้การปล่อยแสงธรรมชาตินี้ได้แก่หลอดนีออนและไดโอดกำเนิดแสง (Light Emitting Diode : LED) จากทฤษฎีของ Quantum Dynamics ความยาวคลื่นแสงที่ได้จากการปล่อยแสงออกมานี้หาได้จากสมการต่อไปนี้

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

ในที่นี้ λ : ความยาวคลื่นแสง (เมตร)

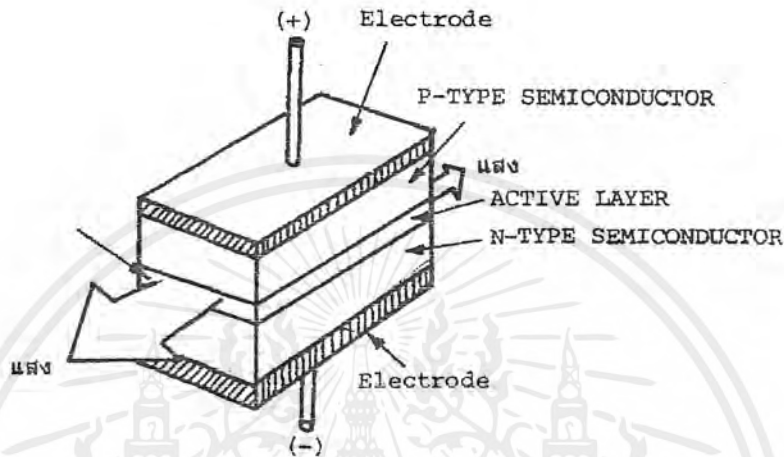
c : ความเร็วของแสง ($= 3 \times 10^8$ m/sec)

h : PLANK Constant มีค่า $= 6.625 \times 10^{-34}$ Joule.sec

ถ้าป้อนแสงที่มีพลังงานเท่ากับ $E_2 - E_1$ ที่ใช้ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนให้ไปอยู่ในระดับพลังงานสูง ดังรูป 2.14(b) อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงาน E_2 ซึ่งพยายามที่จะกลับลงมาสู่ระดับพลังงานต่ำ E_1 อยู่แล้ว นั่นก็จะดูดพลังงานของแสงที่ป้อนให้เข้าไป และกลับลงมาสู่ระดับพลังงานต่ำ E_1 ในลักษณะถูกบังคับให้ลงมาเร็วกว่ากำหนดดังรูป 2.14(d) ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การกระตุ้นให้ปล่อยแสง (Stimulated Emission) และพลังงานแสงที่เกิดขึ้นในกรณีนี้จะมีค่ามากกว่ากรณีของ Natural Emission และแสงที่ได้เรียกว่า Stimulated Emission Light อุปกรณ์กำเนิดแสงที่ใช้หลักการ Stimulated Emission นี้ได้แก่ LASER

2.3.2 โครงสร้างของ Laser Diode (LD)

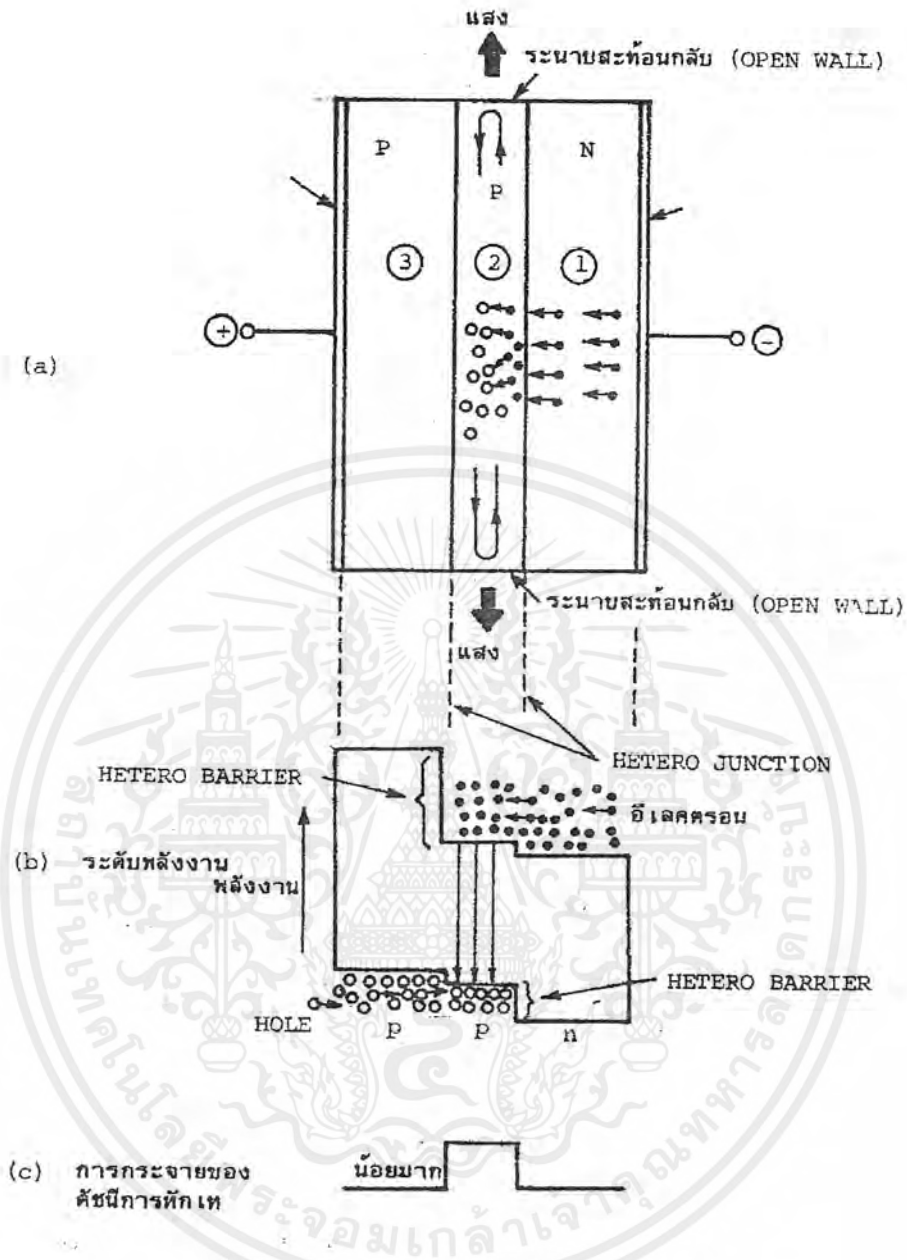
โดยทั่วไปแล้ว LD จะมีโครงสร้างเป็น 3 ชั้น (Three Layers) ดังแสดงในรูป 2.15 ในการทำให้เกิด Laser Oscillation นั้นคือส่วนที่ทำหน้าที่เป็น Resonator ซึ่งเรียกว่า Active Layer ซึ่งมีตำแหน่งอยู่ระหว่าง P-type Semiconductor กับ N-type Semiconductor



รูป 2.15 แสดงโครงสร้างทั่วไปของ LD

จากรูป 2.15 ถ้าหากทำให้กระแสไหลจากขั้ว + ไปยังขั้ว - (ทำการฉีดกระแส : Current Injection) จะเกิดแสง Laser ออกมาในทิศทางที่แสดงด้วยลูกศร เกี่ยวกับวิธีการเกิด Oscillation ของ LD นั้นอธิบายได้โดยเน้นตรงบริเวณชั้นทั้ง 3 ของ P-type, N-type และ Active Layer นี้สำหรับโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำอย่างนี้เรียกว่า Double Hetero Junction คำว่า Double Hetero Junction นั้นหมายความว่า Junction ของ Layer ของสารที่มีส่วนประกอบต่างกันนั้นมี 2 ด้าน โครงสร้าง, ระดับพลังงานและลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีการหักเหของ LD แสดงดังรูป 2.16

ในการทำให้เกิด Laser Oscillation นั้นจะต้องทำให้ผลต่างระหว่างระดับพลังงานของ Conduction Band ของ P-type Semiconductor และ Conduction Band ของ Active Layer มีค่ามากพร้อมทั้งทำให้ผลต่างระหว่างพลังงานของ Conduction Band กับ Valence Band ของ P-type Semiconductor มีค่ามากด้วย นอกจากนั้นยังจะต้องทำให้ระดับพลังงานของ Valence Band ของ N-type Semiconductor มีค่าต่ำกว่าระดับพลังงานของ Valence Band ของ Active Layer ด้วย จากนั้นจึงนำมาเชื่อมต่อกันจะได้ระดับพลังงาน ดังแสดงในรูป 2.16(b) เมื่อทำให้มีกระแสไหลใน Semiconductor ที่มีการเชื่อมต่อกันในลักษณะที่กล่าวข้างต้น โดยให้มีทิศทางไหลจาก P-type ไปหา N-type จะเป็นผลให้อิเล็กตรอนส่วนเกินที่มีอยู่ใน N-type (แสดงด้วย (1) ในรูป) ดังแสดงในรูป 2.16(a) เคลื่อนที่ไปยัง P-type และ hole ส่วนเกิน



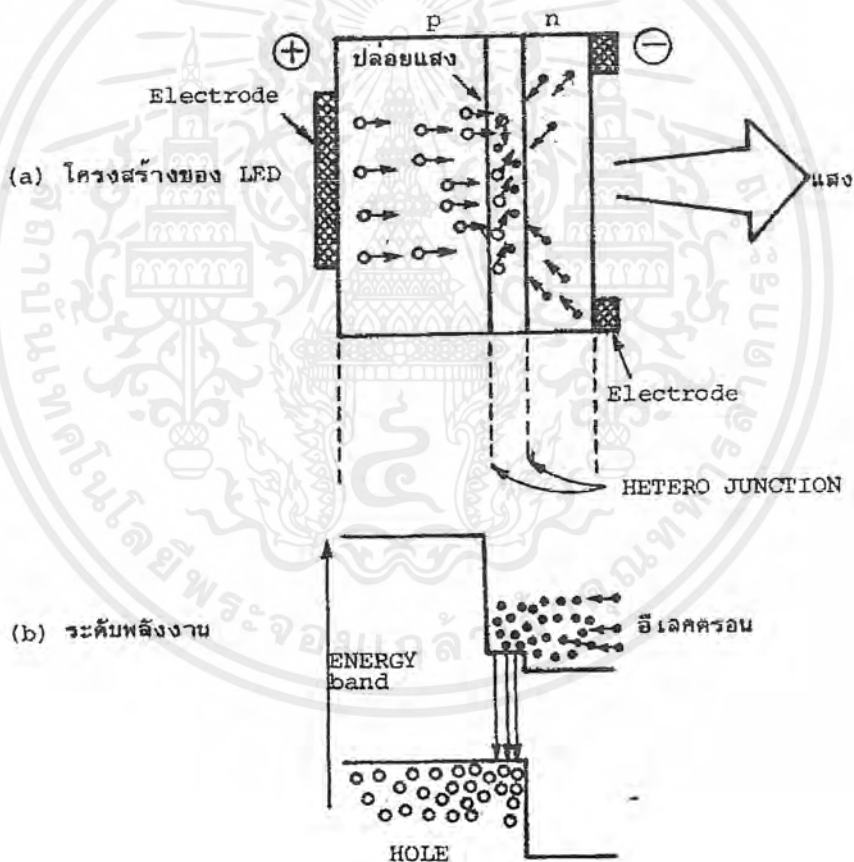
รูป 2.16 แสดง โครงสร้าง ระดับพลังงานและลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีการหักเหของ LD

ที่มีอยู่ใน P-type (แสดงด้วย (3) ในรูป) เคลื่อนที่ไปยัง N-type ผลของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและ hole เหล่านี้ทำให้เกิดอิเล็กตรอนและ hole อยู่ใน Active Layer (แสดงด้วย (2) ในรูป และโดยทั่วไป Active Layer นี้จะใช้สาร P-type) เมื่อมาถึงจุดนี้ให้สังเกตดูระดับพลังงานของ Layer ทั้ง 3 ที่แสดงในรูป 2.16(b) จะเห็นว่าเกิดมีกำแพงของพลังงาน (เรียกว่า Hetero Barrier) ขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนและ hole ที่เคลื่อนที่ไปนั้นถูกกักขังอยู่ใน Active Layer เป็นผลให้เกิดสภาพ Inversion Distribution ได้อย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 โครงสร้างของ LED (Light Emitting Diode)

โครงสร้างพื้นฐานของ LED เหมือนกันกับของ LD กล่าวคือเป็น Double Hetero Junction อิเล็กตรอนที่ไหลผ่าน P-N Junction จะไปรวมกับ hole ภายใน Active Layer เช่นเดียวกันกับกรณีของ LD ดังแสดงในรูป 2.17(a) และจะเกิดการปล่อยแสงขึ้นภายใน Active Layer เนื่องจากถูกกักด้วยกำแพงของ Hetero Junction แต่สำหรับกรณีของ LED นั้นโครงสร้างของมันไม่มีการขยาย Oscillation ของแสงเหมือนอย่าง LD (ไม่มีระนาบแสงสะท้อน) แสงที่ปล่อยออกมาตรงส่วนที่อยู่ห่างจากด้านข้างนั้นจึงออกจากด้านข้างได้ยาก ด้วยเหตุนี้ LED ทั่วไปจึงให้แสงปล่อยออกมาข้างนอกจากด้านหน้าที่อยู่ต่อกับขั้วไฟฟ้า ดังรูป 2.17(a)



รูป 2.17 แสดง โครงสร้างและระดับพลังงานของ LED

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 คุณสมบัติต่างๆ ของอุปกรณ์กำเนิดแสง

คุณสมบัติต่างๆ ที่ต้องการจากอุปกรณ์กำเนิดแสง ได้แก่ คุณสมบัติการผสมของแสงกับไฟฟ้า (นั่นคือ output power ของแสง, ความเป็นเส้นตรงหรือ (Linearity), ความกว้างของ Spectrum ของแสง, ความเร็วในการตอบสนองต่อความถี่ (Frequency Response Speed) เป็นต้น ในปัจจุบันแสงที่ได้จากอุปกรณ์กำเนิดแสงจะมีความยาวแสงจำนวนหนึ่งปนอยู่ ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้แสงเป็นคลื่นพาห้ (Carrier Wave) สำหรับ Frequency Modulation, Phase Modulation ของสัญญาณไฟฟ้าได้เหมือนอย่างที่ใช้ในการส่ง Multiplex ในระบบการส่งสัญญาณ Analog ของ Carrier Transmission, Microwave Transmission ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป แต่จะใช้การผสมที่เรียกว่า Intensity Modulation ซึ่งทำการผสมโดยตรงกับความเข้มของแสง

ตาราง 2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของอุปกรณ์ปล่อยแสง

หัวข้อ	LED	LD
Output Power ของแสง	2.5 mW	10 mW
Input power ของแสงในเส้นใยแสง	≤ 0.05 mW	≤ 3 mW
ความกว้างของ Spectrum ที่จุด Power ตก ลงครึ่งหนึ่ง(ตอน Modulation)	100 nm	3 nm
Frequency Response Speed	\leq หลายร้อย MHz	\leq หลาย GHz
อายุการใช้งาน	$\leq 10^6$ ชั่วโมง	$\leq 10^6$ ชั่วโมง

จากตารางนี้จะเห็นว่าเกี่ยวกับ Output Power ของแสงนั้น LD จะมีค่ามากกว่า เพราะมีการ Oscillation และการขยายของแสงและเกี่ยวกับ Input Power ที่ป้อนเข้าไปในเส้นใยแสงก็เช่นกัน เนื่องจาก LD มีคุณสมบัติของทิศทางของแสง(Directivity) ดีกว่า เป็นผลให้มีการสูญเสียการเชื่อมแสงกับเส้นใยแสงต่ำ ทำให้ Power ของแสงป้อนเข้าไปในเส้นใยแสงได้มาก

LED มี Spectrum ของแสงกว้างเนื่องจาก แถบพลังงานเป็นช่วงกว้าง แต่ LD นั้นมีพลังงานเป็นช่วงแคบเนื่องมาจากขบวนการ Oscillation ทำให้มี Spectrum ของแสงแคบ นอกจากนั้นการทำงานสว่างดับ(กระพริบ) ของแสงนั้น ถ้าความหนาแน่นของกระแสมีมากเท่าไร จะทำให้ค่าเฉลี่ยของเวลาการรวมกันของอิเล็กตรอนกับhole มีค่าน้อยลงเท่านั้น เนื่องจากความหนาแน่นของกระแสที่ใช้กระตุ้นของ LD มีค่ามากกว่า จึงทำให้ LD มี Frequency Response Speed มากกว่า LED

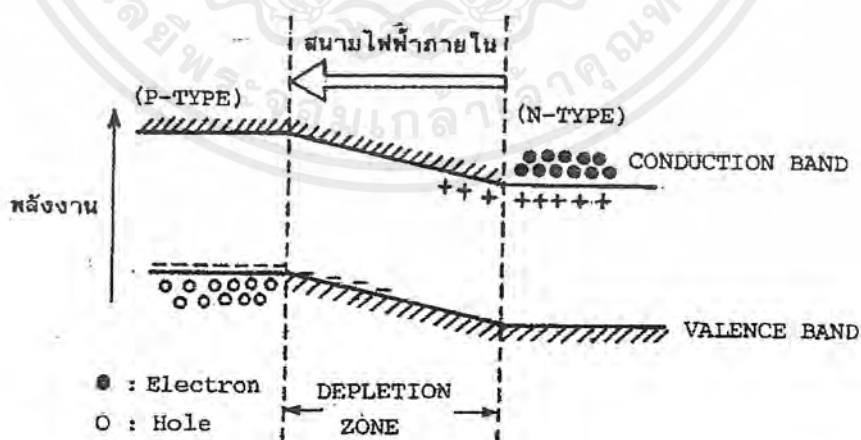
2.4 อุปกรณ์รับแสง

การรับแสงหมายถึงการเปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้า ในการทำงานนี้แบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ วิธีแรกเป็นการเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นไฟฟ้าโดยตรงเรียกว่า Photo Electric Effect อีกวิธีหนึ่งทำได้โดยการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานความร้อนก่อนแล้วจึงเปลี่ยนเป็นไฟฟ้า เรียกว่า Thermal Effect ซึ่งวิธีนี้จะมีการตอบสนองช้ามากและความไวไม่ดี จึงไม่นิยมนำมาใช้กับการสื่อสารด้วยแสง

2.4.1 การทำงานของการรับแสง

หลักการของ Photo Electric Effect นั้นเมื่อมีแสงมาตกกระทบสารกึ่งตัวนำอิเล็กตรอนที่อยู่ใน Valence Band จะเคลื่อนขึ้นไปอยู่ที่ Conduction Band แต่การเคลื่อนขึ้นไปนี้เป็นแต่เพียงอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปเท่านั้น และในที่สุดมันจะไปรวมกันใหม่กับ hole ใน Valence Band อีกทำให้ไม่ได้รับ Photo Electric Effect ด้วยเหตุนี้เพื่อที่จะเปลี่ยนแสงให้เป็นไฟฟ้าจะต้องใช้สภาพการแยกกันของอิเล็กตรอนกับ hole ก่อนที่มันจะรวมกัน

สำหรับอุปกรณ์รับแสงสารกึ่งตัวนำ ก็เช่นเดียวกับอุปกรณ์กำเนิดแสง นั่นคือเพื่อที่จะแยกอิเล็กตรอนกับ hole นั้นโดยทั่วไปใช้ PN-Junction ที่รอยต่อของ P-N นั้นจะเกิดสนามไฟฟ้าในที่ว่าง (Space Electric Field) ขึ้น แต่มันจะถูกดึงด้วยอิเล็กตรอนของ N-type และ hole ของ P-type ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็น - และ + เป็นผลให้เกิดบริเวณที่ไม่มีอิเล็กตรอนและ hole ขึ้นตรงรอยต่อบริเวณนี้เรียกว่า Depletion Zone ดังรูป 2.18



รูป 2.18 แสดง Depletion Zone

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสภาพอย่างนี้เมื่อมีแสงมากระทบจากทางด้านบริเวณ P-type แสงนั้นจะถูกดูด พร้อมทั้งเคลื่อนที่ไปทางบริเวณ N-type แต่ที่ Depletion Zone อิเล็กตรอนและhole ที่เกิดจากการดูดพลังงานจากแสงจะถูก Space Electric Field แยกไปในทิศทางตรงกันข้ามกล่าวคือ อิเล็กตรอนไปทางด้าน N และhole ไปทางด้าน P หนึ่งที่บริเวณซึ่งอยู่ห่างจาก Depletion Zone นั้น เนื่องจากไม่มีสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนและhole ที่เกิดจาก Photo Electric Effect จะรวมตัวกันใหม่ในระหว่างเคลื่อนที่ แต่สำหรับอิเล็กตรอนและhole ที่เคลื่อนที่ไปใน Space Electric Field แล้วนั้นจะสามารถเข้าไปยังบริเวณตรงกันข้ามได้ผลที่ได้คือ จะเกิดแรงดันไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนกับปริมาณของอิเล็กตรอนและhole ที่ถูกแยกขึ้นระหว่างปลายทั้งสองของ P-type และ N-type ถ้าหากนำวงจรภายนอกมาต่อกับปลายทั้งสองนี้ จะทำให้อิเล็กตรอนและhole สามารถรวมตัวกันได้ โดยผ่านวงจรภายนอก นั่นคือมีกระแสไหลนั่นเอง กระแสที่เกิดที่ Depletion Zone เรียกว่า Drift Current ส่วนกระแสที่เกิดตรงบริเวณที่อยู่ห่างจาก Depletion Zone เรียกว่า Diffusion Current และกระแสนี้เป็นหลักการของการเปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้า

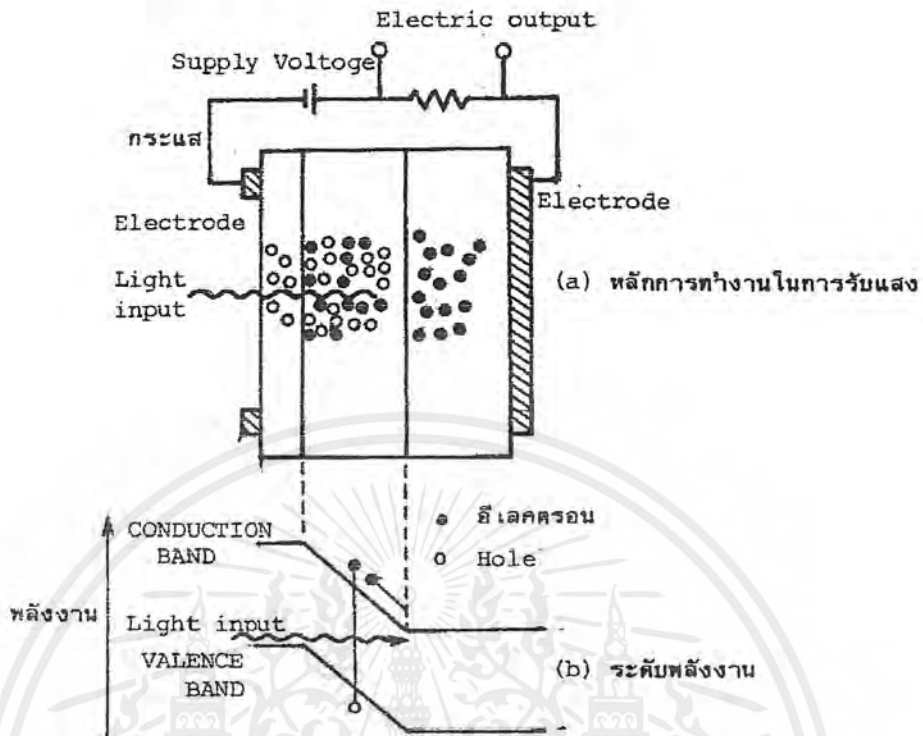
2.4.2 โครงสร้างของอุปกรณ์รับแสง

ในการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสงนั้นจะต้องเลือกอุปกรณ์รับแสงที่เหมาะสมกับความยาวคลื่นที่ใช้เช่นเดียวกับอุปกรณ์กำเนิดแสง สำหรับย่านความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า $1 \mu\text{m}$ จะใช้ Si (Silicon) สำหรับย่านความยาวคลื่นจาก $1\text{--}1.7 \mu\text{m}$ ใช้ Ge (Germanium) เป็นส่วนใหญ่

อุปกรณ์รับแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำแบ่งออกเป็น 2 พวกใหญ่ๆ ตามปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้จากภายนอกคือ Photo Diode : PD กับ Avalanche Photo Diode : APD พวก PD นั้นเป็นพวกที่ได้รับการป้อนแรงดันไฟฟ้าปริมาณน้อย ส่วนพวก APD เป็นพวกที่ได้รับการป้อนแรงดันไฟฟ้าปริมาณมาก

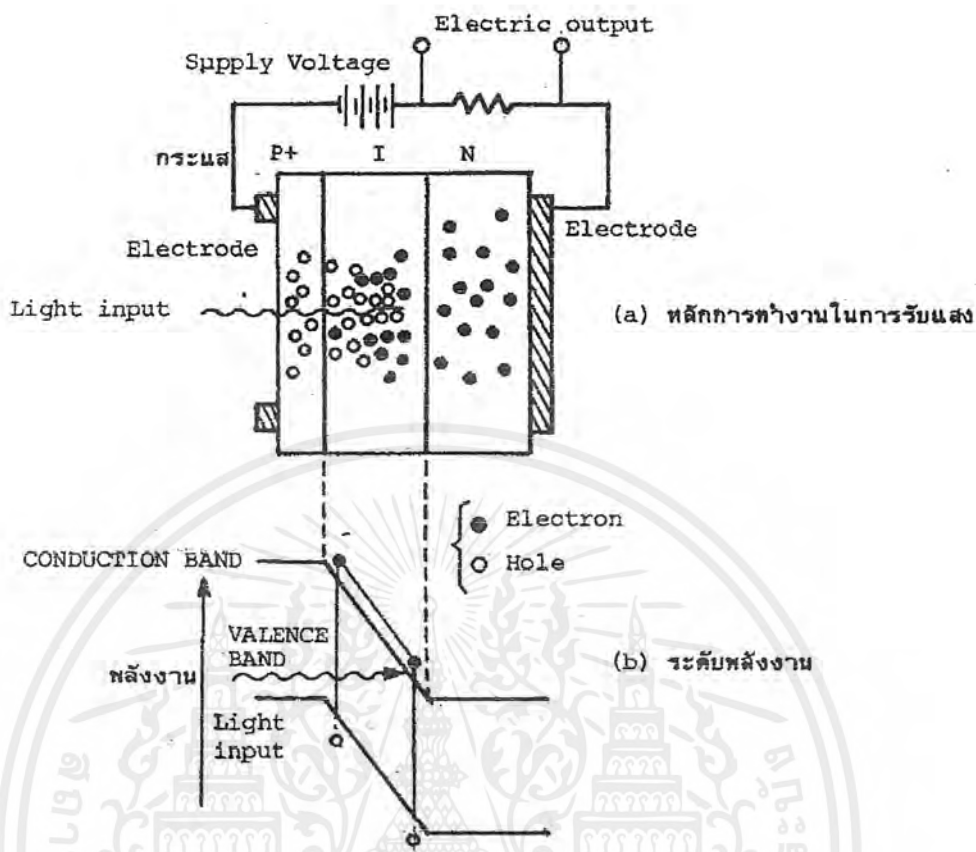
ตัวอย่างของ PD คือ PIN - PD ดังแสดงในรูป 2.19 PIN หมายถึงว่าในระหว่างสารกึ่งตัวนำ P-type และ N-type มีสารกึ่งตัวนำแบบที่เรียกว่า Intrinsic : I คั่นอยู่ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า Drift Current นั้นเกิดขึ้นใน Depletion Zone และผลของสนามไฟฟ้าทำให้มีการตอบสนองเร็ว แต่ในทางตรงกันข้าม Diffusion Current ที่เกิดขึ้นภายนอก Depletion Zone นั้น มีการตอบสนองช้า ดังนั้นถ้าความกว้างของ Depletion Zone ยิ่งกว้างมากเท่าใด Quantum Efficiency และความเร็วของการตอบสนองความถี่ยิ่งดีขึ้น ความกว้างของ Depletion Zone นี้ถ้าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและhole ของ P-type ยิ่งต่ำจะยิ่งกว้าง ดังนั้นสารกึ่งตัวนำแบบ I ที่คั่นกลางระหว่าง P-type กับ N-type จึงมีหน้าที่เพื่อทำให้ความกว้างของ Depletion Zone กว้างขึ้นนั่นเอง เนื่องจาก PD ที่ใช้ในระบบการสื่อสารนั้น โดยทั่วไปต้องการความเร็วในการตอบสนองสูง ดังนั้นส่วนใหญ่จะใช้ PIN - PD

อนึ่ง APD นั้นใช้ปฏิกิริยาการขยาย Avalanche ของอิเล็กตรอน และhole ในสารกึ่งตัวนำ เมื่อเปรียบเทียบกับ PD แล้วเป็นอุปกรณ์รับแสงที่ให้กระแสจำนวนมาก หลักการทำงานของ APD แสดงดัง



รูป 2.19 แสดงหลักการการทำงานการรับแสงและระดับพลังงานของ PIN – PD

รูป 2.20 สำหรับโครงสร้างนั้นส่วนใหญ่ทางด้าน P ของ PN – Junction จะมีสารกึ่งตัวนำแบบ P-type ที่มี ความหนาแน่นของhole สูงติดอยู่ (ส่วนที่แสดงด้วย P+ ในรูป) โดยการทำเช่นนี้จะทำให้สนามไฟฟ้าภายในของบริเวณใกล้ๆรอยต่อที่มี P-Layer เป็นศูนย์กลางมีค่ามาก อิเล็กตรอนที่ดูดแสงที่มาจากกระทบบจาก ด้าน P+ และถูกกระตุ้นจาก Valence Band ไปยัง Conduction Band ในระหว่างที่มันได้รับอัตราเร่งและ ผ่าน P-Layer นั้น มันจะได้รับพลังงานจำนวนมากว่าผลต่างของพลังงานของ Conduction Band กับ Valence Band จากผลนี้ทำให้สามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนที่อยู่ใน Valence Band และทำให้เกิดอิเล็กตรอน กับholeใหม่ได้ และอิเล็กตรอนกับholeใหม่นี้ ยังถูกสนามไฟฟ้าเร่งอัตราเร่งให้อีก ทำให้เกิดอิเล็กตรอนกับ holeใหม่่ออกมาอีก เมื่อขบวนการนี้เกิดอย่างต่อเนื่องกัน จำนวนของอิเล็กตรอนกับhole จะเพิ่มขึ้นเป็น จำนวนมากมาย (Avalanche) เป็นผลให้เกิดการขยายที่เรียกว่า Avalanche Multiplication ผลนี้ทำให้ กระแสถูกขยายนั่นเอง



รูป 2.20 แสดงหลักการทำงานการรับแสงและระดับพลังงานของ APD

2.4.3 คุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง

ประสิทธิภาพของอุปกรณ์รับแสงประเมินจากคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ Quantum Efficiency ซึ่งแสดงว่าแสงที่รับมานั้นถูกเปลี่ยนเป็นไฟฟ้าได้มากเท่าไร ความไวการรับแสง (ระดับแสงต่ำสุดที่ต้องการสำหรับการส่งที่มีคุณภาพ ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการออกแบบระยะเวลาถ่ายทอคของระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสง สัญญาณรบกวน (Noise) ที่เกิดขึ้นและความรวดเร็วของการตอบสนองการทำงาน สำหรับ Quantum Efficiency กำหนดจากสารและโครงสร้างของอุปกรณ์รับแสงแต่สำหรับความไวการรับแสงนั้นจะเกี่ยวข้องกับขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้

เนื่องจาก APD ใช้ปรากฏการณ์การขยาย Avalanche ดังนั้นจึงมีความไวสูงประมาณ 10–20 dB (10–100 เท่า)เมื่อเทียบกับ PD ความเร็วในการตอบสนองความถี่ เป็นสิ่งที่กำหนดจากเวลาที่มิสัญญาณแสงเข้ามา จนกระทั่งเกิดปรากฏการณ์จุดแสง แต่ในปัจจุบันเนื่องจากทั้ง PD และ APD สามารถตอบสนองความเร็วได้ถึงหลาย GHz จึงไม่มีปัญหาในการใช้งาน การเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆของ PD กับ APD แสดงดังตาราง 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง

หัวข้อ	PD	APD
Quantum Efficiency	~ 80%	~ 80%
ความไวในการรับแสง (1)	-15~20 dBm	-30~40 dBm
ความเร็วการตอบสนองความถี่	~ หลาย GHz	~ หลาย GHz
อัตราขยาย	1	~500
ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำงาน	0~20 V	30~200 V

(1) เป็นค่าตรงจุดที่ code error rate เป็น 10^{-11}

2.5 การมอดูเลตแอมพลิจูด (Amplitude Modulation)

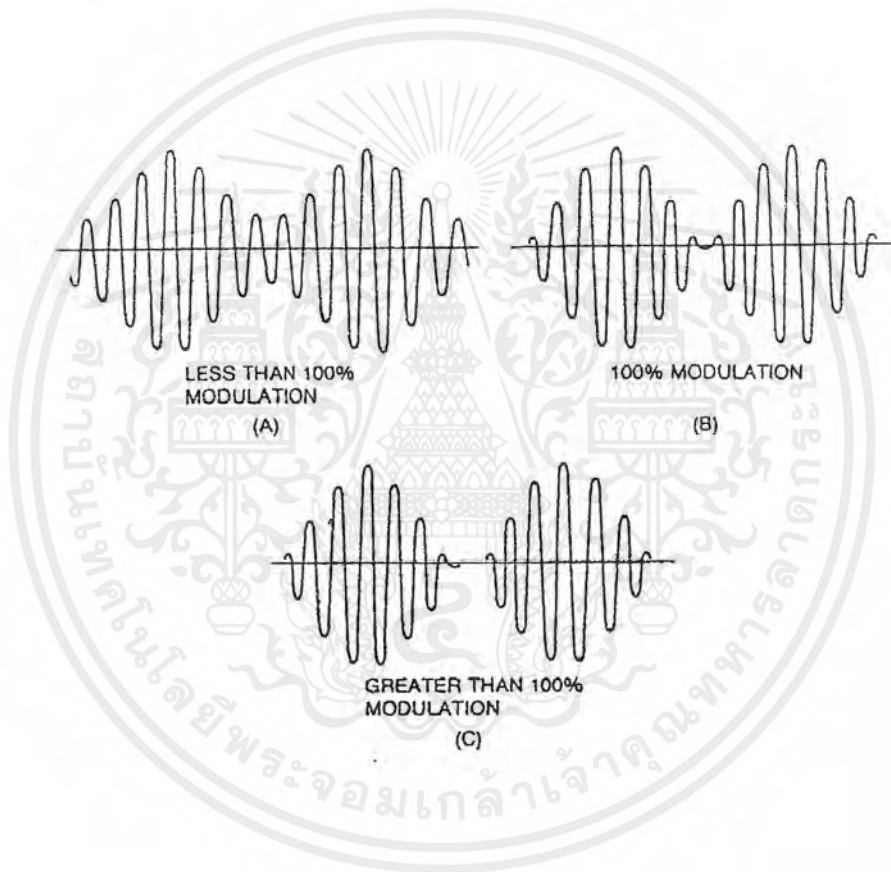
ในการสื่อสาร ถ้าสัญญาณถูกส่งไปยังเครื่องรับ โดยไม่ผ่านการมอดูเลต กล่าวคือ ไม่มีการเคลื่อนย้ายย่านความถี่ของข้อมูลไปจากเดิมเลย การสื่อสารในลักษณะนี้เรียกว่า การสื่อสารในแบนด์มูลฐาน (baseband communication) ทั้งนี้เพราะว่าแบนด์หมายถึงช่วงความถี่ ดังนั้นในการสื่อสารในแบนด์มูลฐาน จึงหมายถึงการสื่อสารที่มีย่านความถี่อยู่ในช่วงความถี่ของสัญญาณตามเดิมดังกล่าวแล้ว แต่ถ้าการส่งสัญญาณนั้นต้องผ่านกระบวนการมอดูเลตสัญญาณแล้ว เราจะเรียกการสื่อสารชนิดนี้ว่า การสื่อสารโดยคลื่นพาห้ (carrier communication)

ในการสื่อสารโดยคลื่นพาห้ นั้น สัญญาณจากแหล่งกำเนิดโดยตรง หรือสัญญาณในแบนด์มูลฐาน (baseband signal) ขาดความเหมาะสมที่จะใช้ส่งผ่านช่องการสื่อสารไปยังเครื่องรับด้วยสาเหตุสำคัญคือ สัญญาณมีสเปกตรัมของความถี่อยู่ในย่านที่แตกต่างไปจากย่านความถี่ของช่องการสื่อสารที่มีอยู่ ก็ย่อมจำเป็นจะต้องมีการเคลื่อนย้ายย่านความถี่ของสัญญาณในแบนด์มูลฐานไปให้อยู่ในช่วงความถี่ของช่องการสื่อสารเพื่อที่จะได้สามารถส่งสัญญาณนั้นผ่านช่องการสื่อสารไปได้ ในกระบวนการนี้ต้องมีการอาศัยสัญญาณหนึ่งซึ่งเรียกว่า คลื่นพาห้(carrier) ซึ่งปกติสร้างขึ้นจากวงจรออสซิลเลเตอร์ เป็นสื่อช่วยเคลื่อนย้ายสเปกตรัมของสัญญาณจากแบนด์มูลฐาน กระบวนการที่ทำการเคลื่อนย้ายสเปกตรัมนี้มีชื่อเรียกว่า การมอดูเลตสัญญาณ การมอดูเลตแอมพลิจูด หมายถึง การนำสัญญาณเบสแบนด์ที่ต้องการส่งผสมเข้าไปกับสัญญาณคลื่นพาห้ โดยการที่ทำให้ขนาดของคลื่นพาห้เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของเบสแบนด์ การมอดูเลตแอมพลิจูดเรียกสั้นๆว่า เอเอ็ม (AM)

2.5.1 ตัวประกอบการมอดูเลต (Modulation Factor)

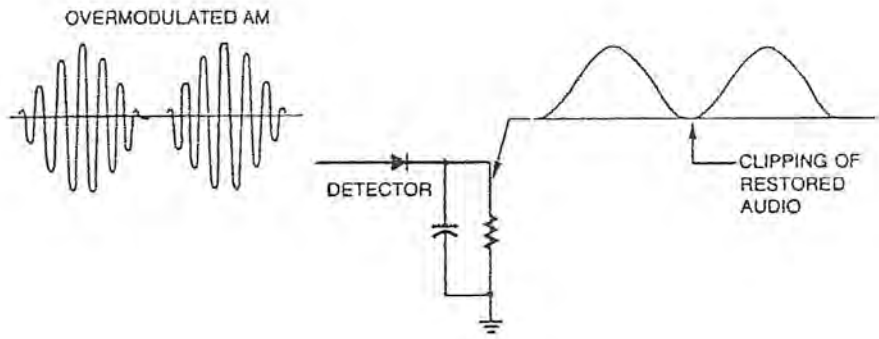
เมื่อดูจากรูปคลื่นทั้ง 3 รูป ในรูปที่ 2.21 รูปคลื่น(A) เป็นการมอดูเลตขนาดเล็ก, รูป(B) เป็นการมอดูเลตที่มีขนาดใหญ่ขึ้นมา และรูป(C) เป็นการมอดูเลตที่มีขนาดใหญ่ขึ้นไปอีก ซึ่งคลื่นพหุบางส่วนจะหายไป ซึ่งจะสามารถแบ่งประเภทของการมอดูเลตออกเป็น 3 แบบคือ

1. การมอดูเลตที่น้อยกว่า 100%
2. การมอดูเลต 100%
3. การมอดูเลตที่มากกว่า 100%



รูป 2.21 ความแตกต่างของการมอดูเลต

การมอดูเลตของคลื่นพหุที่มากกว่า 100% นั้นไม่เป็นที่ต้องการ เนื่องจากเป็นสาเหตุทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของการนำสัญญาณเสียงกลับมาใช้ ความผิดเพี้ยนแสดงดังในรูปที่ 2.22



รูป 2.22 ความผิดเพี้ยนจากการเกิดโอเวอร์มอดูเลต

2.5.2 สเปกตรัมของ AM และแบนด์วิดท์ (AM Spectrum and Bandwidth)

เนื่องจากความถี่การมอดูเลต (f_m), ความถี่คลื่นพาห้ (f_c) จะเป็นผลให้เกิดคลื่นรูปไซน์ที่แตกต่างกัน 4 แบบ ได้แก่

1. ความถี่ที่มอดูเลตในแบบเดิม (f_m)
2. ความถี่ของคลื่นพาห้ในแบบเดิม (f_c)
3. ผลรวมของทั้งสองความถี่ ($f_c + f_m$)
4. ผลต่างของทั้งสองความถี่ ($f_c - f_m$)

ถ้าความถี่ที่นำมามอดูเลตมีค่าน้อยกว่าความถี่คลื่นพาห้มาก สัญญาณที่นำมามอดูเลตที่มีความถี่ต่ำนั้นจะไม่ได้ถูกส่งไปคีย์ ชุดท้ายแล้วสัญญาณที่รับได้ที่อุปกรณ์รับสัญญาณจะปรากฏคลื่นรูปไซน์ 3 แบบคือ f_c , $f_c + f_m$ และ $f_c - f_m$

เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมถูกใช้เพื่อสังเกตคลื่น AM ที่ถูกส่งมา ซึ่งเป็นการมอดูเลตคลื่นเสียงรูปไซน์ที่มีความถี่ต่ำผลลัพธ์ที่ออกมาดังรูปที่ 2.23 สังเกตได้ว่าความถี่ที่อยู่ตรงกลางคือคลื่นพาห้ และด้านข้างอีกสองข้างเป็นความถี่อื่นอีกสองความถี่ จากความสัมพันธ์อันนี้ความถี่ที่อยู่ทั้งสองข้างของคลื่นพาห้เรียกว่า ไซด์แบนด์ ซึ่งไซด์แบนด์ที่มีความถี่สูงกว่าคลื่นพาห้เรียกว่า ไซด์แบนด์สูง (upper sideband) และไซด์แบนด์ข้างที่มีความถี่ต่ำกว่าคลื่นพาห้เรียกว่า ไซด์แบนด์ด้านต่ำ (lower sideband)

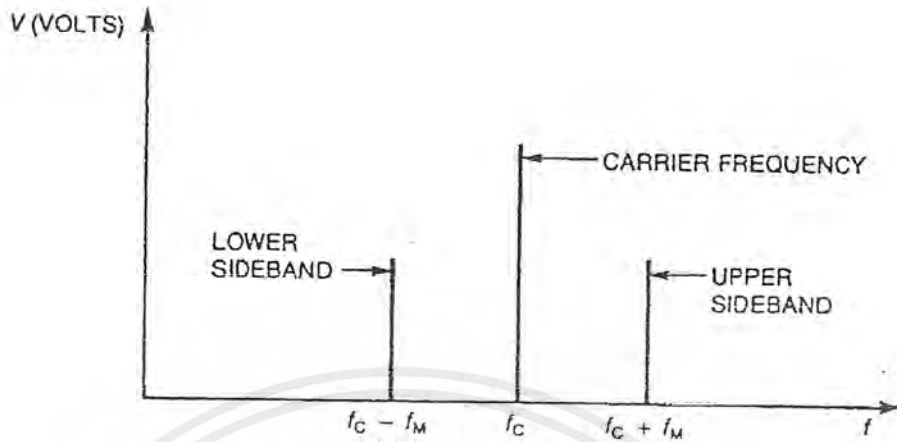
ด้วยเหตุนี้ความถี่ไซด์แบนด์ด้านสูงคือ

$$f_{USB} = f_c + f_m$$

และความถี่ไซด์แบนด์ด้านต่ำคือ

$$f_{LSB} = f_c - f_m$$

เมื่อคลื่นพาห้ถูกมอดูเลตโดยคลื่นที่ไม่เป็นรูปไซน์ เช่นคลื่นรูปสี่เหลี่ยม ไซด์แบนด์ที่ปรากฏจะมีความถี่ที่ต่างๆกันหลายความถี่ เนื่องจากว่าคลื่นสี่เหลี่ยมประกอบด้วยจำนวนฮาร์โมนิกที่เป็นอนันต์



รูป 2.23 ความถี่ในแบบ AM

แบนด์วิดท์เป็นการกำหนดระยะเวลาของความถี่จากไซด์แบนด์ด้านต่ำ ไปยังไซด์แบนด์ด้านสูงแสดง
ได้ดังนี้

$$BW = f_{USB} - f_{LSB}$$

เมื่อ BW คือ แบนด์วิดท์ในหน่วย Hz

f_{USB} คือ ไซด์แบนด์ด้านสูงในหน่วย Hz

f_{LSB} คือ ไซด์แบนด์ด้านต่ำในหน่วย Hz

จาก

$$BW = f_{USB} - f_{LSB}$$

โดยที่

$$f_{USB} = f_c + f_m \text{ และ } f_{LSB} = f_c - f_m$$

จึงได้

$$BW = (f_c + f_m) - (f_c - f_m)$$

$$BW = f_c + f_m - f_c + f_m$$

$$BW = 2f_m$$

2.5.3 พื้นฐานของ AM

กำหนดให้การมอดูเลตแอมพลิจูดเริ่มด้วยคลื่นพาห์ v_c เป็นคลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่ f_c และมีแอมพลิจูด V_c สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$v_c = V_c \sin 2\pi f_c t$$

เมื่อ ไม่มีการมอดูเลตใดๆแล้ว คลื่นพาห์ที่เป็นคลื่นรูปไซน์จะ ไม่มีการบรรจุข้อมูลใดๆ โดยค่าของมันที่
เวลาใดๆสามารถคำนวณได้จากค่าที่ทราบ คือ V_c และ f_c

กระบวนการ AM ได้เปลี่ยนแปลงค่าคงที่ V_c กับสัญญาณที่มี ตัวอย่างเช่น เสียงพูด เสียงดนตรี และข้อมูลทางคอมพิวเตอร์ ผลลัพธ์ก็คือ คลื่นพาห์จะอยู่ในรูปคลื่นไซน์ที่แอมพลิจูดไม่อยู่ในลักษณะที่คงที่แบบเดิม โดยที่แอมพลิจูดของคลื่นที่มอดูเลตแล้วจะเปลี่ยนแปลงไปตามส่วนของแอมพลิจูดของสัญญาณข้อมูลที่น่ามอดูเลตด้วย

พิจารณาในกรณีที่สัญญาณน่ามอดูเลตกับคลื่นพาห์ โดยมีความถี่ f_m และแอมพลิจูด V_m สมการของผลลัพธ์ของสัญญาณ AM คือ

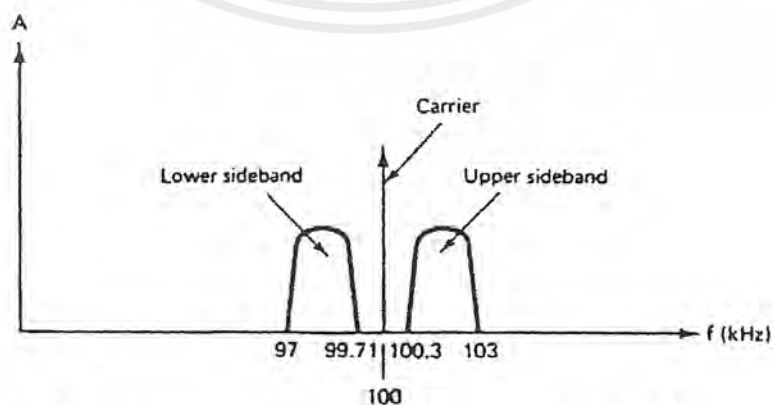
$$v = V_c \sin 2\pi f_c t + \frac{1}{2} m V_c \cos 2\pi (f_c - f_m) t - \frac{1}{2} m V_c \cos 2\pi (f_c + f_m) t$$

ตัวประกอบ m มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ก็คือดัชนีการมอดูเลต ซึ่งเป็นอัตราส่วนของคลื่นพาห์ที่ยังไม่ทำการมอดูเลต กับสัญญาณที่ทำการมอดูเลตแล้ว $V_m - V_c$

เป็นที่ทราบกันมาแล้วว่าจุดสำคัญของผลลัพธ์ของกระบวนการ AM คือ สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณ AM นั้นไม่ได้อยู่ในรูปคลื่นไซน์อย่างง่าย ที่ความถี่พาห์ f_c และประกอบไปด้วยสองสัญญาณไซน์แบนด์ที่มีความถี่ $f_c + f_m$ และ $f_c - f_m$

จากที่กล่าวถึงไซด์แบนด์ในหัวข้อก่อนหน้านี้อแล้วจะยกตัวอย่างจากการกระจายเสียงแบบ AM คือมีความถี่เท่ากับ 1000 Hz และคลื่นพาห์มีความถี่ 1500 kHz ผลลัพธ์ก็คือทำให้เกิดไซด์แบนด์ที่มีความถี่ 1500-1kHz และ 1500+1kHz หรือ 1499 และ 1501kHz คลื่นพาห์ที่มีความถี่ 1250 kHz จะให้ไซด์แบนด์ที่ 1250-1kHz และ 1250+1kHz ในภายหลังกระบวนการ AM ซึ่งเท่ากับ 1250kHz ถ้าความถี่มีค่าเท่ากับ 2.5kHz จะปรากฏไซด์แบนด์ที่ 1297.5kHz และ 1502.5kHz สำหรับคลื่นพาห์ที่มีความถี่ 1500kHz และที่มีความถี่ 1250kHz จะให้ไซด์แบนด์ที่ 1247.5kHz และ 1252.5kHz

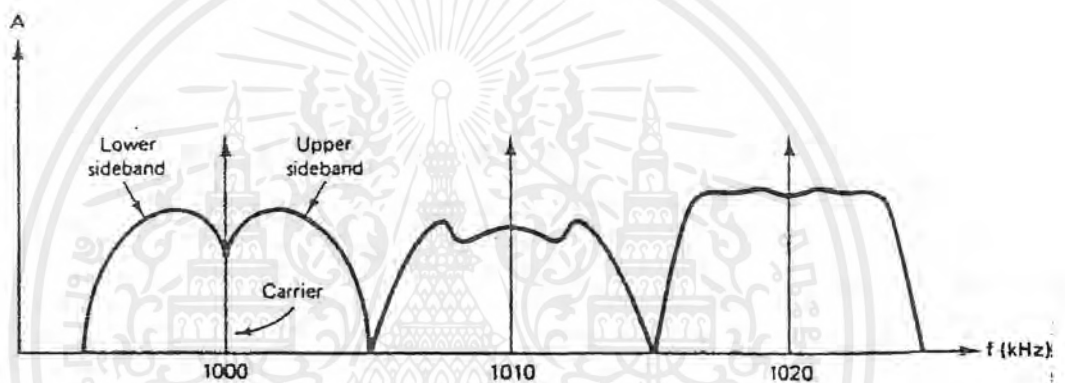
การมอดูเลตแอมพลิจูดบางครั้งก็เรียกว่าเป็นการแปลงความถี่ไปที่ความถี่ของคลื่นพาห์ หมายความว่า สัญญาณข้อมูลอันเดิมได้ถูกย้ายหรือถูกแปลง ดังนั้นจะกลายมาเป็นคู่ไซด์แบนด์ของคลื่นพาห์ โดยไม่สนใจว่าความถี่คลื่นพาห์จะเป็นอะไร แบนด์วิดท์จะกลายเป็นสองเท่าของสัญญาณเดิม



รูป 2.24 ผลของ AM เมื่อคลื่นพาห์มอดูเลตกับความถี่ 300-3000Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างทำการมอดูเลต หลายสัญญาณดั้งเดิมที่มีสเปกตรัมเดียวกันสามารถแปลงเป็นความถี่ใหม่ และจะไม่มีแทรกแซงกันกับแต่ละคลื่นพาห้ มาตรฐานในการกระจายเสียงวิทยุแบบ AM จะเป็นตัวอย่างที่ดีในกรณีนี้ อย่างเช่นในสหรัฐอเมริกา ความถี่คลื่นพาห้ได้ถูกกำหนดโดย FCC (Federal Communication Commission) ให้กับแต่ละสถานี ซึ่งมีช่องว่างทุก 10kHz ในแถบการกระจายเสียงทั้งหมด แต่ละสถานีจะมีสเปกตรัมเสียงพูด และเสียงดนตรีจาก 0 ถึง 5kHz เมื่อไม่มีทำการมอดูเลตสัญญาณข้อมูลแต่ละสถานีเหล่านี้อาจจะทำการรบกวนกันและกัน ดังนั้นแต่ละสถานีที่ทำการมอดูเลตทางแอมพลิจูดได้มีการกำหนดสัญญาณพาห้ขึ้นมาในแต่ละสถานี เป็นผลทำให้เกิดคู่ของไซด์แบนด์ที่แต่ละความถี่คลื่นพาห้ ไซด์แบนด์เหล่านั้นจะไม่ซ้อนทับกัน เพราะว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณมอดูเลตเดิมนั้นถูกจำกัดที่ความถี่ต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของผลต่างความถี่ระหว่างคลื่นพาห้ที่อยู่ติดกัน



รูป 2.25 สเปกตรัมของกลุ่มคลื่นพาห้

พิจารณาสถานีที่มีการกำหนดคลื่นพาห้ที่ความถี่ 1000, 1010 และ 1020kHz แต่ละสถานีจะมีการผลิตสัญญาณที่มีระยะของสเปกตรัมจาก 0-5kHz บนแต่ละข้างของคลื่นพาห้สเปกตรัมสุดท้ายที่ปรากฏจะเป็นดังรูปที่ 2.25 ที่แต่ละข้างของคลื่นพาห้จะขยายไปด้วยคู่ของไซด์แบนด์ โดยไซด์แบนด์ไม่ซ้อนทับกัน ถ้าคลื่นพาห้ที่อยู่ใกล้กันมากกว่านี้ หรือแบนด์วิดท์ของสัญญาณมอดูเลตมีขนาดใหญ่มากกว่านี้ไซด์แบนด์เหล่านี้จะซ้อนทับกันและไซด์แบนด์ด้านสูงของสถานีหนึ่งกับไซด์แบนด์ด้านต่ำของอีกสถานีหนึ่งจะมีการรบกวนกัน อย่างไรก็ตามถ้าช่องว่างระหว่างคลื่นพาห้มีค่ามากกว่าสองเท่าของแบนด์วิดท์ของสัญญาณมอดูเลต ก็จะไม่มีการซ้อนทับกัน ถ้าช่องว่างนั้นน้อยกว่าสองเท่าของแบนด์วิดท์ จะปรากฏการซ้อนทับกันขึ้น

ดัชนีการมอดูเลตเป็นเครื่องมือวัดของคลื่นพาห้ที่ทำการมอดูเลตสัญญาณข้อมูลแล้ว เป็นการเปรียบเทียบขนาดของสัญญาณสองสัญญาณ คลื่นพาห้ที่ทำการมอดูเลตอาจมีขนาดมากหรือน้อย ขนาดเหล่านั้นสามารถทำการวัดได้ในรูปของกระแสหรือ โวลเตจของสัญญาณ

แต่กรณีที่มีการนำมาพิจารณามากที่สุดคือกำลังของสัญญาณ กำลังเป็นสัดส่วนของกำลังสองของ โวลเตจหรือกระแส สาเหตุที่นำกำลังมาทำการวัด คือกำลังนั้นสามารถนำมาวิเคราะห์ในขอบเขตที่จำกัด ในระบบการสื่อสารใดๆก็ตาม ในทุกๆเครื่องส่งไม่ว่าจะเป็น สถานีวิทยุ, วอล์กกี-ทอล์กกี(walkie-talkie),

โทรศัพท์ระบบเซลลูลาร์ หรือวงจรภายในคอมพิวเตอร์ที่ทำการส่งข้อมูลติดต่อไปยังส่วนอื่นๆ ของคอมพิวเตอร์นั้นจำกัดอยู่ในรูปของกำลัง มีการจำกัดขนาดของแบตเตอรี่, ผลรวมของไฟฟ้าที่สามารถนำไปใช้ได้ หรือขนาดทางกายภาพของส่วนประกอบในการส่งสัญญาณ(กำลังมากกว่าย่อมหมายถึง อุปกรณ์ที่ใหญ่กว่า) ทางด้านอุปกรณ์รับสัญญาณกำลังก็ยังคงเกี่ยวข้อง วงจรทางค่านรับจะมีการกรองเอา ข้อมูลข่าวสารเดิมจากกำลังของสัญญาณที่รับมาได้ ถ้ากำลังที่รับได้มีมากก็จะเป็นการง่ายที่จะนำข้อมูลข่าวสารที่ต้องการกลับมาใช้ โดยเฉพาะถ้ามีสัญญาณรบกวนมากับสัญญาณที่ต้องการ

สมการของการมอดูเลตแอมพลิจูด และนิยามของดัชนีการมอดูเลตสามารถนำมารวมกัน เพื่อแสดงผลรวมของกำลังในคลื่นพาห์ และสัญญาณทั้งหมด

$$\text{กำลังทั้งหมด } P_t = \text{กำลังคลื่นพาห์ } P_c(1+m^2)$$

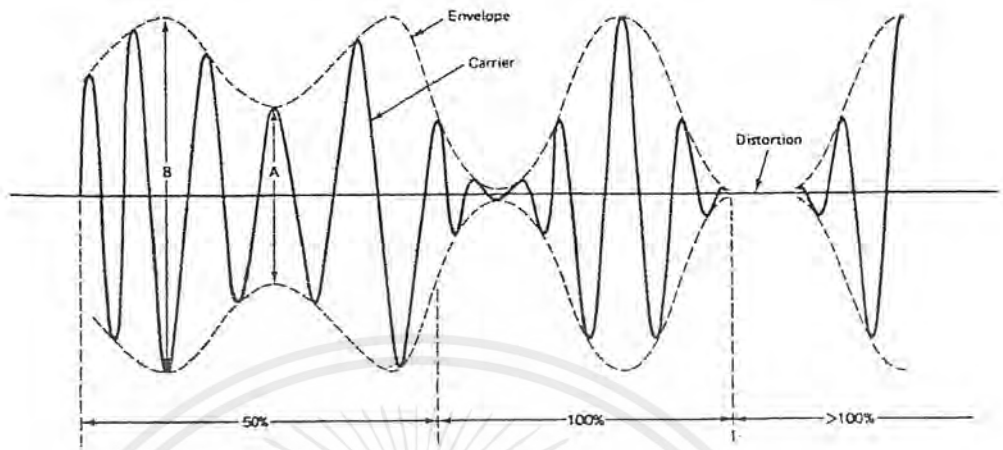
$$m^2 = 2[(P_t/P_c)-1]$$

สมการนี้มีความสำคัญอย่างมาก เพราะว่าเกี่ยวกับกำลังทั้งหมดกับกำลังคลื่นพาห์ที่ไม่มีประโยชน์ ซึ่งเป็นคลื่นพาห์ที่ไม่มีข้อมูลข่าวสารรวมอยู่ด้วย โดยมีข่าวสารที่ไซค์แบนด์เท่านั้น คลื่นพาห์เป็นส่วนที่ทำให้มีการพาข้อมูลข่าวสาร และยอมให้ส่งและรับกลับมาอย่างสะดวก แต่กำลังของคลื่นพาห์อย่างเดียวยังเป็นกำลังที่ไม่ทำให้เกิดประโยชน์ ถ้าดัชนีการมอดูเลตมีค่าต่ำคือเข้าใกล้ 0% กำลังรวมส่วนใหญ่ในสัญญาณจะเป็นกำลังของคลื่นพาห์ และส่วนน้อยมากเป็นของไซค์แบนด์ ถ้าคลื่นพาห์ได้ทำการมอดูเลตอย่างสมบูรณ์ ($m=100%$) กำลังรวมจะเป็น 1.5 เท่าของกำลังคลื่นพาห์

เมื่อเป็นเช่นนี้หมายความว่า ถ้า 1.5 W เป็นกำลังในการส่งทั้งหมด การแบ่งกำลังระหว่างกำลังคลื่นพาห์ และกำลังไซค์แบนด์จะเป็นของคลื่นพาห์ 1W และกำลังที่ไซค์แบนด์ 0.5W (กำลังรวมทั้งหมดจะเป็น 1.5W)

2.5.4 การโอเวอร์มอดูเลต (Overmodulation)

ค่าที่มากที่สุดของดัชนีการมอดูเลตคือ 100% แต่มันสามารถเป็นไปได้ที่ดัชนีการมอดูเลตจะมีค่ามากกว่านั้น กรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อขนาดของสัญญาณที่นำมามอดูเลตมีขนาดใหญ่เกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังของคลื่นพาห์ และคลื่นพาห์ที่ทำการมอดูเลตแล้วมีค่ามากกว่าสองเท่าของค่าที่ยังไม่ได้ทำการมอดูเลตอย่างในรูปที่ 2.26 ค่าของAเป็น0ตรงที่มีการมอดูเลต100% Aคงอยู่ที่0เมื่อเกิดการโอเวอร์มอดูเลต และเอ็นวีโบลจะไม่เปลี่ยนรูปร่างไปตามสัญญาณข่าวสาร นั่นคือคลื่นพาห์ที่ทำการมอดูเลตจะทำการคัทออฟ (cut off) ระหว่างเกิดการโอเวอร์มอดูเลต



รูป 2.26 การมอดูเลตคลื่นพาห้แบบต่างๆ

ผลของการเกิดโอเวอร์มอดูเลต จะทำให้มีความผิดเพี้ยนของเอนวิโลปการมอดูเลต ในขอบเขตของเวลา ความผิดเพี้ยนนี้หมายถึงข่าวสารดั้งเดิมที่มาที่กับสัญญาณไม่สามารถนำกลับมาให้ถูกต้องดั้งเดิมและสูญเสียบางส่วนไป ในขอบเขตของความถี่ การเกิดโอเวอร์มอดูเลตทำให้เกิดความถี่ใหม่ที่อยู่ข้างผลรวมและผลต่างความถี่ที่ถูกต้องของ AM แบบปกติ ความถี่ใหม่นี้อยู่นอกเหนือจากสเปกตรัมของ AM แบบปกติ และเรียกกันว่า สเปลทเตอร์ (splatter) เอนวิโลปของการมอดูเลตในที่นี้ประกอบไปด้วยเอนวิโลปในขั้นสูงกว่าของความถี่ที่นำมามอดูเลตอันเดิม ด้วยเหตุที่เอนวิโลปได้ถูกตัดที่ 0 และเริ่มที่จะคล้ายกับคลื่นรูปสี่เหลี่ยมมากกว่าคลื่นที่นำมามอดูเลตอันเดิม ฮาร์โมนิกเหล่านั้นแยกออกมาอย่างกว้างขวางจากความถี่คลื่นพาห้และทำให้เกิดการแทรกซ้อนกันกับความถี่ที่อยู่ใกล้กัน การเกิดโอเวอร์มอดูเลตนั้นไม่เป็นที่ต้องการ และหลายระบบได้มีวงจรพิเศษที่ทำการจำกัดการมอดูเลต ทำให้ไม่สามารถที่จะมอดูเลตเกิน 100%

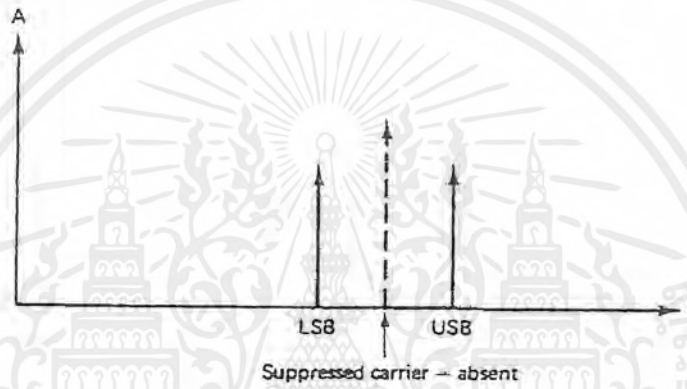
2.5.5 การกำจัดคลื่นพาห้และไซด์แบนด์เดี่ยว (Suppressed Carriers and Single Sideband)

สัญญาณการมอดูเลตแอมพลิจูดได้มีการกล่าวว่าง่ายต่อการผลิต แต่ก็ยังคงมีอุปสรรคในทางปฏิบัติในการนำมาใช้งานในระบบการสื่อสารจริงๆ หลายระบบ แบนด์วิดท์ของ AM นั้นเป็นสองเท่าของสัญญาณที่นำมามอดูเลต (ไซด์แบนด์เหมือนกันสองอัน) และกำลังที่ใช้ในการส่งสัญญาณส่วนใหญ่อยู่ในคลื่นพาห้ ไม่ใช่ในข้อมูลข่าวสารที่ไซด์แบนด์ ปัญหาเหล่านั้นที่เกิดขึ้นใน AM , ความผันผวนใน AM นั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้รับการพัฒนาขึ้นมา รูปแบบอื่นของAMได้ถูกนำมาใช้งาน เมื่อแบนด์วิดท์สามารถทำให้ประหยัดได้ หรือกำลังงานถูกใช้ให้เกิดประโยชน์มากขึ้น และวางจรรยาในการส่งและรับสัญญาณได้ซับซ้อนมากขึ้น

ถ้าคลื่นพาห้สามารถย้ายออกไปหรือทำให้น้อยลง สัญญาณที่ทำการส่งจะประกอบไปด้วย ข้อมูลข่าวสารที่ไซด์แบนด์ทั้งสองข้าง และกำลังในการส่งทั้งหมด เมื่อคลื่นพาห้ถูกกดทอนลงเรียกว่า การมอดูเลตแบบไซด์แบนด์คู่แบบกำจัดคลื่นพาห้ (Double Sideband Suppressed Carrier : DSB-SC) ซึ่งจะมีกำลังคลื่นพาห้หายไป 2 ใน 3 เหลือใกล้เคียงกับกำลังที่อยู่ในไซด์แบนด์ สัญญาณ DSB-SC ในขอบเขตของความถี่ดังแสดงในรูป 2.27



รูป 2.27 DSB-SC ในขอบเขตทางความถี่

ตัวอย่างแสดงถึงการเพิ่มของกำลังของสัญญาณข่าวสาร สำหรับกำลังที่นำมาใช้งานทั้งหมด 100W เปรียบเทียบกับกำลังในไซด์แบนด์ เมื่อการมอดูเลตนี้เป็นแบบมาตรฐานใน AM ที่มีดัชนีการมอดูเลตเป็น 100% กับการกำจัดคลื่นพาห้แบบที่ 90% ของคลื่นพาห้ถูกกำจัด ซึ่งจะดูว่าในกรณีที่มีการกำจัดคลื่นพาห้แล้วกำลังที่ไซด์แบนด์จะเพิ่มเป็นเท่าไร

สำหรับ AM แบบปกติกำหนดให้เป็นแบบ 100% 1 ใน 3 ของกำลังจะมีในไซด์แบนด์(ในกรณีนี้ $100/3=33.3W$) และในคลื่นพาห้มีอยู่ 2 ใน 3 ($66.7W$) ในกรณีของ DSB-SC 90% ของกำลังคลื่นพาห้เท่ากับ $90\% \times 66.7 = 60W$ จะถูกย้ายออกไปและจะไปให้แก่ไซด์แบนด์ ทำให้กำลังไซด์แบนด์อันใหม่คือกำลังไซด์แบนด์ก่อนหน้า $+90\%$ ของคลื่นพาห้ก่อนหน้า $= 33.3 + 60 = 93.3W$ อัตราส่วนของกำลังงานที่ไซด์แบนด์ใหม่นี้กับกำลังงานที่ไซด์แบนด์เก่ามีค่าเท่ากับ $93.3/33.3$ เท่ากับ 2.8 หรือประมาณ 4.5dB ซึ่งแสดงว่าเพิ่มขึ้นถ้าในAM แบบปกติกำลังในการส่งเกิดที่ไซด์แบนด์เท่ากับ 33.3% ในกรณีของ DSB-SC จะเกิดกำลังที่ไซด์แบนด์มากกว่า 93%

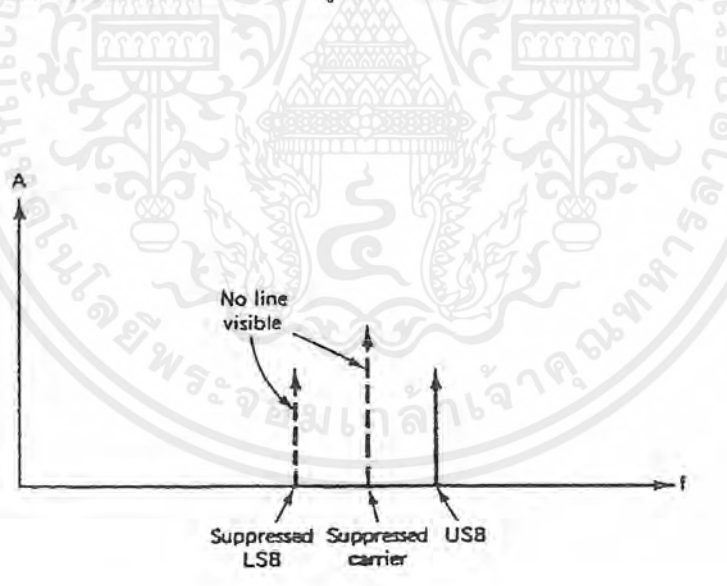
ขณะที่ DSB-SC สามารถปรับปรุงกำลังที่ใช้ในการส่ง และสัญญาณข้อมูลข่าวสารที่ส่งและรับได้อย่างดี แบนด์วิดท์ของสัญญาณเป็นสองเท่าของสัญญาณที่นำมามอดูเลตดั้งเดิม อย่างไรก็ตามไซด์แบนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งสองข้างนั้นจะมีค่ามากขึ้นไป ดังนั้นจึงเกิดกำลังในการส่งที่ไม่ทำให้เกิดประโยชน์ที่จะแบ่งให้ไซด์แบนด์ทั้งสองนั้น ปัญหาที่กล่าวมานั้นสามารถแก้ไขโดยทำการกำจัดคลื่นพาห์ และไซด์แบนด์ข้างหนึ่ง ซึ่งวิธีนี้เรียกว่า ไซด์แบนด์เดี่ยวแบบกำจัดคลื่นพาห์ หรือเรียกง่าย ๆ ว่า ไซด์แบนด์เดี่ยว (Single Sideband : SSB) SSB นั้นจะมีประสิทธิภาพมากที่สุดในการทำ AM นั่นคือกำลังที่ใช้ในการส่งทั้งหมดใช้สำหรับการส่งข่าวสารในไซด์แบนด์ข้างเดียว

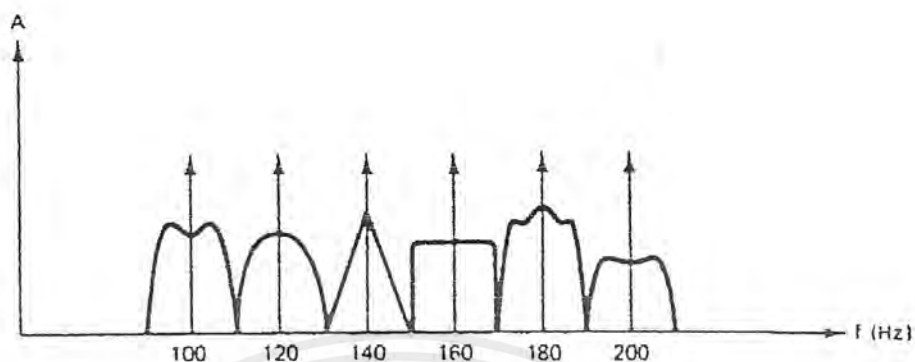
เป็นที่ทราบว่าการกำลังของ AM เป็นอัตราส่วนกำลังของสัญญาณคลื่นพาห์ เครื่องส่งกำลัง 1000W จะมีกำลังของคลื่นพาห์ 1000W และดัชนีการมอดูเลตไม่ได้ใช้บอกถึงระดับของกำลัง SSB ไม่มีคลื่นพาห์ที่ใช้เป็นตัววัดความแรงของสัญญาณ นั่นคือกำลังถูกกำหนดโดยกำลังเอนVELOPE สูงสุด (Peak envelope power : PEP) ซึ่งถูกกำหนดเป็นกำลัง r_{ms} ที่จุดสูงสุดของรูปคลื่น (สำหรับ SSB ค่ากำลัง r_{ms} ก็คือกำลังสูงสุดที่ไซด์แบนด์)

ในขอบเขตของเวลา สัญญาณ SSB จะไม่ปรากฏออกมาในรูปของสัญญาณมอดูเลต และแบนด์วิดท์ แต่จะแสดงออกมาในขอบเขตของความถี่ดังในรูปที่ 2.28 สเปกตรัมของความถี่แสดงไซด์แบนด์ด้านสูงเพียงอย่างเดียวของ AM ซึ่งแต่เดิมนั้นมีทั้งคลื่นพาห์และไซด์แบนด์ด้านสูง แบนด์วิดท์นั้นมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของ AM แบบเดิม และกำลังทั้งหมดอยู่ในข้อมูลข่าวสารในไซด์แบนด์หรืออาจเป็นไปได้ที่ไซด์แบนด์ด้านสูงถูกกำจัดออกไป และใช้งานในไซด์แบนด์ด้านต่ำแทน ในเครื่องส่งสัญญาณ SSB ส่วนใหญ่ยอมให้ผู้ใช้งานเลือกได้ว่าจะใช้ไซด์แบนด์ด้านสูงหรือด้านต่ำในการกระจายเสียงออกไป



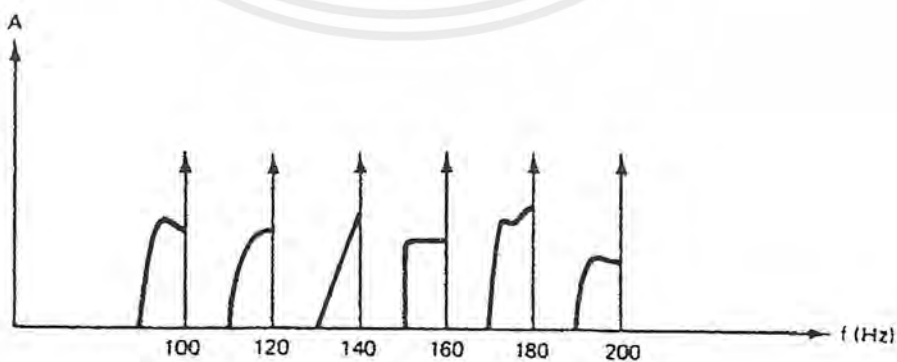
รูป 2.28 SSB ในขอบเขตทางความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.29 การใช้สเปกตรัมเต็มแถบความถี่ของ DSB

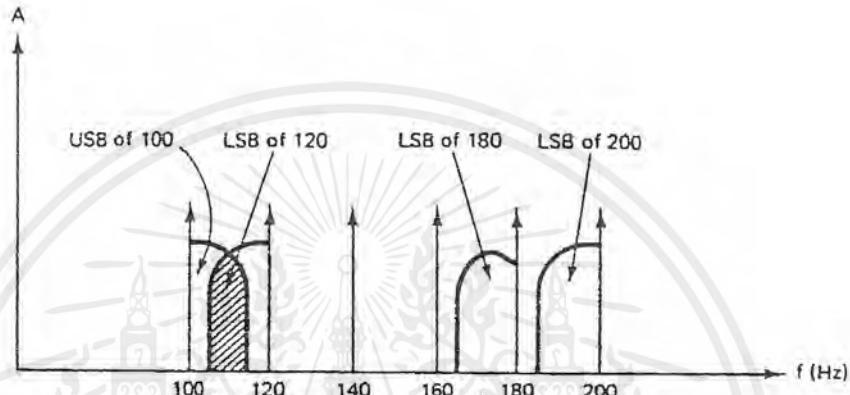
สมมุติว่าคลื่นพหุนั้นเรียงต่อกันไปทุก 20kHz จาก 100ถึง200kHz และสัญญาณที่นำมามอดูเลตมีแบนด์วิดท์ 10kHz สเปกตรัมความถี่ภายหลังกระบวนการ AM ประกอบไปด้วยคลื่นพหุที่ 100,120,140,.....,200kHz ซึ่งจะมีไซด์แบนด์ด้านสูงและไซด์แบนด์ด้านต่ำ 10kHzในแต่ละคลื่นพหุดังในรูป 2.29 ซึ่งสเปกตรัมนี้ได้ถูกใช้ไปเต็มที่ ถ้า SSB ถูกใช้ในไซด์แบนด์ด้านต่ำเพียงด้านเดียวดังแสดงในรูป 2.30 จะมีสเปกตรัมเพียงข้างเดียว สเปกตรัมอันใหม่นี้สามารถถูกใช้ได้สองทาง ทางหนึ่งคือยอมให้แต่ละสัญญาณที่นำมามอดูเลตใช้งานเป็นสองเท่าของแบนด์วิดท์อันเดิม ในกรณีนี้คือ 20kHz นั่นคือข่าวสารทั้งหมดที่ส่งได้ถูกแบ่งเป็นส่วนตามแบนด์วิดท์ หมายความว่าผู้ใช้งานแต่ละคนสามารถส่งข้อมูลข่าวสารเป็นสองเท่าในเวลาเดียวกัน



รูป 2.30 สเปกตรัม SSB ซึ่งใช้ไซด์แบนด์ด้านต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกทางหนึ่งคือเป็นการกำหนดคลื่นพาห้ขึ้นมาใหม่ระหว่างอันเดม และใช้สร้างไซด์แบนด์ด้านต่ำขึ้นมาใหม่ การมอดูเลตแบบSSB ใช้การมอดูเลตสัญญาณที่มีแบนด์วิดท์อันเดียวกับสัญญาณเดิม ผลที่เกิดขึ้นคือ จะทำให้มีผู้ใช้งานมากขึ้น (เครื่องส่งสัญญาณ)ยินยอมให้ใช้สเปกตรัมอันเดียวกัน ทั้งผู้ใช้งานเก่าและใหม่ได้ยอมรับที่จะใช้ไซด์แบนด์ด้านเดียวกัน (ด้านสูงหรือด้านต่ำ) ถ้าการส่งข้อมูลที่คลื่นพาห้อันหนึ่ง ใช้งานไซด์แบนด์ด้านสูงและมีผู้ใช้งานที่คลื่นพาห้ถัดไปใช้ที่ไซด์แบนด์ต่ำ จะทำให้ไซด์แบนด์ทั้งสองไซด์แบนด์นั้นเกิดการรบกวนกันดังรูป 2.31



รูป 2.31 การรบกวนกันเนื่องจากใช้ไซด์แบนด์กันคนละข้าง

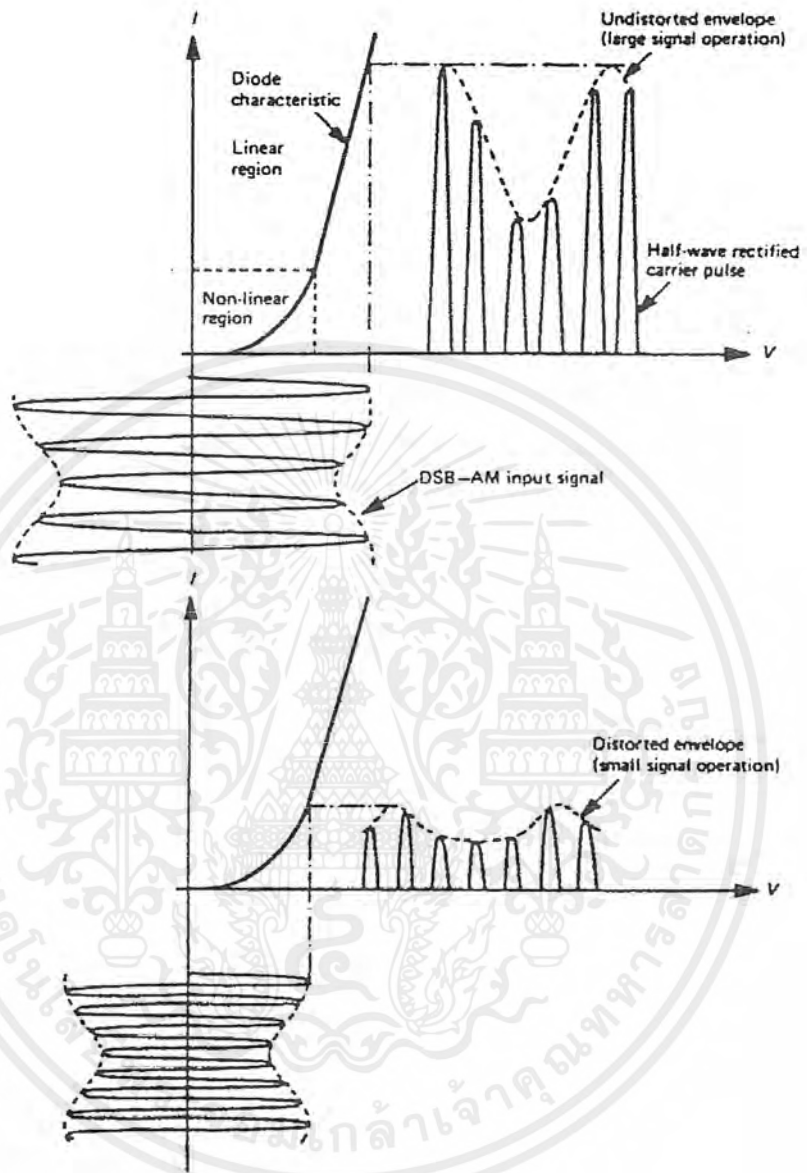
2.5.6 การตีเทคไซด์แบนด์คู่ (DSB-AM detection)

การตีเทค(ตีมอดูเลต) ของDSBสามารถพิจารณาภายใต้สองหัวข้อ คือการตีเทคแบบไม่มีการติดต่อกัน(non-coherent detection) และการตีเทคแบบมีการติดต่อกัน(coherent detection)หรือ synchronous เครื่องรับสัญญาณกระจายเสียงจะเป็นชนิดซูเปอร์เฮเทอโรไดน์(superheterodyne)และมีการตีเทคเอ็นวีโลปด้วย การมาถึงของการรวม เฟสล็อกลูป(phase lock loop : PLL) การตีเทคแบบโคฮีเรนท์เป็นสิ่งที่ดึงดูดความสนใจในขณะนี้ ตัวตีเทคเอ็นวีโลปจะทำการสร้างเอ็นวีโลปของคลื่นพาห้ที่มอดูเลตแล้วขึ้นมา ตัวตีเทคนี้จะทำให้กลับมาเป็นคลื่นแบบครึ่งรูป และมีการใช้ซิกนอลโคโอด ซึ่งให้ความสัมพันธ์ของกระแสและโวลเตจดังรูป 2.32

โคโอดจะเป็นตัวกลับสัญญาณและมีผลต่อเอ็นวีโลปของสัญญาณ DSB ดังแสดงในรูป 2.32 สำหรับคลื่นพาห้ที่มีเอ็นวีโลปกว้าง เอ็นวีโลปจะถูกสร้างขึ้นมา โดยส่วนที่เป็นลักษณะเชิงเส้น(จัดการที่ดัชนีการมอดูเลตน้อยกว่า 100%) และผลที่ออกมาไม่มีความเพี้ยน ซึ่งเรียกว่าการดำเนินการกับสัญญาณขนาดใหญ่ สำหรับแอมพลิจูดของคลื่นพาห้ที่มีขนาดเล็ก เอ็นวีโลปจะถูกสร้างโดยส่วนที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น และความคิดเพี้ยนของเอ็นวีโลปก็จะปรากฏให้เห็น เมื่ออินพุตที่จะเข้ามาตีเทคคือ

$$V_{in} = K[1+m\cos(2\pi f_m t)]\cos(2\pi f_c t)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.32 สัญญาณขนาดเล็กและขนาดใหญ่ที่ดำเนินการโดยการใช้ไดโอดตีเทค

เมื่อดำเนินการที่สัญญาณขนาดใหญ่ เอาท์พุทที่ออกมาจะเป็น

$$i = P[1+m\cos(2\pi f_m t)]V(t)$$

เมื่อ $V(t)$ เป็นความถี่คลื่นพาห้ที่มีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์เพียงครึ่งรูป ทำการแทน $V(t)$ โดยการทำอนุกรมฟูเรียร์ เอาท์พุทจะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i = P[1 + m \cos(2\pi f_m t)] [C_0 + C_1 \cos(2\pi f_c t) + C_2 \cos(4\pi f_c t) + C_3 \cos(6\pi f_c t) + \dots]$$

หรือได้เป็น $i = PC_0 + PC_0 \cos(2\pi f_m t) + \text{ส่วนที่ไม่ต้องการ}$

โดยที่ส่วนที่ไม่ต้องการสามารถตัดทิ้งออกไปได้ เพื่อให้แน่ใจว่าเอ็นวีโบลอยยังคงอยู่ในพื้นที่ที่เป็นเชิงเส้น ดัชนีการมอดูเลตจะต้องน้อยกว่า 100% เมื่อการดำเนินการในสัญญาณขนาดเล็ก กระแสไดโอดจะเป็น

$$i = aV_{in} + bV_{in}^2 + cV_{in}^3 + \dots$$

ให้ $V_{in} = K[\cos 2\pi f_c t + \frac{1}{2} m \cos 2\pi(f_c - f_m)t - \frac{1}{2} m \cos 2\pi(f_c + f_m)t]$

ยกกำลังสองจะให้กระแสเอาท์พุทเป็น

$$bK^2 [\cos 2\pi f_c t + \frac{1}{2} m \cos 2\pi(f_c - f_m)t - \frac{1}{2} m \cos 2\pi(f_c + f_m)t]^2$$

หรือ $b[K^2 m \cos(2\pi f_m t) + \frac{1}{4} K^2 m^2 \cos(4\pi f_c t)] + \text{ส่วนที่ไม่ต้องการ}$

ในส่วนที่ไม่ต้องการนั้นอยู่นอกแบนด์วิดท์ของสัญญาณที่นำมามอดูเลต ดังนั้นจึงสามารถตัดทิ้งได้

การตีเทคแบบ โคลีเรนที่เป็นการดำเนินการที่ตรงข้ามกับการมอดูเลต เช่น ความถี่ของไซน์แอมป์ได้ถูกแปลงกลับมาเป็นเบสแบนด์ โดยคูณสัญญาณ DSB ด้วยความถี่ที่เป็นคลื่นรูปไซน์อันเดียวกันกับคลื่นพาห์

การคำนวณพื้นฐานของลูปสามารถอธิบายดังนี้ เอาท์พุทที่เข้ามาคือสัญญาณ DSB และได้คลื่นรูปไซน์จาก VCO (Voltage Controlled Oscillator) เอาท์พุทของตัวคูณเป็นสัญญาณที่มีการแบ่งเฟสต่างกันระหว่างสัญญาณของ DSB และเอาท์พุทของ VCO สัญญาณที่มีความผิดพลาดจะนำมาผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter) ไปที่อินพุทของ VCO ผลที่เกิดขึ้นทำให้ ความถี่ที่ออกมาของ VCO เกิดการเปลี่ยนแปลงในขนาดเล็กน้อย ซึ่ง PLL นั้นมีความจำเป็นในระบบย้อนกลับ เมื่อลูปล็อกเอาไว้แล้วความถี่ที่ออกมาจาก VCO จะเท่ากับความถี่คลื่นพาห์ที่เข้ามา

2.5.7 การดีเทคไซต์แบบคอสต์ลูปแบบกำจัดคลื่นพาห้(DSB-SC detection)

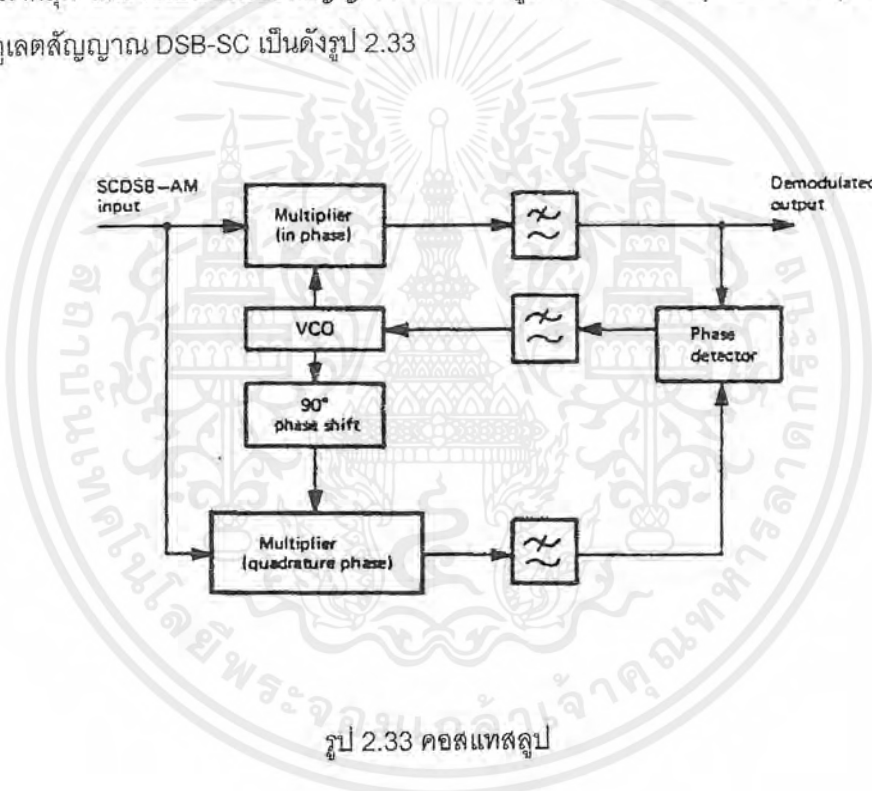
การดีเทคแบบนี้ต้องการการดีเทคแบบโคฮีเรนซ์ แต่มันไม่มีคลื่นพาห้ส่งมาด้วย ดังนั้นจึงมีการสร้างมันขึ้นมาใหม่ด้วยโลคัลออสซิลเลเตอร์ วงจรพิเศษมีความสำคัญและต้องการเพื่อให้แน่ใจว่าโลคัลออสซิลเลเตอร์นั้นอยู่ในเฟสเดียวกันกับสัญญาณที่เข้ามา ถ้าสัญญาณที่เข้ามาแทนโดย

$$V_{in} = K\cos(2\pi f_m t)\cos(2\pi f_c t)$$

เอาท์พุทของโลคัลออสซิลเลเตอร์คือ $\cos(2\pi f_c t + \phi)$ ดังนั้นเอาท์พุทของการดีเทคแบบโคฮีเรนซ์จะเป็น

$$V_{out} = \frac{1}{2} K\cos(2\pi f_m t)[\cos(4\pi f_c t + \phi) + \cos\phi]$$

ภายหลังการกำจัดส่วนที่เป็นศูนย์กลางที่ $2f_c$ จะให้ส่วน $\frac{1}{2} K\cos(2\pi f_m t)\cos\phi$ เมื่อ $\phi=0$ เอาท์พุทจะมีค่ามากที่สุด และจะเป็นส่วนของสัญญาณที่นำมาถอดเลขเดิม เมื่อ $\phi=90^\circ$ เอาท์พุทจะเป็นศูนย์ วงจรดีมอดูเลตสัญญาณ DSB-SC เป็นดังรูป 2.33



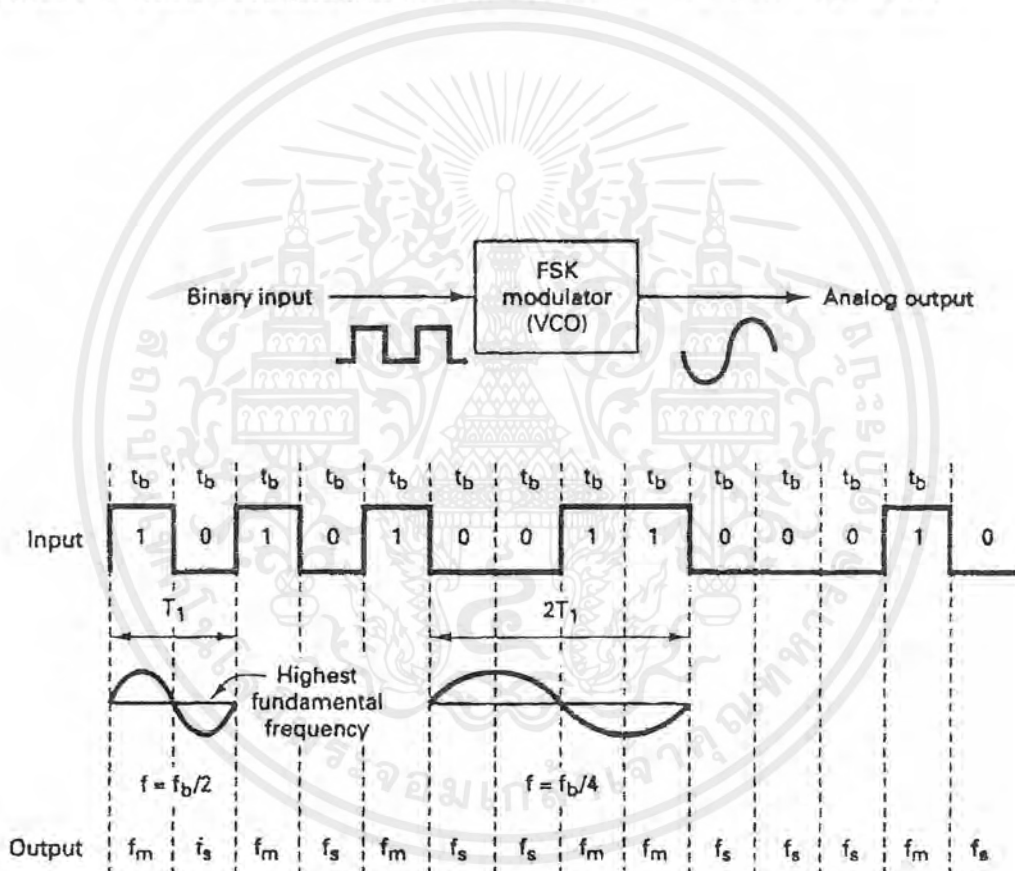
รูป 2.33 คอสแทสลูป

ถ้าโลคัลออสซิลเลเตอร์มีเฟสเดียวกันกับคลื่นพาห้ที่ช่องความถี่ตรงกัน จะให้เอาท์พุทออกมาถูกต้อง จึงเรียกว่า Synchronous detection คอสแทสลูป(Costas loop)นี้เป็นเพียงหนึ่งในหลายๆวิธีที่จะทำให้ความถี่และเฟสของทางเครื่องรับและเครื่องส่งมีค่าเท่ากัน

2.6 Frequency Shift Keying (FSK)

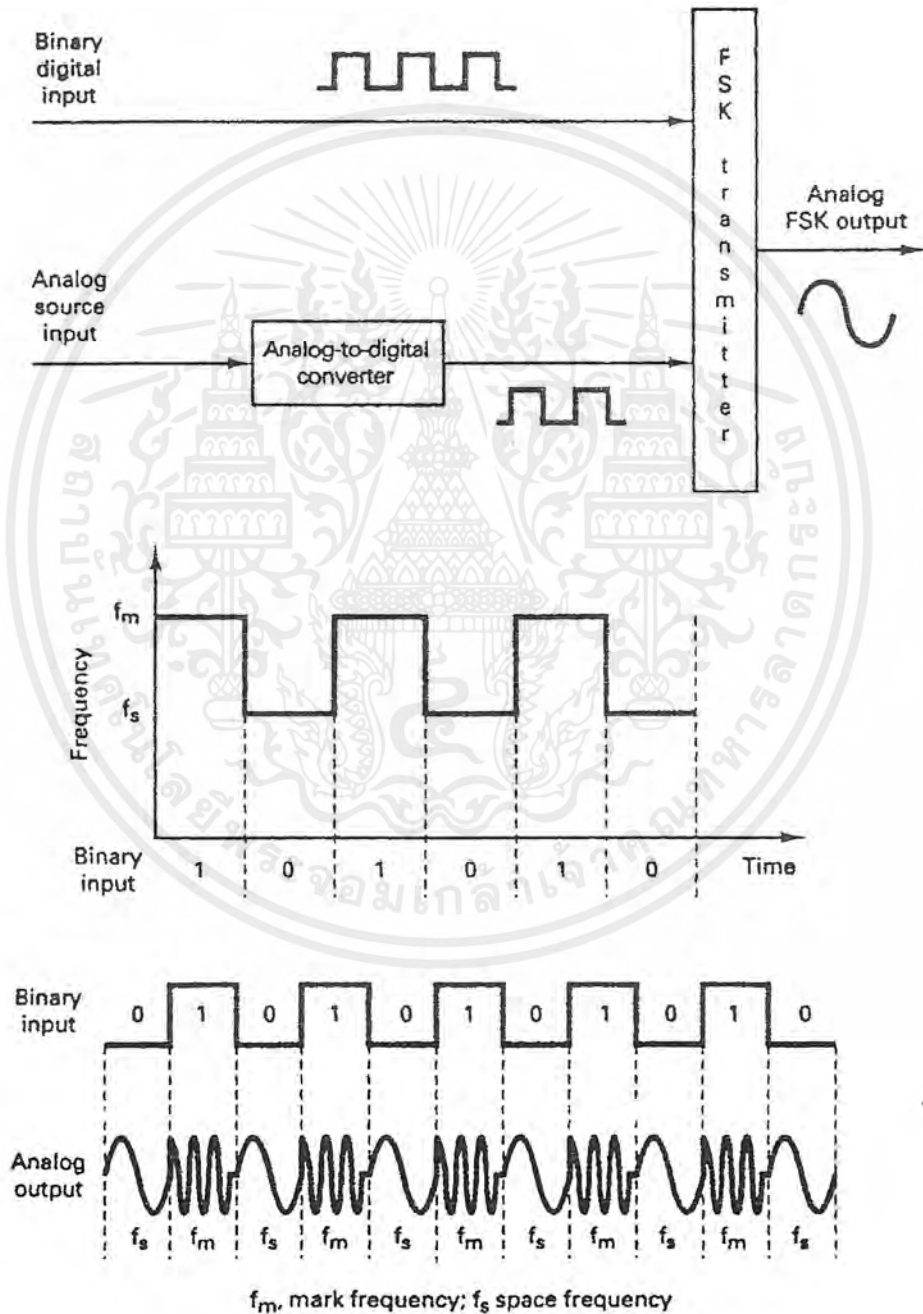
Frequency Shift Keying (FSK) เป็นคิิตอลมอดูเลตชนิดหนึ่ง ซึ่งมีหลักการที่ว่าเมื่อข้อมูลที่เป็นสัญญาณคิิตอลที่มีลักษณะเป็นข้อมูลไบนารี จะทำให้ความถี่เลื่อนหรือเบี่ยงเบนไปตามการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลไบนารีที่เข้ามา ดังนั้นสัญญาณทางเอาต์พุตของตัวกำเนิด FSK จะอยู่ในรูปของความถี่ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Frequency Continuous)

เมื่อข้อมูลไบนารีด้านอินพุตเปลี่ยนแปลงจากสถานะโลจิก “1” เป็นโลจิก “0” (หรือในทางกลับกันคือ โลจิก “0” เป็นโลจิก “1”) สัญญาณเอาต์พุตจาก FSK ก็จะเลื่อนความถี่ระหว่าง 2 ความถี่ด้วยกันคือ ความถี่โลจิก “1” หรือ Mark Frequency (f_m) และความถี่โลจิก “0” หรือ Space Frequency (f_s)



รูป 2.34 FSK Oscillator

การเปลี่ยนแปลง (หรือการเลื่อน) ของความถี่แต่ละครั้ง จะเกิดขึ้นเมื่อสถานะของโลจิกด้าน สัญญาณเข้าเปลี่ยนแปลง นั่นคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณออกจะเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลง สัญญาณเข้า ซึ่งในดิจิทัล มอดูเลชันนั้น อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณด้านอินพุทของ FSK Generator จะเรียกว่า “อัตรามิท” หรือ Bit Rate มีหน่วยเป็นบิตต่อวินาที (bps) ส่วนอัตราการเปลี่ยนแปลง ของสัญญาณด้านเอาต์พุทของ FSK Generator เรียกว่า “อัตรามอร์ด” หรือ Baud Rate ดังนั้นในการส่งข้อมูล ด้วยเทคนิค FSK อัตรามิทจะเท่ากับอัตรามอร์ดเสมอ



รูป 2.35 แสดงสัญญาณที่ได้จาก FSK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบการสื่อสารข้อมูลด้วยสัญญาณอนาล็อกหรือสัญญาณความถี่นั้น แบนด์วิธ(bandwidth) เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นอันดับแรก เนื่องจากวิธีการของ FSK อยู่บนพื้นฐานเดียวกันกับวิธีการของ FM ดังนั้นการอธิบายถึงสูตรต่างๆก็จะใช้หลักการของ FM ทุกอย่าง

จากรูป 2.35 แสดงถึงตัว FSK มอดูเลเตอร์ ซึ่งใช้หลักการเดียวกับเฟมมมอดูเลเตอร์ คือ ใช้หลักการของ VCO(Voltage Control Oscillator) จะเห็นว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เร็วที่สุดของสัญญาณอินพุต จะเกิดขึ้นเมื่อข้อมูลไบนารีมีลักษณะเป็น 1 และ 0 สลับกัน ซึ่งก็คือ สัญญาณสี่เหลี่ยมมันเอง(Square Wave) ตามรูป 2.35 เป็นสัญญาณในช่วง T_b

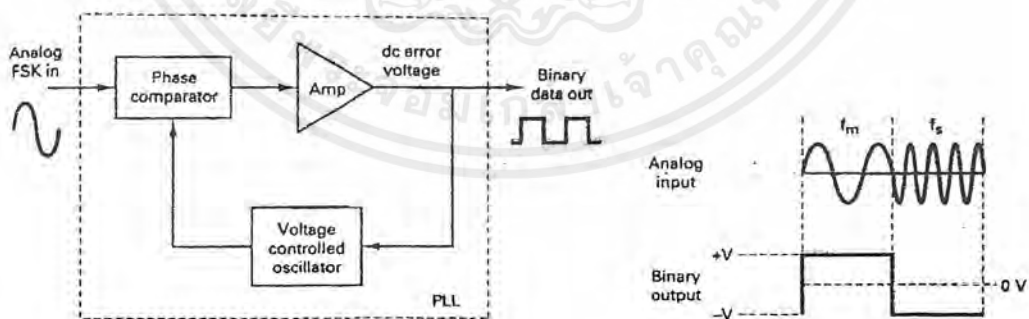
ความถี่หลักของคลื่นสี่เหลี่ยมจะมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของ Bit Rate ดังนั้นถ้าพิจารณาเฉพาะความถี่หลักเพียงอย่างเดียวแล้ว ความถี่สูงสุดของสัญญาณดิจิทัลที่ต้องการนำมอดูเลตแบบ FSK จะเท่ากับครึ่งหนึ่งของ Bit Rate คือ

$$F_{\text{amax}} = \text{Bit Rate}/2$$

เมื่อ F_{amax} = ความถี่สูงสุดของสัญญาณดิจิทัลที่จะนำมอดูเลต

FSK Demodulator คือ ตัวรับสัญญาณ FSK(FSK Receiver) จะเป็นตัวแยกสัญญาณไบนารีออกจากสัญญาณ FSK โดยส่วนมากจะใช้วงจร PLL(Phase Locked Loop) ดังรูป 2.36

PLL ใน FSK Demodulator มีหลักการการทำงานเหมือนกับ PLL ใน FM Detector ทุกอย่าง คือจะมีความถี่ Free running frequency เท่ากับ Centre frequency (f_0) และในขณะที่อินพุตเลื่อนไปมา ระหว่าง f_m กับ f_s จะทำให้เกิดแรงดันคลาดเคลื่อนไฟตรง (DC Error Voltage) ซึ่งเป็นผลมาจากการเปรียบเทียบทางเฟส (Phase Comparator) ของสัญญาณอินพุต เนื่องจากความถี่อินพุตที่เข้ามายัง PLL มีเพียง 2 ความถี่คือ f_m และ f_s ดังนั้น ค่าแรงดันดังกล่าว จึงมีเพียงสองระดับเท่านั้น ซึ่งสามารถแทนด้วยโลจิก "1" และ โลจิก "0" เมื่อความถี่ทางอินพุตเป็น f_m และ f_s ตามลำดับ เราจึงได้สัญญาณทางเอาต์พุตจาก PLL กลับมาเป็นข้อมูลไบนารีเหมือนกับคอนแรกที่ส่งมาทุกประการ



รูป 2.36 PLL-FSK demodulator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบวงจร

ลักษณะการทำงานของวงจร

สามารถส่งได้ทั้งเสียงและสัญญาณดิจิทัล(Data) โดยการนำสัญญาณอนาลอกมาทำการมอดูเลตเชิงแอมพลิจูด(Amplitude Modulation) และนำสัญญาณดิจิทัลมาทำการมอดูเลตแบบ FSK(Frequency Shift Keying) แล้วนำมาผ่านวงจรรวมสัญญาณ (Summing) ก่อนที่จะนำสัญญาณที่ได้ไปควบคุมอุปกรณ์กำเนิดแสง(Light source) ซึ่งใช้ LED โดยวิธี Intensity Modulation(IM) เป็นการนำขนาดของสัญญาณไปควบคุมให้ความเข้มของแสงเปลี่ยนแปลงไปแล้วจึงป้อนเข้าสู่เส้นใยแสงต่อไป

ในด้านรับ PIN Photodiode จะทำการเปลี่ยนสัญญาณแสงที่รับได้ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยแถบความถี่ที่ได้จะผ่านวงจรกรองความถี่เพื่อแยกสัญญาณออกจากกันก่อนที่จะถูกตีเทกกลับเป็นสัญญาณเดิม

3.1 FSK Modulator

ในการออกแบบ FSK Generator นั้นใช้ไอซีเบอร์ XR-2206 ซึ่งเป็น โมโนลิททิค ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ กำเนิดรูปคลื่นเอาท์พุทได้ทั้งคลื่นไซน์, คลื่นสามเหลี่ยม, คลื่นสี่เหลี่ยมหรือเรมป์(Ramp) โดยมีย่านความถี่ตั้งแต่ 0.01Hz ถึง 1MHz

ในที่นี้จะใช้ XR-2206 เป็นตัวกำเนิดคลื่นรูปไปซัน ในลักษณะ FSK Generator โดยใช้โทมิ่ง รีจิสเตอร์ R1 และ R2 ที่ต่อระหว่างขา 7 และขา 8 กับกราวด์ตามลำดับ โดยที่สัญญาณดิจิทัล(หรือ Keying Signal) ที่ป้อนมายังขา 9 ของไอซี เป็นตัวกำหนดสัญญาณทางเอาท์พุท(ขา 2) ถ้าขา 9 อยู่ในสถานะวงจรเปิดหรือมี $V_{in} \geq 2V$ แล้ว R1 จะเป็นตัวกำหนดโทมิ่งร่วมกับตัวเก็บประจุที่ต่อคร่อมระหว่างขา 5 กับขา 6 (หรือโนทานองเดียวกัน ถ้าขา 9 มี $V_{in} \leq 1V$ แล้ว R2 จะเป็นตัวกำหนดโทมิ่ง ร่วมกับตัวเก็บประจุระหว่างขา 5 กับขา 6 เช่นเดียวกัน) จึงทำให้ความถี่เอาท์พุทจะอยู่ในช่วงระหว่าง f_m กับ f_s โดยทั้ง f_m และ f_s จะอิสระต่อกันและสามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ได้โดยการเลือกค่า R1 หรือ R2 ตามสมการข้างล่าง

$$f_m = \frac{1}{R_1 C}$$

$$f_s = \frac{1}{R_2 C}$$

ตัวเก็บประจุระหว่างขา 5 กับขา 6 จะอยู่ในช่วง 1,000 pF-100 μ F และตัวต้านทาน R1 และ R2 จะอยู่ในช่วง 4K Ω -200K Ω

ในการออกแบบด้านส่งนั้นจำเป็นต้องกำหนดค่า f_m และ f_s ก่อน ซึ่งจะกำหนดเองก็ได้ แต่ในทางปฏิบัติจริงแล้วบางครั้งการกำหนด f_m และ f_s เองนั้นมักจะเป็นปัญหาในเรื่องความถี่ฮาร์โมนิกและการกำหนด f_m และ f_s นั้นจะเกี่ยวข้องไปถึง Baud Rate ในการรับส่งด้วย ดังนั้นจึงมีการกำหนด f_m และ f_s ซึ่งเรียกว่า FSK BAUD และจะแตกต่างกันตาม Baud Rate ดังตาราง

75 Baud	$f_m = 1110 \text{ Hz}$
	$f_s = 1170 \text{ Hz}$
300 Baud	$f_m = 1070 \text{ Hz}$
	$f_s = 1270 \text{ Hz}$
1200 Baud	$f_m = 1200 \text{ Hz}$
	$f_s = 2200 \text{ Hz}$

ตาราง 3.1 FSK BAUD

ความถี่กลาง (Center Frequency = f_0) ของ VCO จะอยู่ในตำแหน่งกลาง ระหว่าง Mark Frequency (f_m) กับ Space Frequency (f_s) โทจิก 1 ด้านอินพุตจะเลื่อนความถี่ของ VCO จาก f_0 ไปเป็น f_s จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลไบนารีด้านอินพุตจาก “1” ไป “0” หรือ “0” ไป “1” จะทำให้ความถี่เอาท์พุทของ VCO เลื่อนหรือเบี่ยงเบนกลับไปมา ระหว่าง f_m กับ f_s เนื่องจาก FSK ก็คือการมอดูเลต แบบ FM (Frequency Modulation) ดังนั้น คชณีการมอดูเลต (Modulate Index = MI) ใน FSK ก็ทำได้จาก FM คือ

$$MI = \frac{\Delta F}{F_a}$$

เมื่อ MI = คชณีการมอดูเลต

ΔF = การเบี่ยงเบนของความถี่ใดๆ จากความถี่กลาง (Hz)

F_a = ความถี่ของสัญญาณที่นำมามอดูเลต (Hz)

ค่า MI ที่ยอมให้มีได้สูงสุดคือ ค่า MI ที่ทำให้แบนด์วิดท์กว้างที่สุด ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อ การเบี่ยงเบนของความถี่ที่ถูกมอดูเลตแล้วและความถี่ของสัญญาณที่นำมามอดูเลตมีค่าสูงสุด

ใน FSK มอดูเลต ค่า ΔF เป็นการเบี่ยงเบนของความถี่สูงสุด (Peak Frequency Deviation) ของสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้ว ซึ่งมีค่าเท่ากับความแตกต่างระหว่าง f_0 กับ f_m หรือ f_0 กับ f_s ซึ่งก็คือ ครึ่งหนึ่งของความแตกต่างระหว่าง f_m กับ f_s นั่นคือ

$$\Delta F = \frac{f_s - f_m}{2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเบี่ยงเบนของความถี่สูงสุดขึ้นอยู่กับขนาดหรือแอมพลิจูดของสัญญาณที่นำมามอดูเลต (สัญญาณดิจิทัล) เมื่อสถานะทางโลจิกเป็น "1" ก็จะให้แรงดันออกมาค่าหนึ่งคงที่ตามสถานะ(เช่น 5V) หรือ ถ้าเป็น โลจิก "0" ก็จะให้แรงดันออกมาคงที่อีกค่าเช่นกัน(เช่น 0V) ดังนั้นความถี่ที่เบี่ยงเบนของ FSK มอดูเลตจะเบี่ยงเบนคงที่และอยู่ในระดับการเบี่ยงเบนของความถี่สูงสุดเสมอ

Fa เป็นความถี่หลักของข้อมูลไบนารีทางด้านอินพุท ซึ่งจะทำให้แบนด์วิดท์ กว้างที่สุด เมื่อ $F_a = \text{Bit Rate}/2$ เท่านั้น เพราะฉะนั้นเราสามารถหาค่า MI ได้จาก

$$MI = \frac{\frac{f_s - f_m}{2}}{\frac{F_b}{2}}$$

$$MI = \frac{f_s - f_m}{F_b}$$

เมื่อ $f_s - f_m$ = ความถี่เบี่ยงเบนสูงสุด
 F_b = อัตราบิตของไบนารีอินพุท

ในการส่งสัญญาณ FM โดยทั่วไป ความกว้างของแบนด์วิดท์จะแปรผันตรงกับค่า MI ซึ่งเช่นเดียวกับ FSK ที่ค่า MI โดยทั่วไปจะต้องมีค่าต่ำกว่า 1 เพื่อให้เป็นเอฟเอ็มแบบแคบ (Narrow band FM) ค่าแบนด์วิดท์แคบที่สุดเรียกว่า Minimum Nyquist Bandwidth (F_n)

MI	J0	J1	J2	J3	J4
0	1.0				
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

ตารางที่ 2 Bessel Function

จากตารางจะเห็นว่า ถ้าค่า MI มีค่ามากขึ้นจะทำให้จำนวนของความถี่ยังมีค่ามากตามไปด้วย นั่นก็คือจะทำให้แบนด์วิดท์มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่เหตุผลที่เลือก MI ค่าเท่ากับ 1 แทนที่จะเลือก MI เท่ากับ 0.25 หรือ 0.5 เนื่องจากใช้สายเส้นใยแสง(Optical Fiber) เป็นตัวกลางในการส่งข้อมูล ซึ่งเส้นใยแสงจะมีแบนด์

วิตกว้างมาก และยิ่งถ้า MI มีค่ามากจะทำให้ S/N (Signal to Noise Ratio) มีค่าดีขึ้น เนื่องจาก FSK เป็น Nonlinear Modulation และสมการของสัญญาณ FM เป็นดังนี้

$$\phi_{FM} = A \cos(\omega_c t + \beta \sin \omega_m t)$$

$$= J_0(\beta) A \cos \omega_c t + \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\beta) A [(-1)^n \cos\{(\omega_c - n\omega_m)t\} + \cos\{(\omega_c + n\omega_m)t\}]$$

สำหรับโครงการนี้ เป็นการส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง 2 ช่องสัญญาณ ซึ่งใช้ความเร็วในการส่งข้อมูล 9,600 Baud สัญญาณดิจิทัลที่มี 2 ระดับ(binary symbol) จึงทำให้สัญญาณมีบิตเรต(bit rate)เท่ากับบอดเรต(baud rate)คือ 9,600 บิตต่อวินาที

ทั้ง 2 ช่องสัญญาณเลือกใช้ Modulation Index(MI) มีค่าเท่ากับ 1 ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า FSK Modulator ก็คือ FM ที่มีอินพุต 2 ระดับ นั่นเอง เมื่อใช้ MI เท่ากับ 1 จากตาราง Bessel function จะได้แถบความถี่ข้างละ 3 ความถี่ โดยแต่ละความถี่จะห่างจากความถี่ข้างเคียงช่วงละ 4.8 kHz (Fb/2 เมื่อ Fb คือ Bit Rate = 9,600 kHz) เพราะฉะนั้นแบนด์วิดท์ได้จึงมีค่าเท่ากับ $6 \times 4.8 \text{ kHz} = 28.8 \text{ kHz}$

เราสามารถทำการปรับค่า R1 ซึ่งต่ออยู่กับขา 7 เพื่อให้ได้ความถี่ fm ตามต้องการ ส่วนความถี่ fs นั้น ทำได้โดยการปรับค่า R2 ที่ต่ออยู่กับขา 80

FSK Modulator 1

$$f_m = 204.8 \text{ kHz}, f_s = 214.4 \text{ kHz}$$

$$\text{จาก } f_m = \frac{1}{R_1 C} \text{ โดยเลือก } C = 2.5 \text{ nF}$$

$$\text{ดังนั้น } R_1 = \frac{1}{f_m C} = \frac{1}{204.8 \times 10^3 \times 2.5 \times 10^{-9}} = 1.953 \times 10^3 \Omega$$

$$\text{จาก } f_s = \frac{1}{R_2 C}$$

$$\text{ดังนั้น } R_2 = \frac{1}{f_s C} = \frac{1}{214.4 \times 10^3 \times 2.5 \times 10^{-9}} = 1.866 \times 10^3 \Omega$$

FSK Modulator 2

$$f_s = 414.4 \text{ kHz}, f_m = 404.8 \text{ kHz}$$

$$\text{จาก } f_m = \frac{1}{R_1 C} \text{ โดยเลือก } C = 1 \text{ nF}$$

$$\text{ดังนั้น } R_1 = \frac{1}{f_m C} = \frac{1}{404.8 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-9}} = 2.47 \times 10^3 \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จาก } f_s = \frac{1}{R_2 C}$$

$$\text{ดังนั้น } R_2 = \frac{1}{f_s C} = \frac{1}{414.4 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-9}} = 2.413 \times 10^3 \Omega$$

ส่วนระดับไฟตรงที่ขาเอาต์พุต (ขา 2) จะมีค่าโดยประมาณเท่ากับแรงดันที่ขา 3 จากวงจรจะเห็นว่าแรงดันที่ขา 3 จะได้จาก การแบ่งแรงดันระหว่างค่าความต้านทาน 5.1 K Ω สองตัวกับแรงดันไฟเลี้ยงประมาณ 6V ดังนั้นการปรับที่ขา 3 ก็เป็นการปรับระดับของสัญญาณเอาต์พุตขา 2 ให้อยู่ในระดับที่ต้องการส่ง

ขา 13 และขา 14 มีไว้สำหรับปรับแต่งรูปคลื่นเพื่อปรับการบิดเพี้ยน (distortion) ของรูปร่างสัญญาณ อันเนื่องมาจากความบิดเพี้ยนฮาร์โมนิก โดยการต่อค่าความต้านทานเข้าไประหว่างขา 13 และขา 14 แต่ในคู่มือ XR-2206 แนะนำให้ใช้ค่า 200 Ω โดยไม่มีการปรับแต่งแต่อย่างใด

3.2 FSK Demodulator

จากวงจรรูป FSK Demodulator $R_0 C_0$ จะเป็นตัวกำหนด free running frequency หรือ Centre frequency (f_0) ของ เฟสล็อกลูป (Phase Lock Loops) R_1 จะเป็นตัวกำหนดแบนด์วิท C_1 จะเป็นตัวกำหนด Damping factor หรือ filter time constant, C_f และ R_f เป็นตัวกำหนดค่า Data FSK output ค่าความต้านทาน R_b (510 k Ω) ระหว่างขา 7 กับขา 8 เป็นตัวป้อนกลับทางบวกเพื่อให้ transition time ของเอาต์พุต FSK เร็วขึ้น ดังนั้นจึงได้ค่าอุปกรณ์ต่างๆดังนี้

FSK Demodulator 1

1. คำนวณค่าความถี่ศูนย์กลาง (f_0) ของ PLL จาก

$$f_0 = \frac{f_m + f_s}{2} = \frac{204.8 + 214.4}{2} = 209.6 \text{ kHz}$$

2. เลือกค่า $C_0 = 200 \text{ pF}$

3. หาค่า $R_0 = \frac{1}{f_0 C_0} = \frac{1}{209.6 \times 10^3 \times 200 \times 10^{-12}} = 23.854 \times 10^3 \Omega$

4. หาค่า R_1 เพื่อตั้ง Bandwidth จาก

$$R_1 = (R_0) \frac{f_0}{\Delta f} \text{ เมื่อ } \Delta f = |f_s - f_m|$$

$$R_1 = \frac{23.854 \times 10^3 \times 209.6 \times 10^3}{9.6 \times 10^3} = 520.812 \times 10^3 \Omega$$

5. หาค่า C_1 เพื่อตั้ง Damping factor

$$C_1 = \frac{C_0}{4} = \frac{200}{4} = 50 \text{ pF}$$

$$6. C_F = \frac{3}{\text{Baud}} = \frac{3}{9.6 \times 10^3} = 312.5 \times 10^6 \text{ pF}$$

FSK Demodulator 2

1. คำนวณค่าความถี่ศูนย์กลาง (f_0) ของ PLL จาก

$$f_0 = \frac{f_m + f_s}{2} = \frac{404.8 + 414.4}{2} = 409.6 \text{ kHz}$$

2. เลือกค่า $C_0 = 200 \text{ pF}$

$$3. \text{หาค่า } R_0 = \frac{1}{f_0 C_0} = \frac{1}{409.6 \times 10^3 \times 200 \times 10^{-12}} = 12.207 \times 10^3 \Omega$$

4. หาค่า R_1 เพื่อตั้ง Bandwidth จาก

$$R_1 = (R_0) \frac{f_0}{\Delta f} \text{ เมื่อ } \Delta f = |f_s - f_m|$$

$$R_1 = \frac{12.207 \times 10^3 \times 409.6 \times 10^3}{9.6 \times 10^3} = 520.833 \times 10^3 \Omega$$

5. หาค่า C_1 เพื่อตั้ง Damping factor

$$C_1 = \frac{C_0}{4} = \frac{200}{4} = 50 \text{ pF}$$

$$6. C_F = \frac{3}{\text{Baud}} = \frac{3}{9.6 \times 10^3} = 312.5 \times 10^6 \text{ pF}$$

3.3 AM Modulator

วงจร AM Modulator นี้ จะใช้ไอซีเบอร์ MC 1496 ซึ่งการต่อของไอซี MC 1496 นี้จะอยู่ในรูป วงจร AM Modulator ซึ่งสัญญาณอินพุตซิกนัลจะถูกป้อนเข้าที่ขาหนึ่งของไอซี ส่วนสัญญาณคลื่นพาห์ (Carrier Signal) จะถูกป้อนเข้าที่ขา 10 ของไอซี ส่วนสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ จะอยู่ที่ขา 6 กับขา 12 ซึ่งเป็นเอาต์พุตแบบ Double Sideband Large Carrier

โดยที่ R_e เป็นตัวปรับ Gain Adjust ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ของ Signal Gain

$$A_{VS} = \frac{V_O}{V_S} = \frac{R_L}{R_e + 2R_e} \quad \text{เมื่อ } r_e = \frac{26 \text{ mV}}{I_E (\text{mA})}$$

$$\text{โดยที่ } V_S = I_5 R_E \text{ (Volts Peak)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15 เป็นกระแสที่ไหลเข้า-ออกขา 5 ของ MC 1496

$$I_5 = I_6 = 112$$

R5 คือตัวต้านทานที่ต่ออยู่กับขา 5 ของไอซี MC 1496 กับกราวด์ เป็นตัวต้านทานไบอัสซึ่งสามารถหาได้จากสมการข้างล่าง

$$R_5 = \frac{V_{cc} - \phi}{I_5} = 500\Omega \quad \text{เมื่อ } \phi = 0.75 \text{ ที่ } T = +25 \text{ องศาเซลเซียส}$$

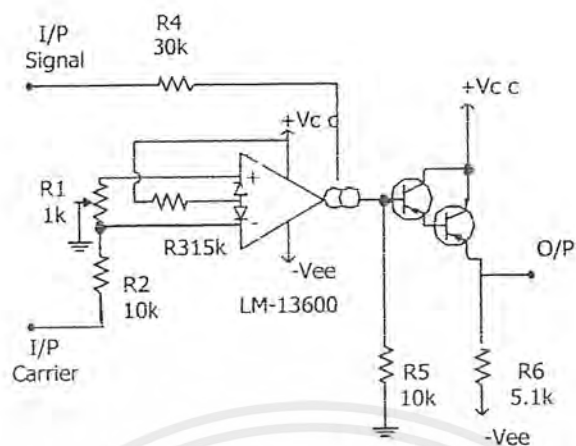
3.4 AM Demodulator

ใช้วงจร envelope detector เนื่องจากง่ายในการออกแบบและประหยัด แต่ก็มีข้อเสียคือ ความไม่เป็นเชิงเส้น(linear) ของการตอบสนองความถี่ ทำให้สัญญาณที่ได้มีแอมพลิจูดที่ไม่แน่นอนในแต่ละความถี่ และเนื่องจากว่าสัญญาณที่ผ่านไดโอดมานั้นมีข่าวสารแฝงมาในรูปแอมพลิจูดจึงนำเอาทริกที่ได้จะผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำเพื่อให้ได้สัญญาณข่าวสารกลับคืนมาเหมือนเดิม แล้วนำสัญญาณที่ได้ไปขยายอีกครั้งหนึ่งเนื่องจากมีแอมพลิจูดต่ำด้วย

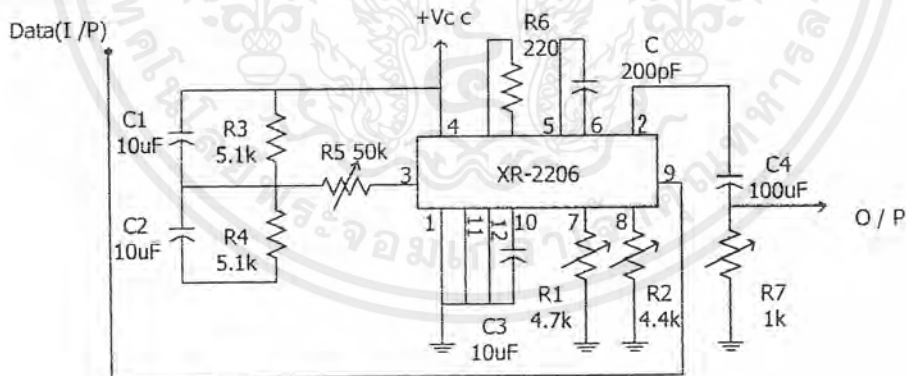
3.5 วงจรขับ LED

ในการส่งสัญญาณแสงนั้นเลือกใช้ความยาวคลื่น 850 nanometer ใช้สายนำสัญญาณ graded index multimode และใช้ LED เบอร์ HFE4020 เป็นแหล่งกำเนิดแสง

การออกแบบนั้นต้องคำนึงถึง forward current (I_F) ที่ไหลผ่าน HFE4020 ด้วย HFE4020 สามารถทน forward current ได้ระหว่าง 10 mA -100 mA วงจรขับ LED ใช้วงจรขยาย class A ดังรูป โดยทำการตั้ง V_c เป็นครึ่งหนึ่งของ V_{cc} และ ตั้งค่า $I_c = 50$ mA

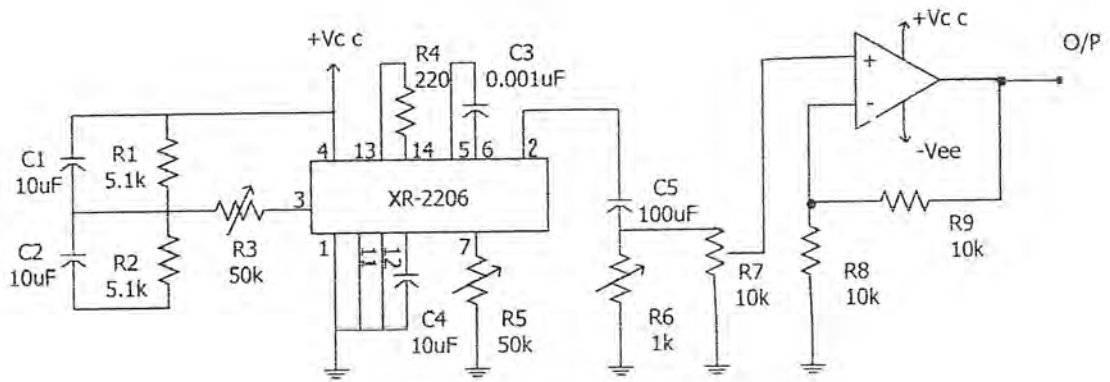


รูป 3.1 AM Modulator

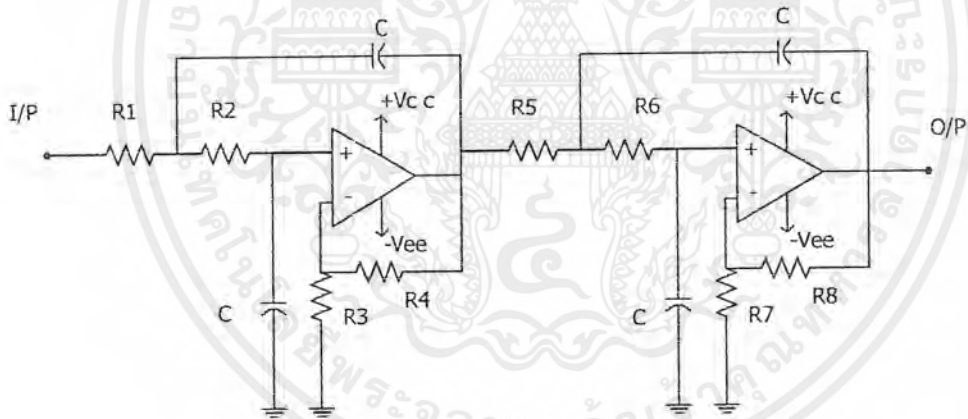


รูป 3.2 FSK Modulator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

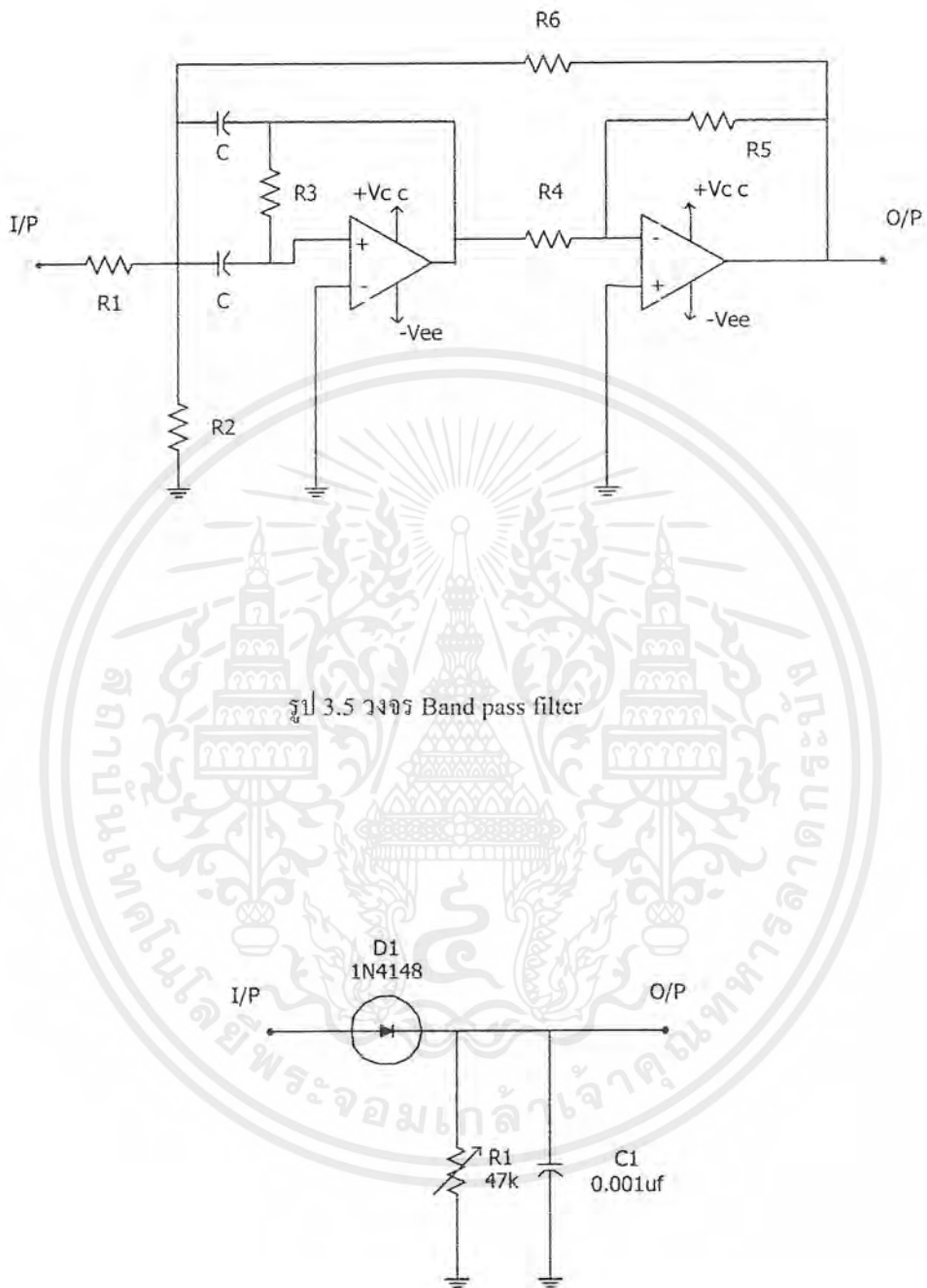


รูป 3.3 AM Oscillator



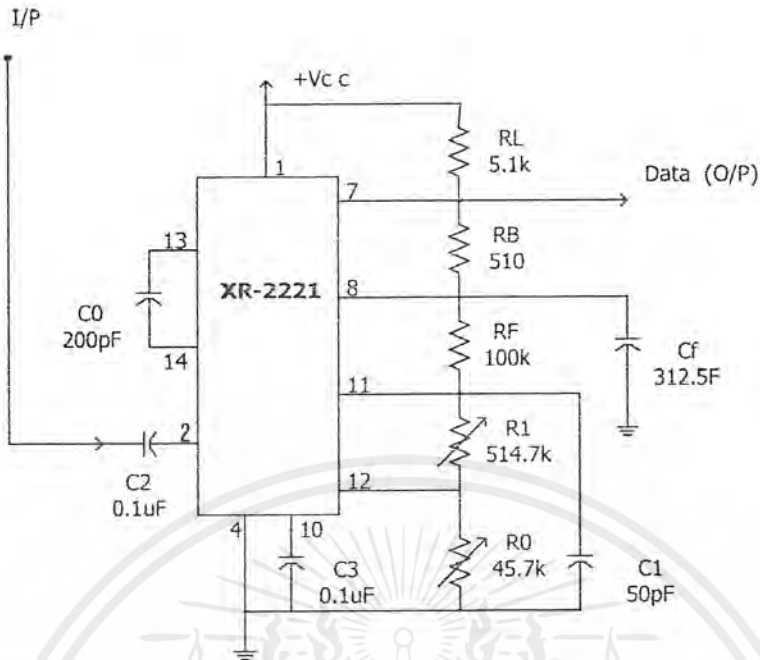
รูป 3.4 วงจร Low pass filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

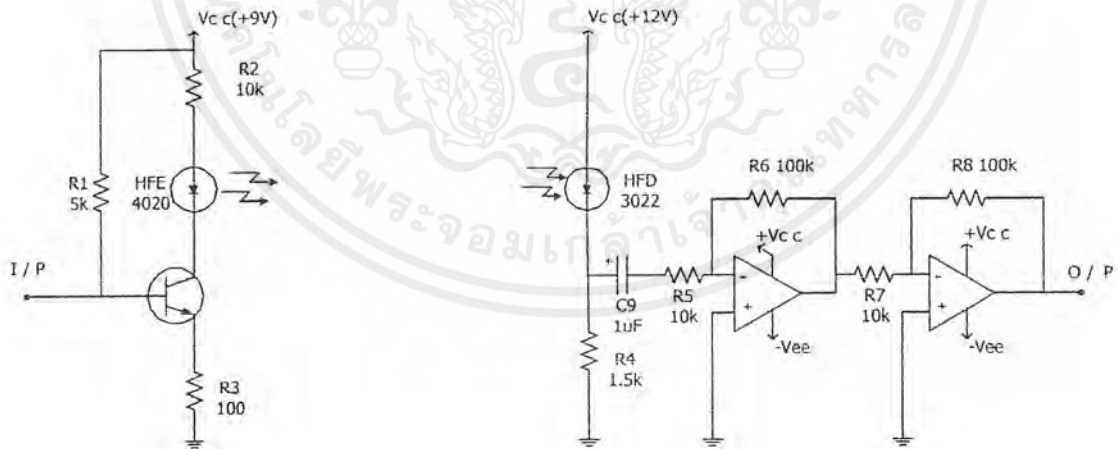


รูป 3.6 วงจร AM Demodulator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

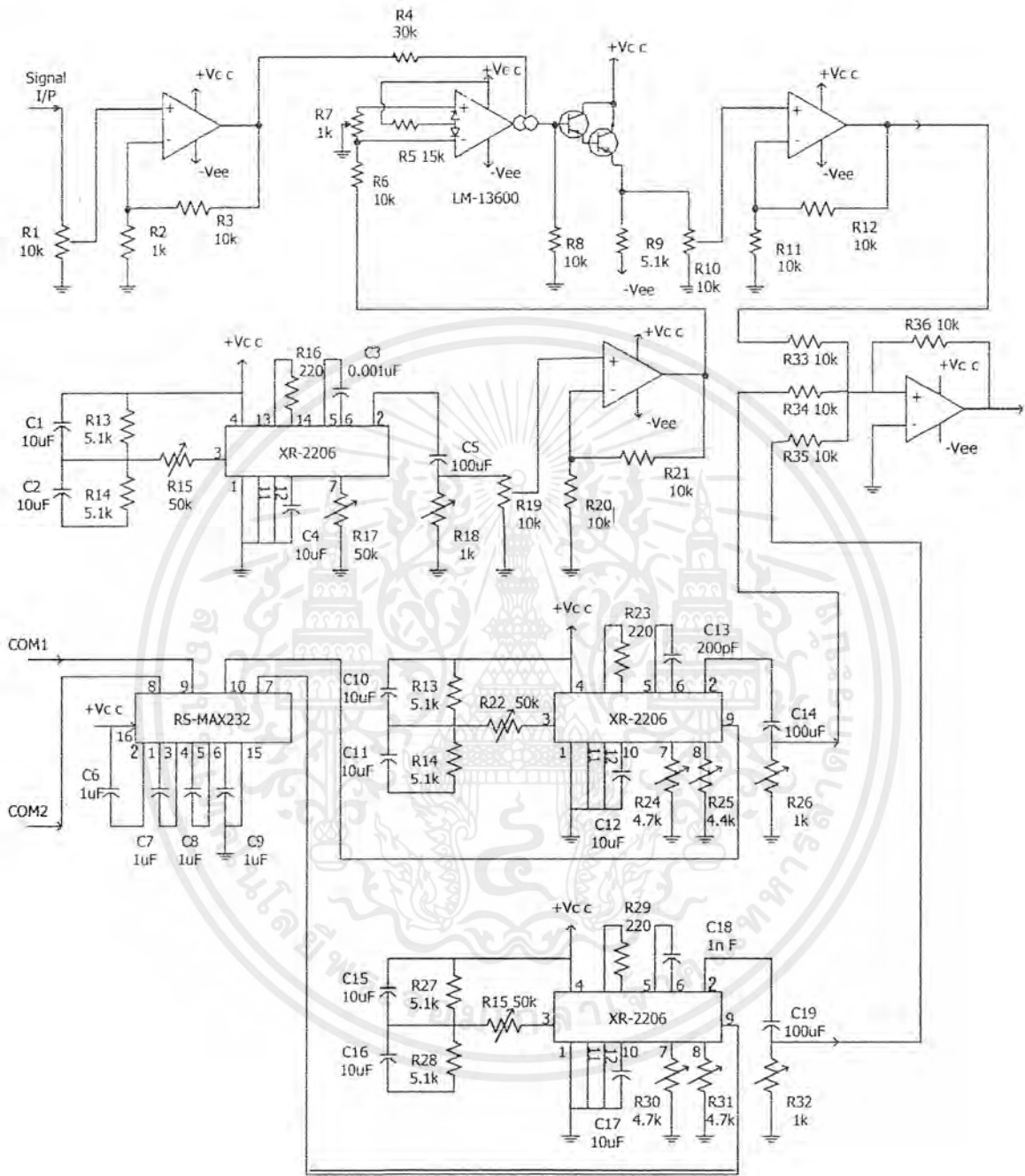


รูป 3.7 วงจร FSK Demodulator



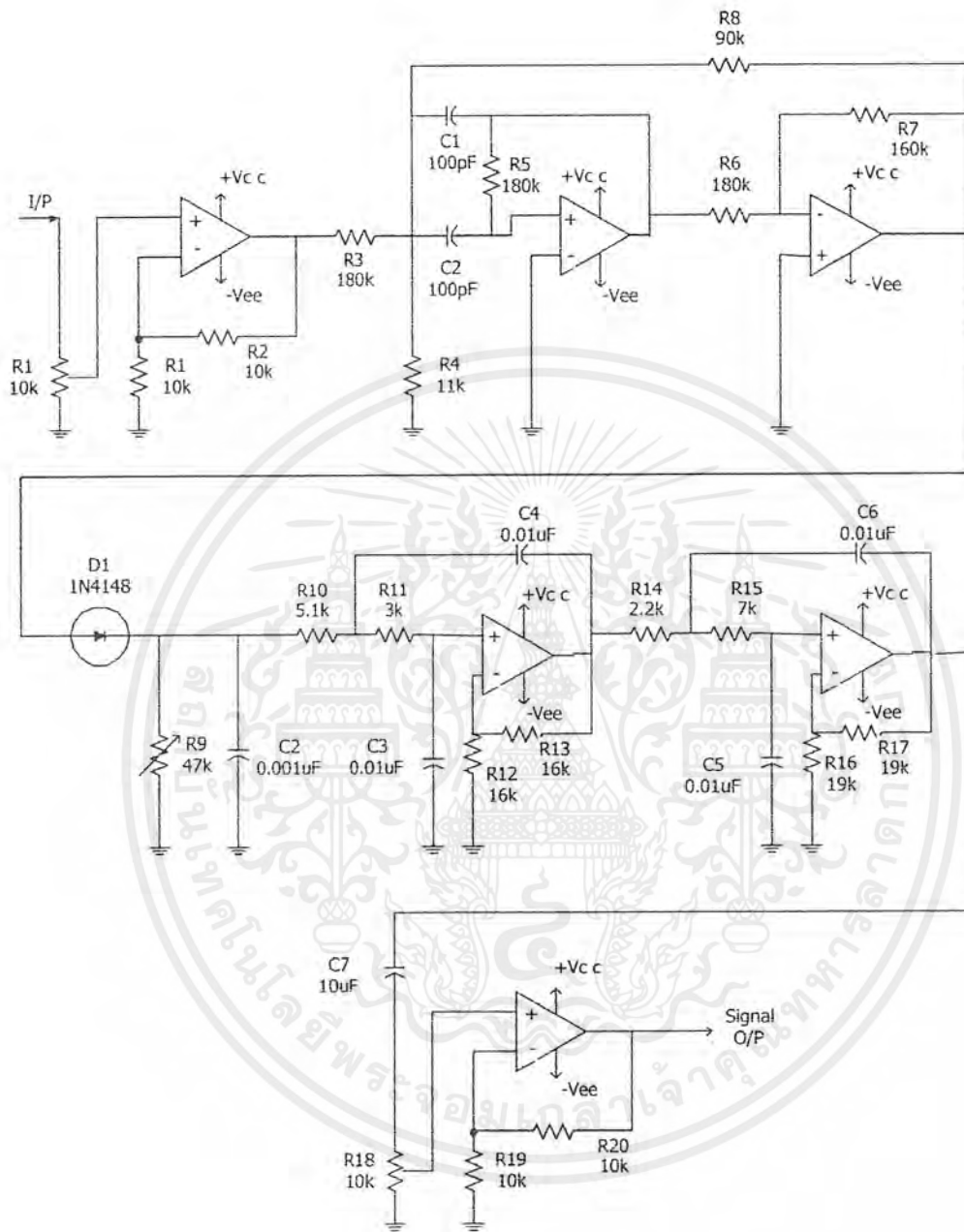
รูป 3.8 วงจร Drive LED และวงจรรับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



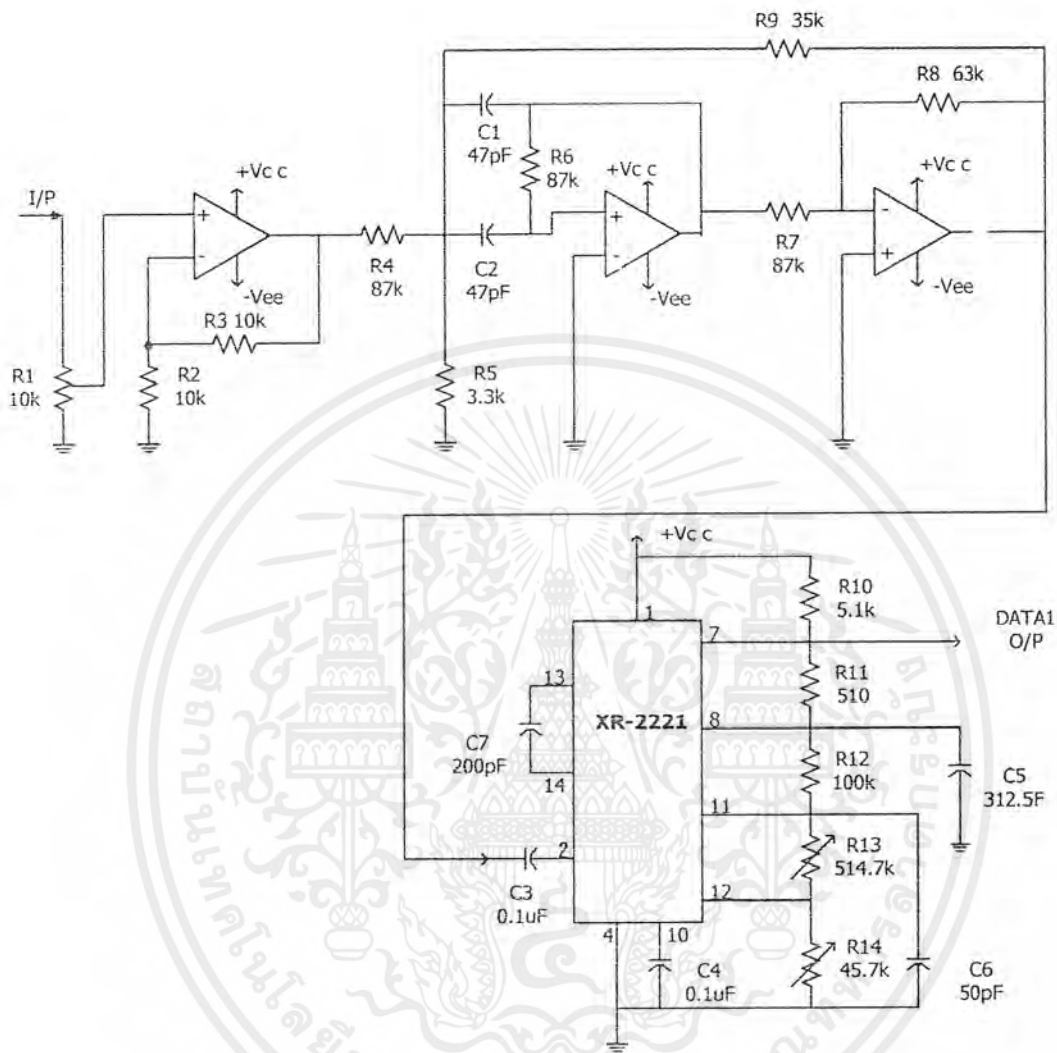
รูป 3.9 วงจรภาคส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



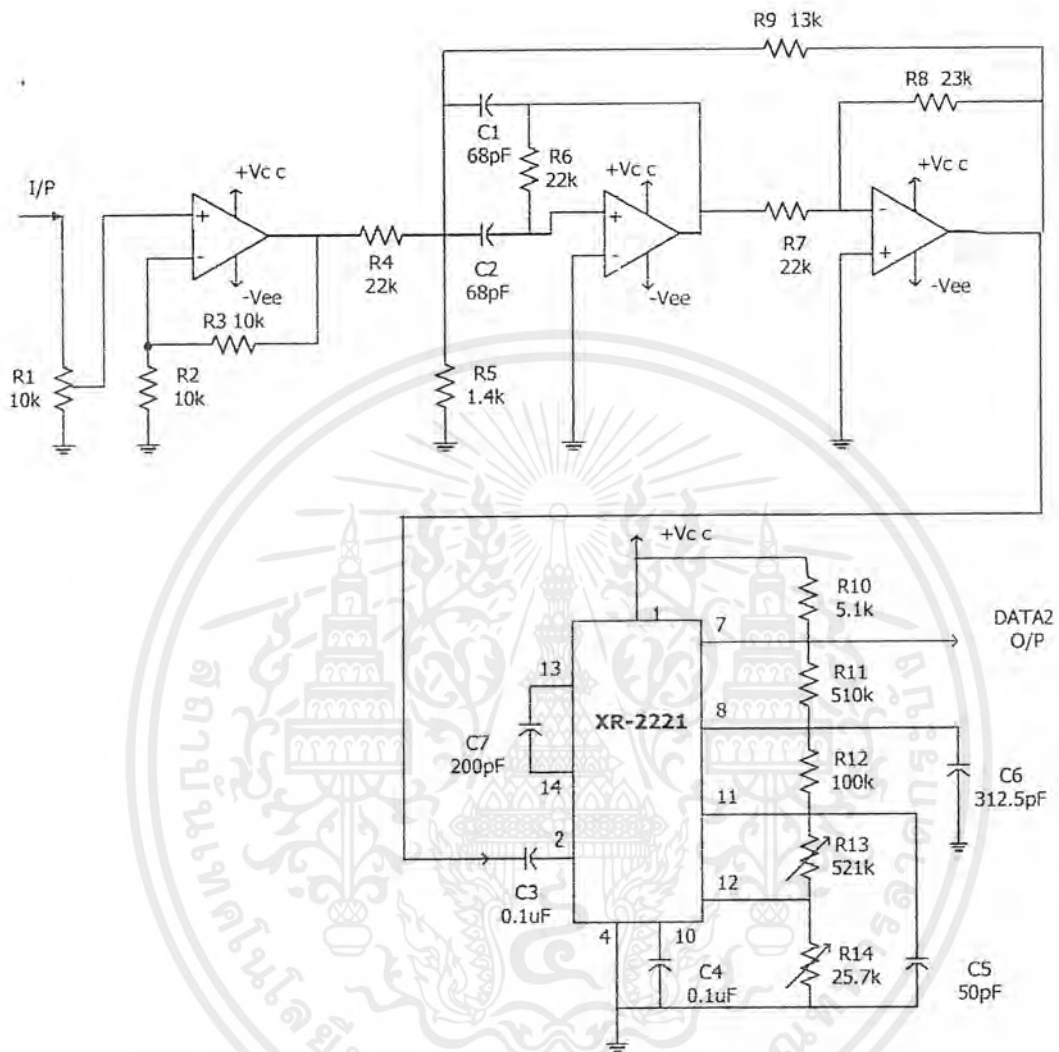
รูป 3.10 วงจร AM Demodulator รวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.11 วงจร FSK Demodulator รวม ช่อง 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.12 วงจร FSK Demodulator รวม ช่อง 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

จุดประสงค์การทดลอง

ศึกษาการทำงานของ AM Modulator และ FSK modulator

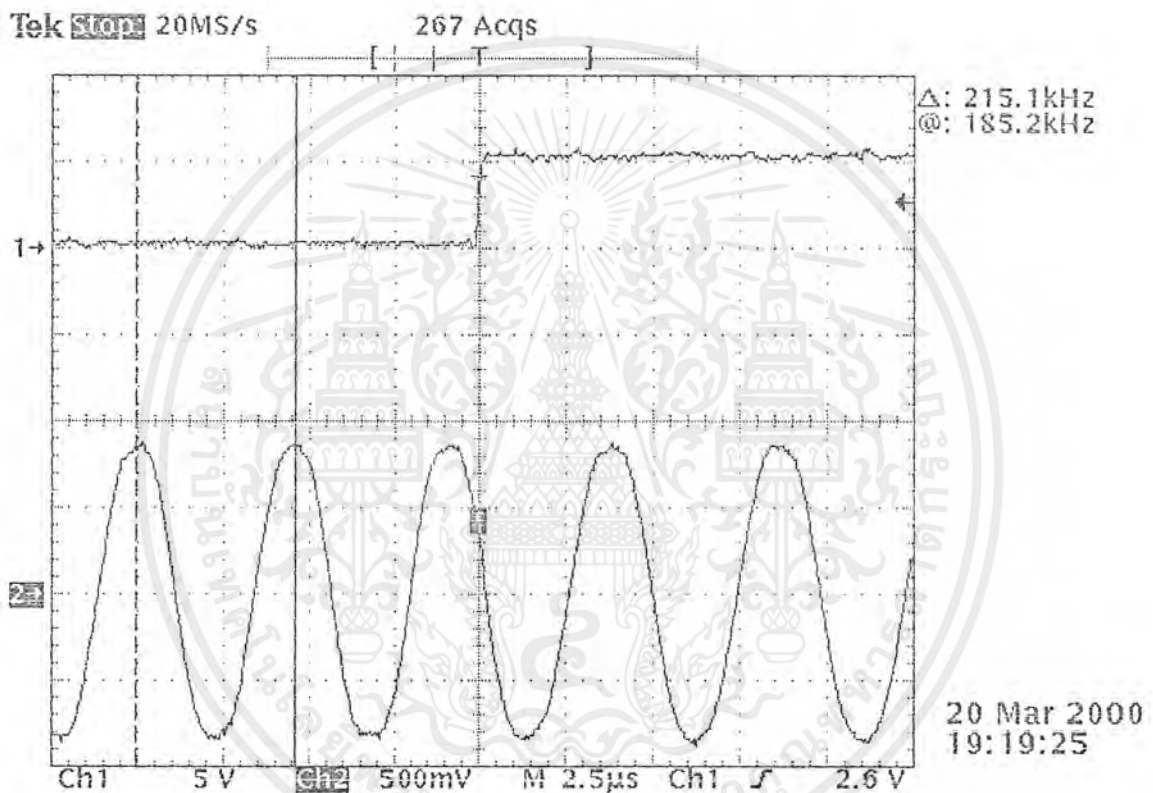
ศึกษาการออกแบบวงจรขับ LED และวงจรdetect สัญญาณแสง

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการต่อวงจรตามที่ออกแบบไว้ในบทที่ 3 ทีละวงจร
2. ทำการวัดผลการทดลองของแต่ละวงจร

ทำการทดลองตามขั้นตอนข้างต้น ทำการวัดผลการทดลองซึ่งผลจะออกมาตามรูปต่างๆ ดังที่จะแสดงต่อไป โดยในการทดลองนั้นจะใช้สัญญาณดิจิทัล 9,600 bps สำหรับวงจร FSK Modulator ซึ่งผลการทดลองจะแสดงได้ดังนี้

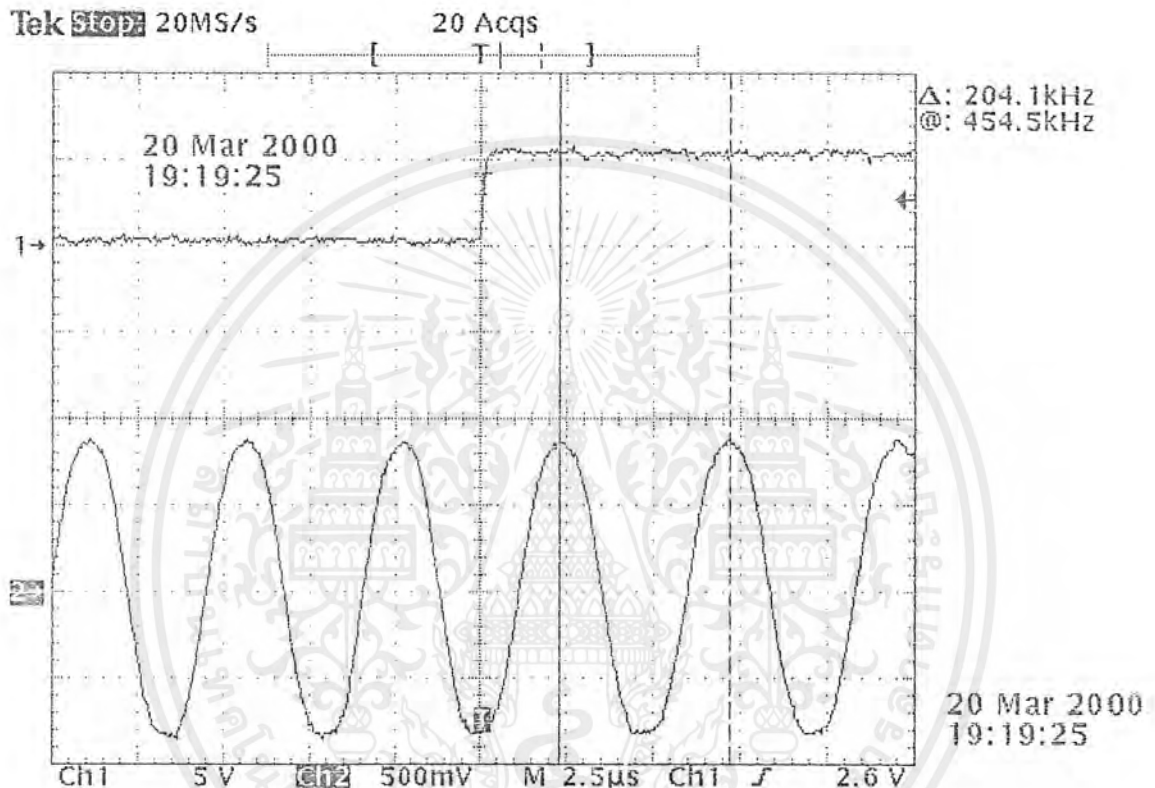
1. ตัวอย่างตามรูป 3.2 เป็นวงจร FSK Modulator ซึ่งใช้ไอซีเบอร์ XR-2206 แก้วป้อนสัญญาณดิจิทัลเข้าที่ขา 9 โดยที่ bit rate = 9,600 bps ดังนั้นความถี่สูงสุดเป็น 4,800 Hz แล้วสัญญาณเอาต์พุตที่ขา 2 ทำการปรับค่า VR $1K\Omega$ ที่ขา 8 ให้ได้ความถี่ $f_s = 214.4\text{ KHz}$



รูป 4.1 สัญญาณ f_s ที่ได้จาก output ของ FSK Modulator (Ch1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

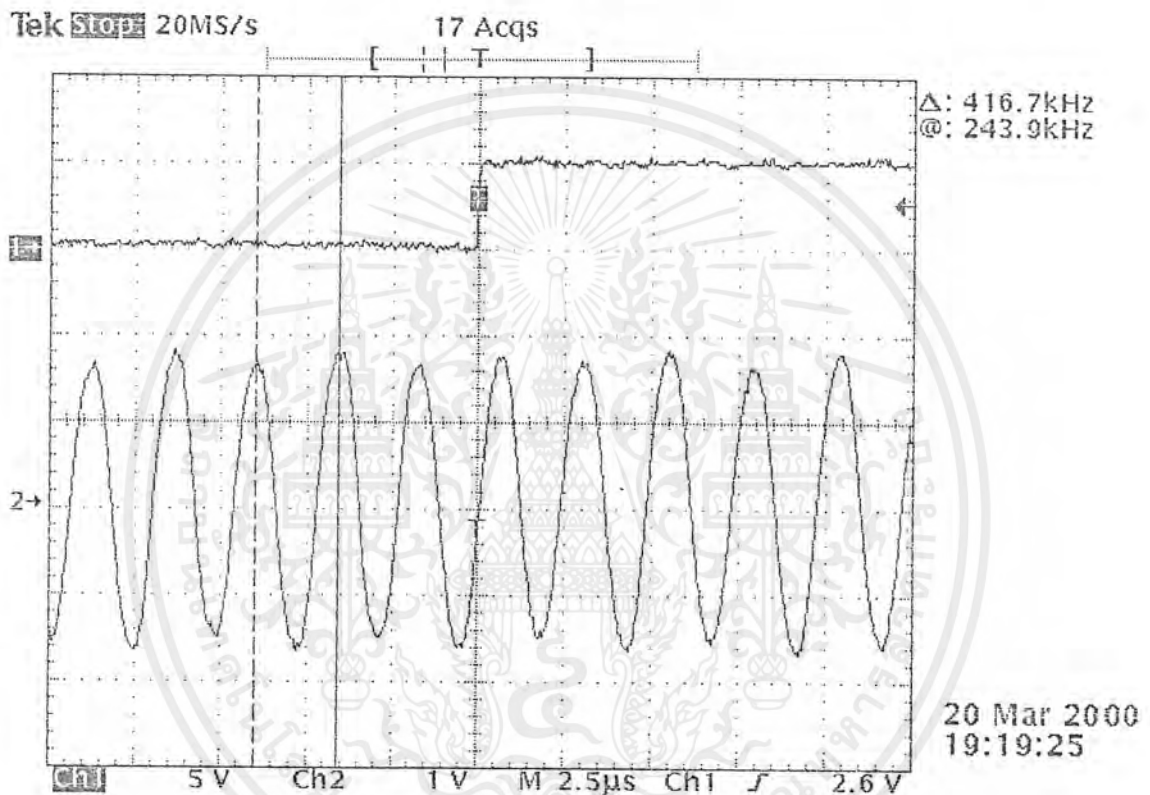
2. เหมือนข้อ 1. ทำการปรับค่า VR $1K \Omega$ ที่ต่อกับขา 7 ให้ได้ความถี่ $f_m = 204.8 \text{ KHz}$



รูป 4.2 สัญญาณ f_m ที่ได้จาก output ของ FSK Modulator(Ch1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

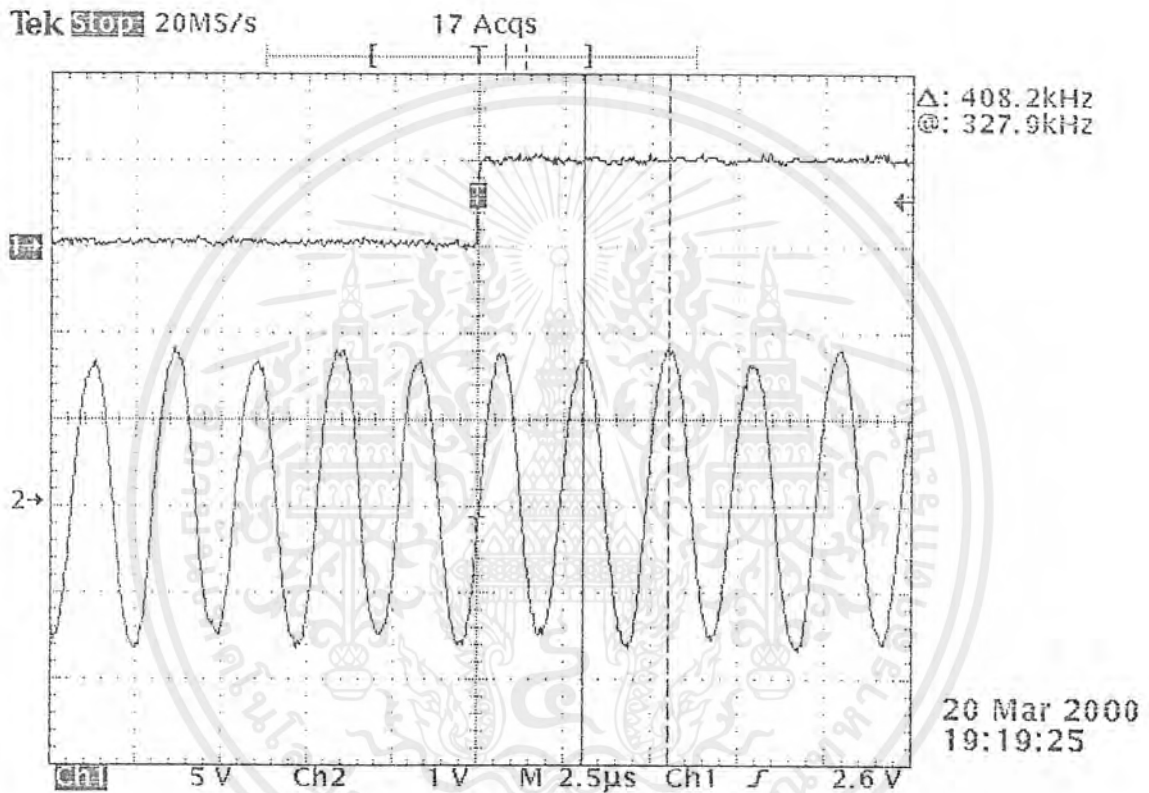
3. เหมือนข้อ 1. ทำการปรับค่า VR $1\text{K}\Omega$ ที่ต่อกับขา 8 ให้ได้ความถี่ $f_s = 414.4\text{ KHz}$



รูป 4.3 สัญญาณ f_s ที่ได้จาก output ของ FSK Modulator (Ch2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

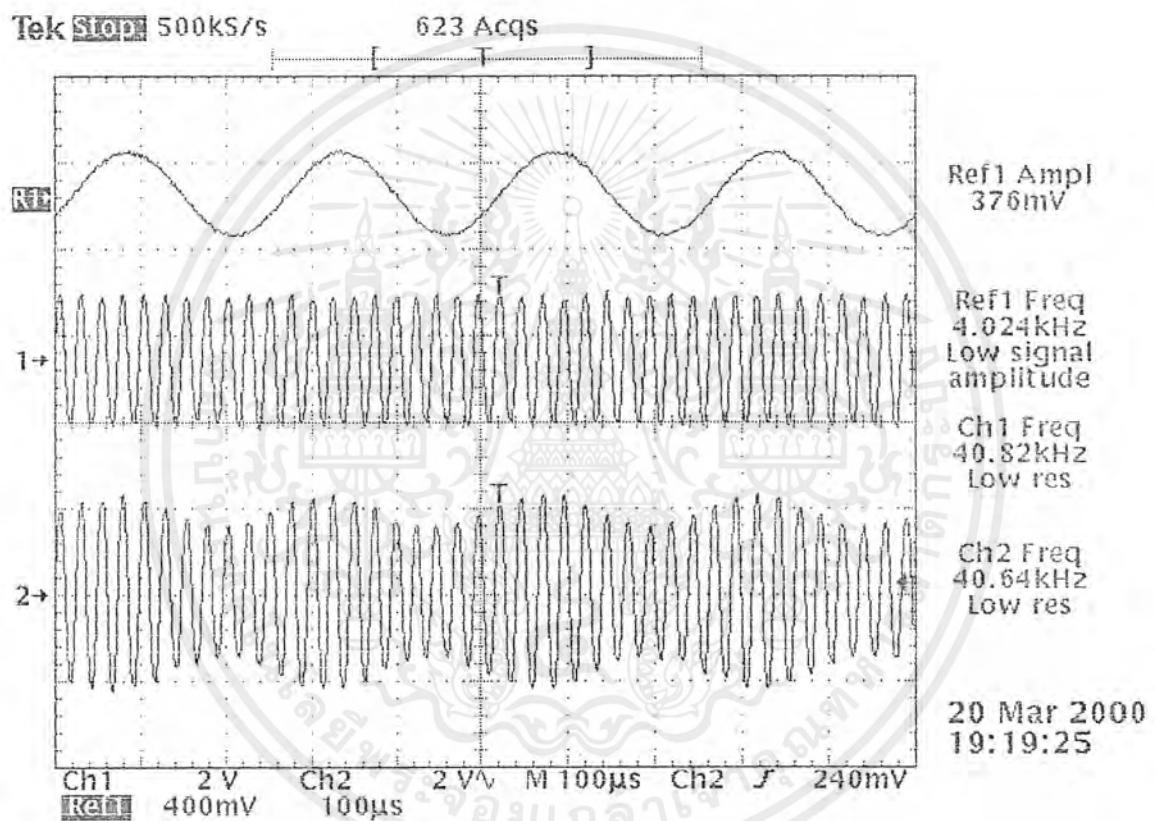
4. เหมือนข้อ 1. ทำการปรับค่า VR $1K\ \Omega$ ที่ต่อกับขา 7 ให้ได้ความถี่ $f_m = 404.8\text{ KHz}$



รูป 4.4 สัญญาณ f_m ที่ได้จาก output ของ FSK Modulator (Ch2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

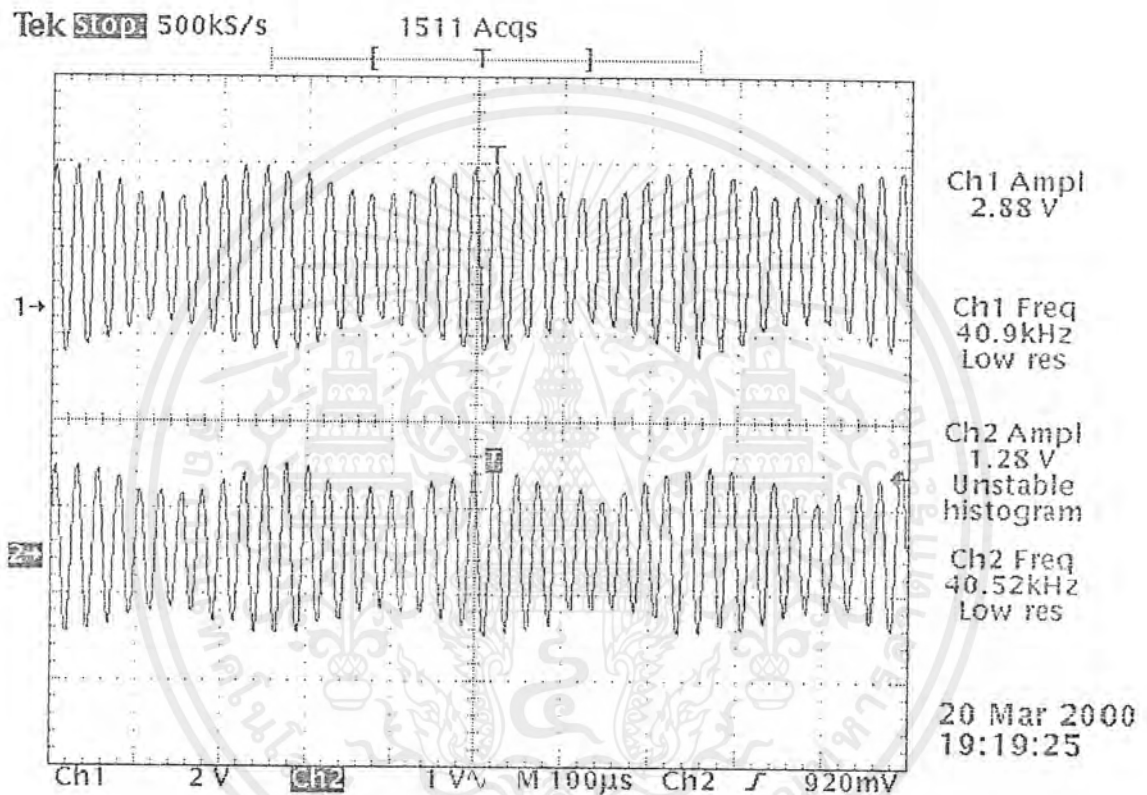
5. ทำการต่อวงจร AM Modulator ตามรูป 3.1 แล้วทำการปรับค่า VR1 เพื่อให้ได้สัญญาณโพรบที่
ชา 2 มีค่า 20 KHz



รูป 4.5 สัญญาณ Am-modulated signal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

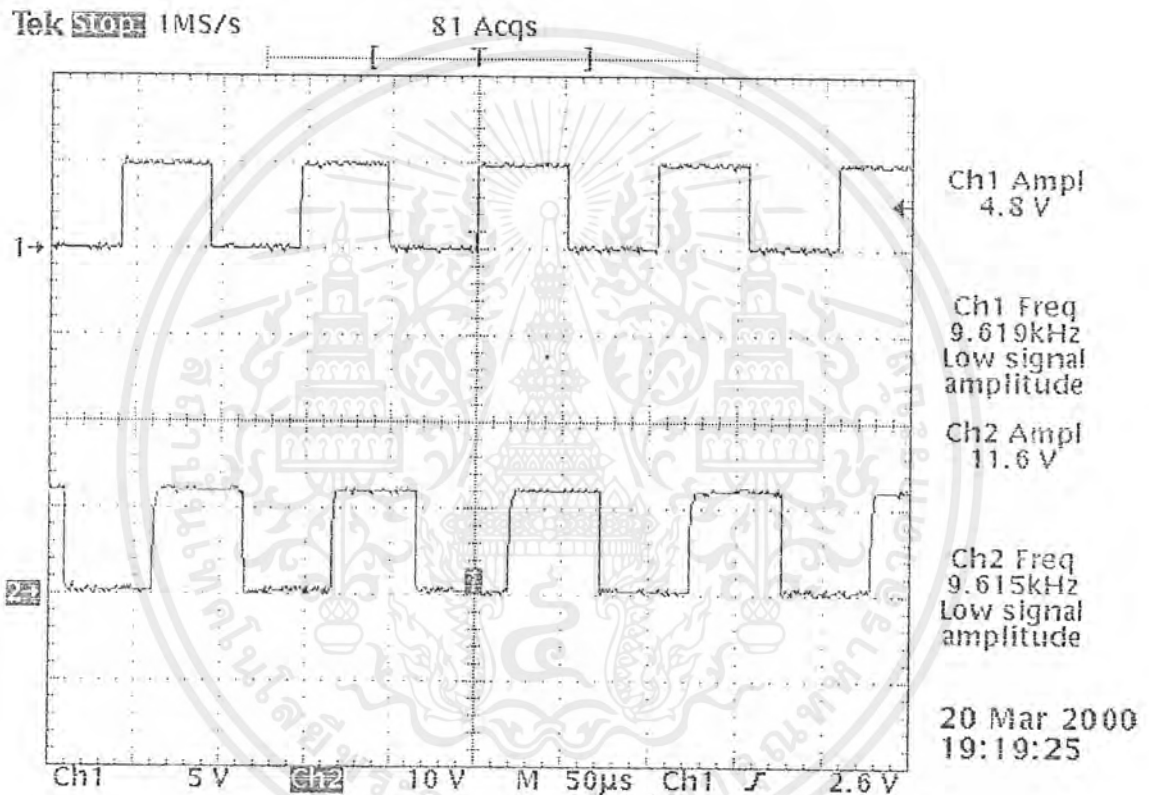
5. นำเอาที่พุดที่ได้จากการมอดูเลตป้อนเข้าสู่วงจร Low pass filter ตามรูป 3.4 แล้ววัดสัญญาณ output ที่ได้



รูป 4.6 modulated AM signal ที่ได้จาก low pass filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

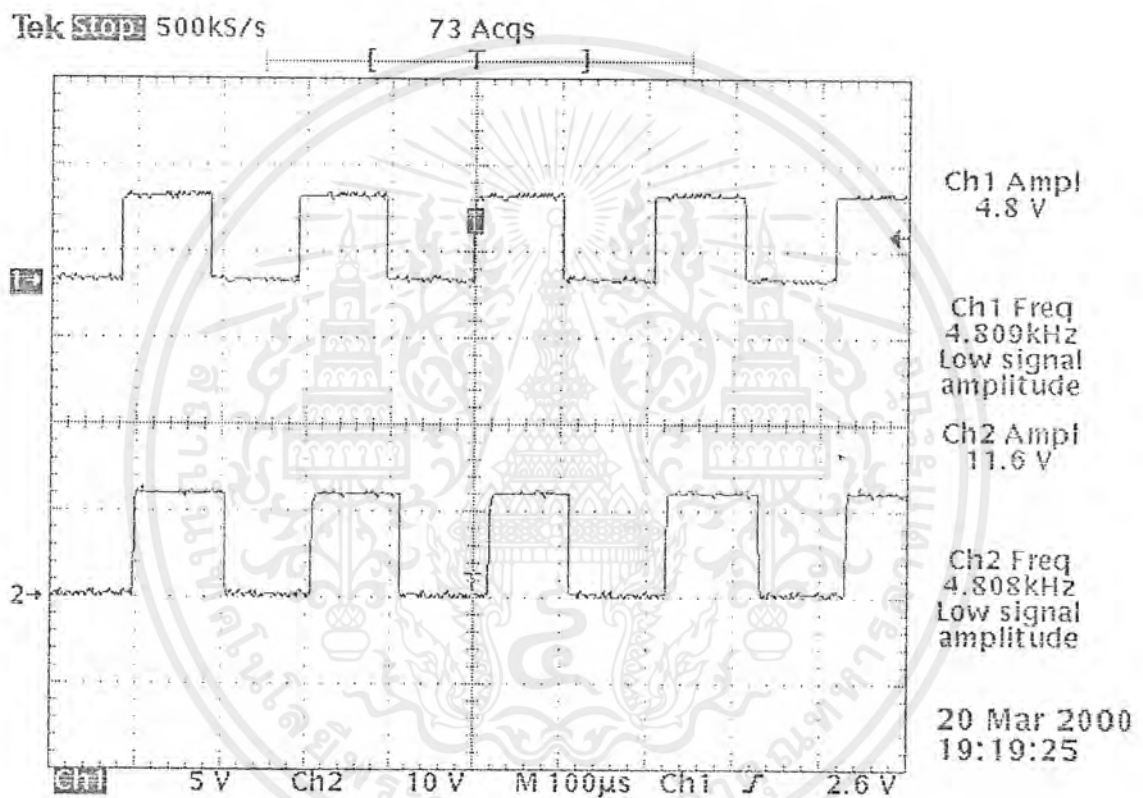
6. ทำการวางจอร์ FSK Demodulator 1 ตามรูป 3.7 ป้อนสัญญาณเอาต์พุตของ FSK Modulator 1 เข้าอินพุตของจอร์ ทำการปรับ VR 4.7 K Ω ที่ขา 12 แล้ววัดสัญญาณเอาต์พุตของ XR2211 ที่ขา 7 จนได้เหมือนอินพุตมากที่สุด แล้วบันทึกผล



รูป 4.7 สัญญาณเอาต์พุตของ FSK Demodulator 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

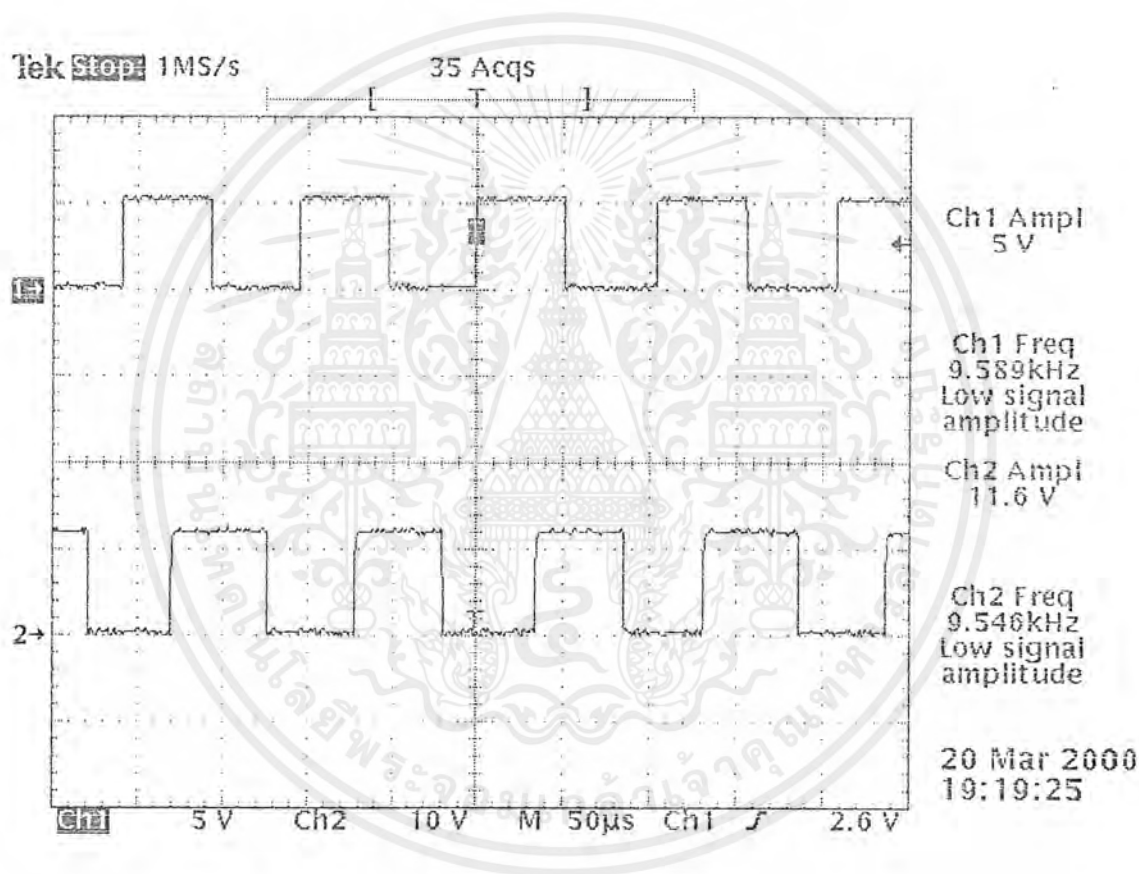
7. ทำการวงจร FSK Demodulator 2 ตามรูป 3.7 แล้วป้อนสัญญาณเอาต์พุตของ FSK Modulator 2 เข้าอินพุตของวงจร ทำการปรับ VR 4.7 K Ω ที่ขา 12 แล้ววัดสัญญาณเอาต์พุตของ XR2211 ที่ขา 7 จนได้เหมือนอินพุตมากที่สุด แล้วบันทึกผล



รูป 4.8 สัญญาณเอาต์พุตของ FSK Demodulate2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

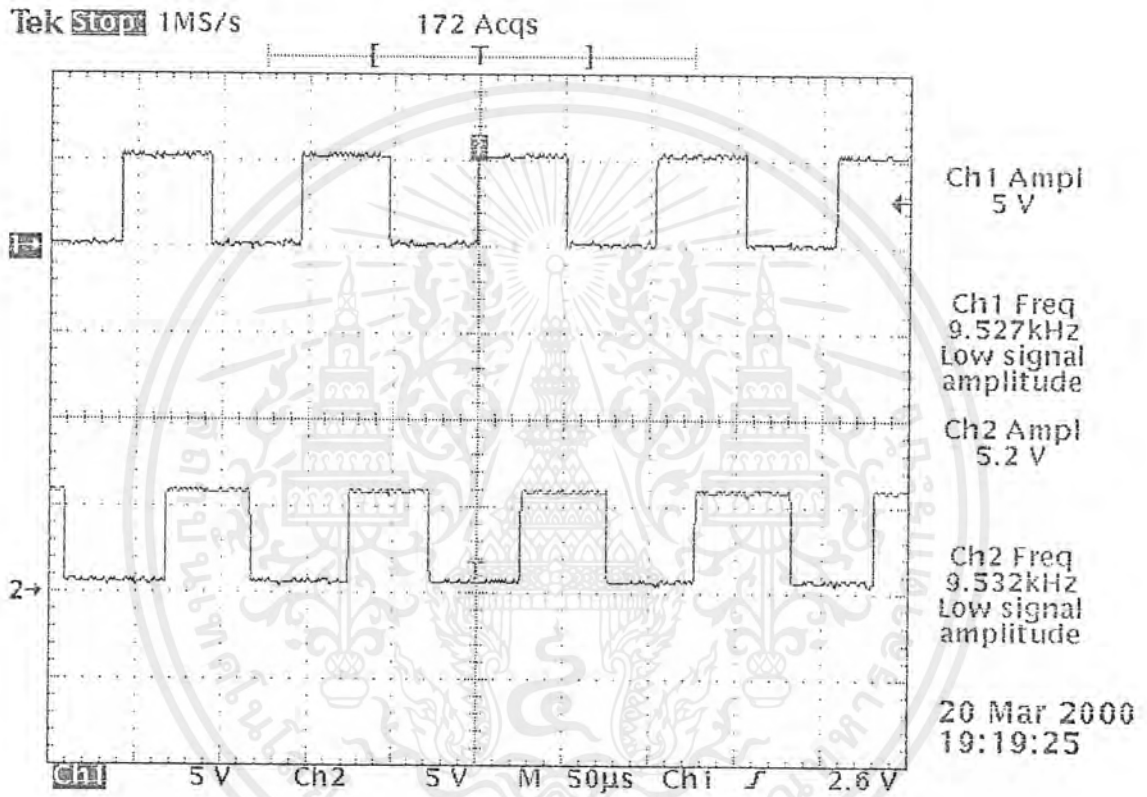
6. ทำการต่อวงจรจับแหล่งกำเนิดแสงดังรูป 3.8 พร้อมทั้งต่อวงจรผลรวม(Summing), แบนด์(Band pass filter) และวงจร detect สัญญาณแสงต่อวงจรทั้งหมดเข้ากับ FSK Modulator และ FSK Demodulator ทั้ง 2 channel แล้วนำสัญญาณเอาต์พุตจาก FSK Modulator ทั้งสองตัวและเอาต์พุตของ AM Modulator มารวมกันโดยผ่านวงจร summing เอาต์พุตที่ได้ต่อเข้ากับวงจร drive LED ส่งผ่านเข้าสายไฟเบอร์ออปติก ซึ่งต่อเข้ากับภาค detect สัญญาณแสง แล้วแยกแยะแต่ละช่องสัญญาณออกจากกันแล้ววัดสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จาก FSK Demodulator



รูป 4.9 สัญญาณเอาต์พุต ของ FSK Demodulate 1 ที่ได้จาก optical fiber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

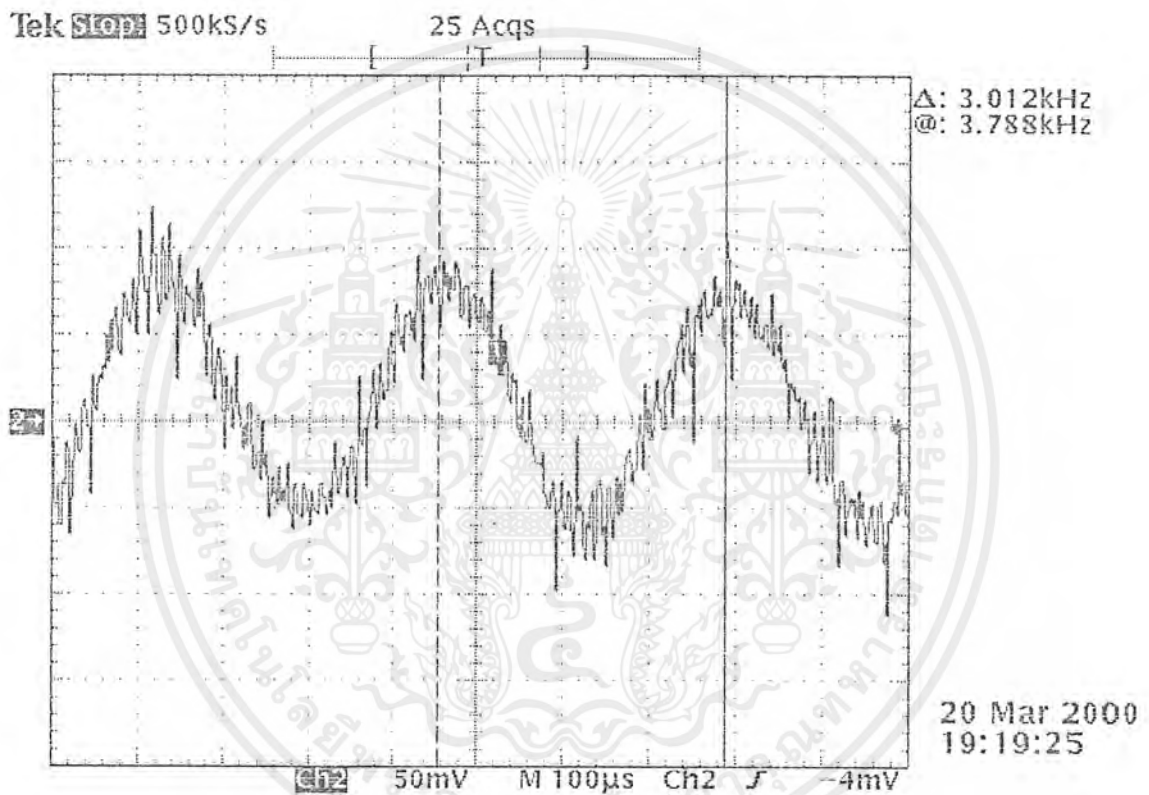
7. จากข้อ 6. ทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จาก FSK Demodulator 2



รูป 4.10 สัญญาณเอาต์พุต ของ FSK Demodulate 2 ที่ได้จาก optical fiber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. จากข้อ 6. วัสดุสัญญาณเอ้าท์พุทที่ได้จาก AM Demodulator



รูป 4.11 สัญญาณเอ้าท์พุท ของ AM Demodulate ที่ได้จาก optical fiber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์

ในการทำโครงงานนี้เป็นการส่งสัญญาณเสียงและข้อมูลดิจิทัลผ่านเส้นใยแสง โดยที่มีสัญญาณเสียงหนึ่งช่อง และข้อมูลดิจิทัลสองช่อง การมอดูเลตนั้นเป็นการใช้ Intensity Modulation(IM) โดยที่ขนาดของสัญญาณทั้งหมดที่ทำการมอดูเลตแล้วนั้นนำมารวมกัน จากนั้นเอาไปควบคุมความเข้มของแสงจากอุปกรณ์กำเนิดแสง (light source) และสัญญาณเสียงนั้นมอดูเลตโดย AM(Amplitude Modulation) และข้อมูลดิจิทัลมอดูเลตโดยใช้ FSK(Frequency Shift Keying)

การออกแบบ FSK Modulator นั้น ต้องการให้ bandwidth ของสัญญาณน้อย จึงใช้ modulation index เท่ากับหนึ่ง แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ การปรับความถี่ fs(space frequency) และ fm(mark frequency) ทำได้ยากมาก เนื่องจากความถี่ทั้งสองใกล้เคียงกันมาก ต่างกันเท่ากับบิทเรต(ในที่นี้คือ 9.6 kBit/s) จึงมีผลทำให้ FSK Demodulator นั้น Detect ข้อมูลกลับมาได้ แต่ลักษณะของข้อมูลจะไม่นิ่ง และเมื่อทดลองกับความถี่สูงปรากฏว่า ตอบสนองไม่ค่อยดีเหมือนความถี่ต่ำ

การออกแบบ AM Modulator นั้น ในการทดลองครั้งแรกสัญญาณที่จะนำไปมอดูเลตกับสัญญาณพาห้จะต้องมีแอมพลิจูดที่เหมาะสม ถ้าไม่เหมาะสมจะทำให้สัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตจะมีสัญญาณรบกวนสูงมาก ส่วนในด้าน AM Detector จากเดิมที่เคยใช้วงจรยกกำลังสอง ปรากฏว่า ถ้าหากระดับแรงดันของสัญญาณมีขนาดที่เปลี่ยนแปลงไป จะทำให้ต้องปรับแต่งวงจรรับใหม่ ซึ่งทำให้ไม่สะดวกในการใช้งาน ถึงแม้ว่าจะให้สัญญาณเอาท์พุทที่ดีกว่าก็ตาม เราจึงเปลี่ยนแปลงมาใช้วงจร Envelope Detector ซึ่งมีความสะดวกและง่ายต่อการออกแบบ ทั้งยังไม่ค่อยมีปัญหาแม้ว่าระดับสัญญาณอินพุทจะเปลี่ยนแปลงไป แต่ทั้งนี้เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของไดโอดทำให้แอมพลิจูดของสัญญาณแต่ละความถี่ที่ Detect ออกมาได้มีขนาดไม่เท่ากันแม้ว่า ระดับสัญญาณที่ความถี่ต่างๆที่นำมามอดูเลตมีขนาดเท่ากันก็ตาม

สำหรับวงจร Drive Fiber Optic LED นั้น ต้องพยายามออกแบบให้เป็นวงจรคลาสิก A เพื่อให้มีความเพี้ยนของสัญญาณน้อยที่สุด ในขณะที่เดียวกันต้องคำนึงถึงกระแสฟอร์เวิร์ด(IF)ที่ไหลผ่าน LED ด้วย เนื่องจากสามารถทนกระแสได้ในช่วง 10 mA –100 mA แต่เนื่องจากที่กระแสสูงๆ จะทำให้ LED ร้อนมากทำให้อายุการใช้งานของ LED สั้นลง จึงออกแบบไว้ที่ 50 mA

ส่วนภาครับสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้านั้นไม่ค่อยประสบปัญหา เนื่องจาก Pin Photodiode นั้นมีแรงดันเบรคดาวน์(reverse voltage) สูงมาก 250 V ที่กระแส 10 mA

และเมื่อทำการรวมทุกภาคเข้าด้วยกันแล้ว เกิดปัญหาคือการกวนซึ่งกันและกันของสัญญาณ การแก้ปัญหาส่วนหนึ่งทำได้โดยการใช้วงจรกรองความถี่ที่ดีมีความคมมากๆจะทำให้สัญญาณที่กรองได้ไม่กวนกันระหว่างแถบความถี่ อีกอย่างหนึ่งคือว่าการรวมแถบความถี่ที่วงจร summing นั้น จะเกิดการกวนกันทางแอมพลิจูด ถ้าสัญญาณตัวใดตัวหนึ่งแรงไปจะไปกวนสัญญาณตัวอื่น แต่มีเพียงเล็กน้อยอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

สำหรับ connector นั้นเนื่องจากมีราคาแพงจึงทำการกลึงเอง ทำให้ปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องจากความไม่เป็นไปตามสเปกของตัวคอนเนคเตอร์เองที่ทำให้เวลาใส่ light source และ Pin Photodiode ไม่ค่อยแน่นแล้ว และเนื่องจากไม่มีเลนส์ทำหน้าที่รวมแสงใส่ให้เส้นใยแก้ว จึงทำให้สัญญาณเกิด loss บ้าง



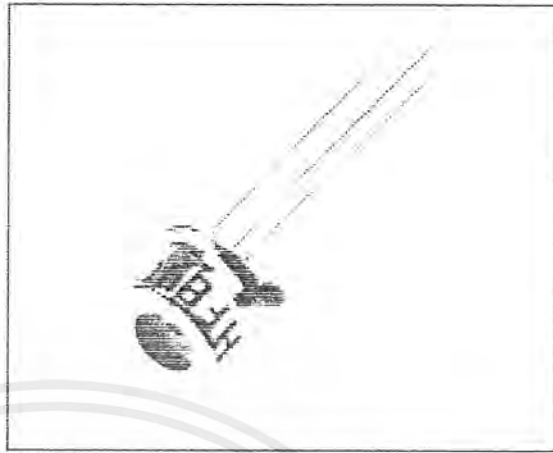
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HFE4020

Fiber Optic LED, Metal Package

FEATURES

- Power out designed for drive currents between 10 and 100 mA
- Optimized for linear optical output with drive currents between 10 mA and 100 mA
- High speed: 85 MHz
- High reliability
- Metal TO-46 style package also available (HFE4000)
- Metal TO-18 type package



DESCRIPTION

The HFE4020 is a high radiance AlGaAs 850 nanometer LED optimized for coupling into small fiber core diameters at a forward current of 10 to 100 mA. The patented "Caprock"™ LED chip is designed to combine high power coupling with wide bandwidth. The peak wavelength is matched for use with Honeywell silicon fiber optic detectors and receivers. When the HFE4020 is used at elevated temperatures, thermal resistance must be taken into consideration.

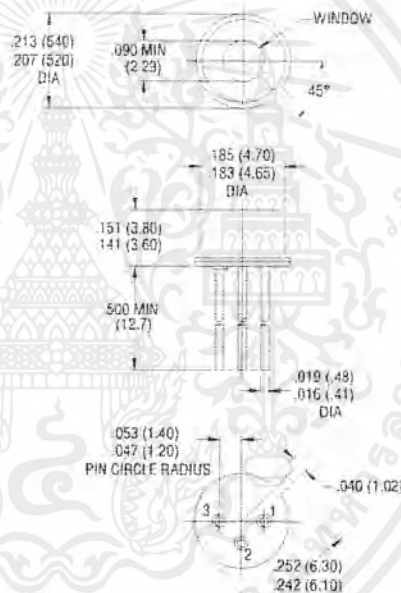
APPLICATION

The HFE4020 is a high radiance LED packaged on a TO-18 header with a metal can. Data rates can vary from DC to above 85 MHz depending upon component application. The LED is designed for use in fiber optic communications. As the current varies (typically from 10 to 100 mA), the light intensity increases proportionally. Heat sinking is recommended to maintain the expected long life. If the HFE4020 is heat sunk the package has a typical thermal resistance of 250°C per watt. If not heat sunk, typical thermal resistance is 500°C per watt.

The HFE4020 LED is designed to give high fiber coupled power (high radiance into a standard fiber optic cable). In order to enhance the light being sent into a fiber optic cable, a 0.30 mm diameter glass microlens is placed over the "Caprock"™ junction. The microlens collimates the light, increasing the intensity directed toward a fiber optic cable. This creates a "SWEET SPOT" of power, allowing greater power to be launched into standard fiber optic cables.

FIBER001 TIF

OUTLINE DIMENSIONS in inches (mm)



FIBER002 DIM

Pinout

1. Anode (case)
2. Cathode
3. Not connected

Honeywell reserves the right to make changes in order to improve design and supply the best products possible.

Honeywell

21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HFE4020

Fiber Optic LED, Metal Package

ELECTRO-OPTICAL CHARACTERISTICS (-40°C < T_c < 100°C unless otherwise stated)

PARAMETER	SYMBOL	MIN	TYP	MAX	UNITS	TEST CONDITIONS
Fiber Coupled Power	P _{oc}					I _F = 50 mA, 100/140 micron, ⁽¹⁾ 0.29 NA fiber, T = 25°C ⁽²⁾
HFE4020-313		30	60		μW	
		-15.2	-12.2		dBm	
Forward Voltage	V _F		1.70	2.00	V	I _F = 100 mA
Reverse Voltage	B _{V_R}	1.0	5.0		V	I _R = 10 μA
Peak Wavelength	λ _P		850		nm	I _F = 100 mA DC
Spectral Bandwidth	Δλ		50		nm	I _F = 100 mA DC
Response Time					ns	1 V Prebias, 100 mA peak
T = 25°C, 10-90%	t _R		6	8		
T = 25°C, 90-10%	t _F		8	10		
-40 < T < +100°C, 10-90%	t _R		6	9		
-40 < T < +100°C, 90-10%	t _F		8	11		
Analog Bandwidth	BWE		85		MHz	I _F = 100 mA DC, small signal sinusoidal modulation
P _O Temperature Coefficient	ΔP _O /ΔT		-0.019		dB/°C	I _F = 100 mA DC
Series Resistance	r _s		4.0		Ω	
Capacitance	C		70		pF	V _R = 0 V, f = 1 MHz
Thermal Resistance			250		°C/W	Heat sunked ⁽²⁾
			500		°C/W	Not heat sunked

Notes

1. HFE4020 is tested using a 10 meter length of 100/140 μm dia. fiber cable, terminated in a precision ST ferrule. Actual coupled power values may vary due to alignment procedures and/or receptacle and fiber tolerances.

2. HFE4020 must be heat sunked for continuous I_F > 50 mA operation for maximum reliability (i.e. mounted in a metal connector with thermally conductive epoxy).

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

(25°C Free-Air Temperature unless otherwise noted)

Storage temperature	-40° to +100°C
Case operating temperature	-40° to +100°C
Lead solder temperature	260°C, 10 s
Continuous forward current (heat sunked)	100 mA
Reverse voltage	1 V @ 10 μA

Stresses greater than those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational section of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods of time may affect reliability.

FIBER INTERFACE

Honeywell LEDs are designed to interface with multimode fiber with sizes ranging from 50/125 to 200/230 microns. Honeywell performs final tests using 100/140 micron core fiber. All multimode fiber optic cables between 50/125 and 200/230 should operate with similar excellent performance. See table for typical powers.

TYPICAL COUPLED POWER (μW/dBm) @ I_F=50 mA

Dia.	Index	N.A.	-313
50/125	Graded	0.20	10/-19.9
62.5/125	Graded	0.28	19/-17.1
100/140	Graded	0.29	60/-12.2

HFE4020

Fiber Optic LED, Metal Package

ORDER GUIDE

Description	Catalog Listing
Standard screening, metal package, typical power out 60 μ W	HFE4020-313

This package is also available in special interface receptacles for interfacing to standard fiber optic cables.

WARNING

Under certain application conditions, the infrared optical output of this device may exceed Class 1 eye safety limits, as defined by IEC 825-1 (1993-11). Do not use magnification (such as a microscope or other focusing equipment) when viewing the device's output.

CAUTION

The inherent design of this component causes it to be sensitive to electrostatic discharge (ESD). To prevent ESD-induced damage and/or degradation to equipment, take normal ESD precautions when handling this product.



Fig. 1 Typical Optical Power Output vs Forward Current

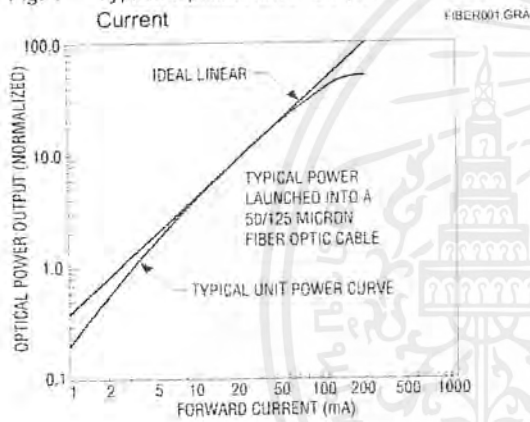


Fig. 2 Typical Spectral Output vs Wavelength

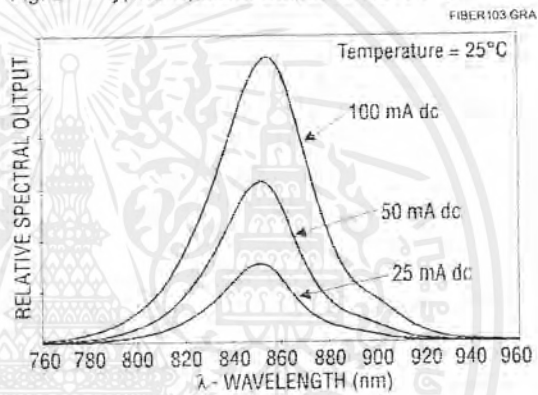
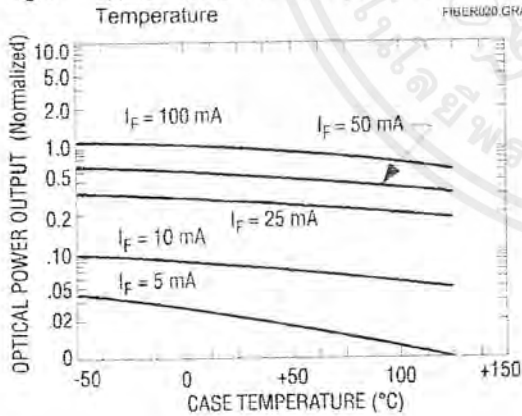


Fig. 3 Typical Optical Power Output vs Case Temperature



All Performance Curves Show Typical Values

Honeywell reserves the right to make changes in order to improve design and supply the best products possible.

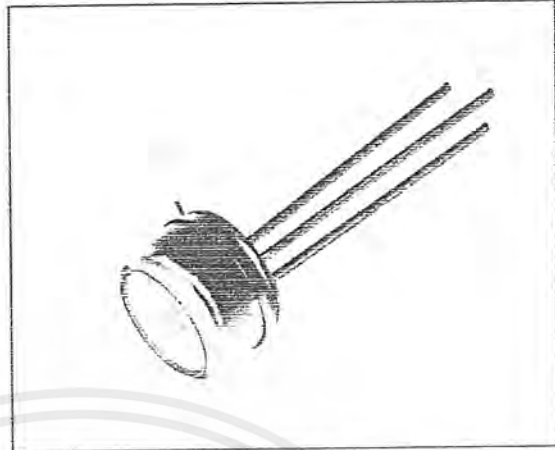
Honeywell

HFD3022

Silicon PIN Photodiode

FEATURES

- Plastic cap with TO-18 header
- Low capacitance
- High speed: $t_r = 30$ ns max. @ 5 V

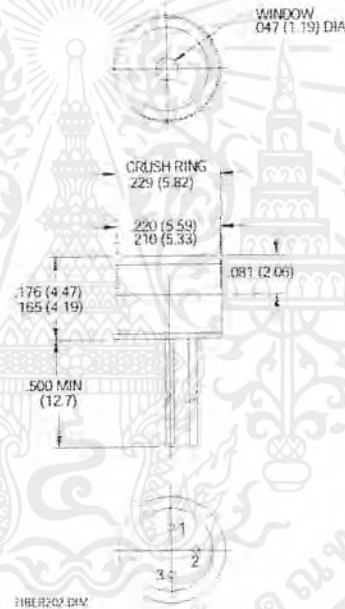


DESCRIPTION

The HFD3022 PIN photodiode is designed for high speed use in fiber optic receivers. It has a large area detector, providing efficient response to 50-1000 μm diameter fibers at wavelengths of 750 to 950 nanometers. It is designed to be used with fiber optic receptacles which align its optical axis with the axis of the optical fiber by referencing the precision outside diameter of the window can.

The HFD3022s plastic case is available in special active device receptacles, electrically isolated from their receptacles to improve sensitivity. The receptacle acts as a shield to improve the sensitivity/dark current specifications of the connectorized device.

OUTLINE DIMENSIONS in inches (mm)



FIBER202.DWG

Pinout

1. Anode
2. Cathode
3. Not connected

Notes

- 1 Detector chip active area is 0.03 in. (0.76 mm) diameter.
- 2 Detector chip active area surface is located 0.035 in. (0.89 mm) below package front surface.

Honeywell reserves the right to make changes in order to improve design and supply the best products possible.

Honeywell

267

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HFD3022

Silicon PIN Photodiode

ELECTRO-OPTICAL CHARACTERISTICS ($T_c = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise stated)

PARAMETER	SYMBOL	MIN	TYP	MAX	UNITS	TEST CONDITIONS
Peak Response Wavelength	λ_p		850		nm	
Flux Responsivity, $\lambda = 850 \text{ nm}$ (1)	R		0.58		A/W	
		0.45	0.58			50 μm , 0.20 NA fiber
			0.52			100 μm , 0.28 NA fiber
			0.25			200 μm , 0.40 NA fiber
			0.05	2.0		1000 μm , 0.53 NA fiber
Dark Leakage Current	I_D				nA	$V_R = 5 \text{ V}$
Reverse Breakdown Voltage	BV_R	110	250		V	$I_R = 10 \text{ mA}$
Response Time	t_R				ns	
10-90%			17.0	30.0		$V_R = 5 \text{ V}$
			5.0	10.0		$V_R = 15 \text{ V}$
			1.0			$V_R = 90 \text{ V}$
Package Capacitance	C		2.1		pF	$V_R = 5 \text{ V}$, $f = 1 \text{ MHz}$
Field of View	FoV		110		Degrees	

Notes

1. Responsivity is measured with a fiber optic cable centered on mechanical axis, using an 850 nm HFD4000 LED as the optical source to the fiber. Fiber length is nominally 3 meters.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

(25°C Free-Air Temperature unless otherwise noted)

Storage temperature	-40 to +100°C
Operating temperature	-40 to +100°C
Lead solder temperature	240°C, 3 min. 260°C, 10 s
Reverse voltage	110 V

Stresses greater than those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational section of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods of time may affect reliability.

HFD3022

Silicon PIN Photodiode

ORDER GUIDE

Description	Catalog Listing
Standard silicon PIN photodiode	HFD3022-002

This package is also available in special interface receptacles for interfacing to standard fiber optic cables.

CAUTION

The inherent design of this component causes it to be sensitive to electrostatic discharge (ESD). To prevent ESD-induced damage and/or degradation to equipment, take normal ESD precautions when handling this product.



FIBER INTERFACE

Honeywell detectors are designed to interface with multimode fibers with sizes (core/cladding diameters) ranging from 50/125 to 200/230 microns. Honeywell performs final tests using 100/140 micron core fiber. The fiber chosen by the end user will depend upon a number of application issues (distance, link budget, cable attenuation, splice attenuation, and safety margin). The 50/125 and 62.5/125 micron fibers have the advantages of high bandwidth and low cost, making them ideal for higher bandwidth installations. The use of 100/140 and 200/230 micron core fibers results in greater power being coupled by the transmitter, making it easier to splice or connect in bulkhead areas. Optical cables can be purchased from a number of sources.

Fig. 1 Rise/Fall Time vs Reverse Bias Voltage

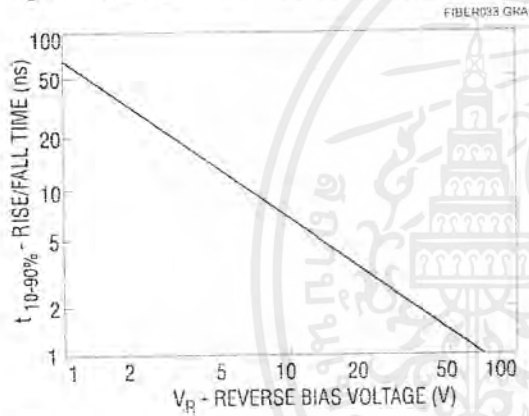


Fig. 2 Package Capacitance vs Reverse Bias Voltage

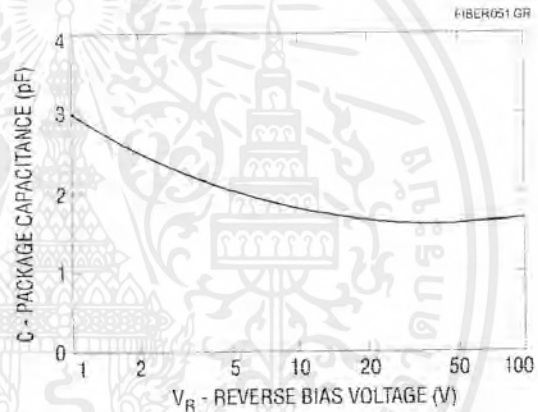


Fig. 3 Spectral Responsivity

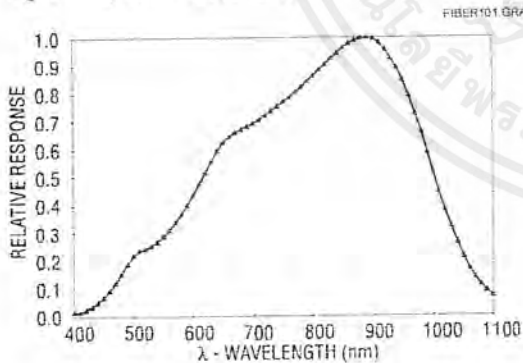
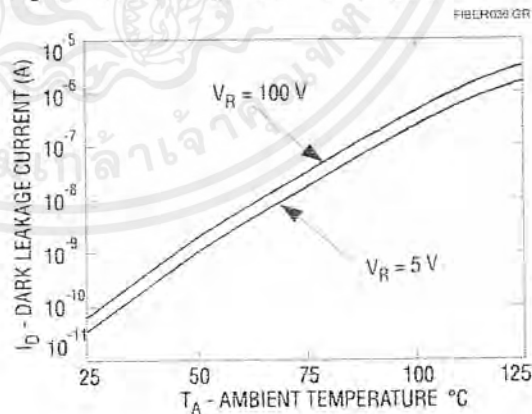


Fig. 4 Dark Leakage Current vs Temperature



Honeywell reserves the right to make changes in order to improve design and supply the best products possible.

Honeywell

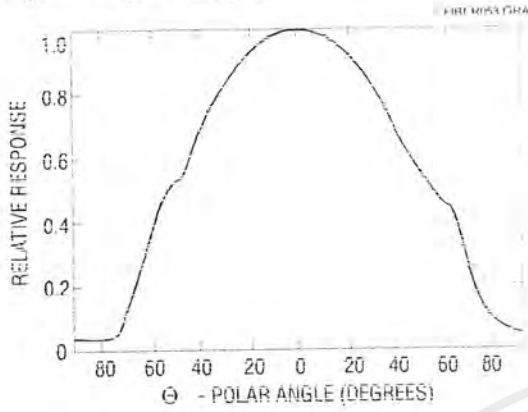
269

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HFD3022

Silicon PIN Photodiode

Fig. 5 Angular Response



Honeywell

Honeywell reserves the right to make changes in order to improve design and supply the best products possible

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. ผศ. อภินันท์ มัชฌานนท์, ทฤษฎีการสื่อสารเส้นใยแสง, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2537
2. ศ.ดร. วิวัฒน์ กิรานนท์, วิศวกรรมการสื่อสาร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2540
3. John L. Hillburn and David E. Johnson, Manual of Active Filter Design, New York : Mc CrawHill, 1993



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้