

เครื่องเข้าและถอดรหัสสัญญาณภาพผ่านเส้นใยนำแสง
Video Scrambler and Descrambler via Optical Fiber



โดย
นาย ชนากร บุญยั้งคุณ
นาย ชรรมรัตน์ สุวรรณจินดา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2542

เลขหมึก.....
เลขทะเบียน..... 37102
วัน, เดือน, ปี... 4 ก.ย. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องเข้าและถอดรหัสสัญญาณภาพผ่านเส้นใยนำแสง
Video Scrambler and Descrambler via Optical Fiber



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2542

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องเข้ารหัสและถอดรหัสสัญญาณภาพผ่านเส้นใยนำแสง

Video Scrambler and Descrambler via Optical Fiber

ผู้จัดทำ

1. นาย ธนากร บุญยั้งคุณ 39014216

2. นาย ชรรมรัตน์ สุวรรณจินดา 39014226

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.สุทธิชัย นพนาศิพงษ์)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องเข้าและถอดรหัสสัญญาณภาพผ่านเส้นใยนำแสง

Video Scrambler and Descrambler via Optical Fiber

โดย นาย ธนากร บุญยังคุณ 39014216

นาย ธรรมรัตน์ สุวรรณจินดา 39014226

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สุทธิชัย นพนาถิพงษ์

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการเข้าและถอดรหัสสัญญาณภาพของโทรทัศน์ โดยวิธีการเข้าและถอดรหัสแบบ เทลีส-แมสท์ (Telease-Maast) ซึ่งเป็นวิธีที่มีใช้กันใน โทรทัศน์แบบบอกรับ (Pay TV) การเข้ารหัสแบบเทลีส-แมสท์เป็นการเข้ารหัสสัญญาณภาพแบบอนาล็อก โดยการนำเอาสัญญาณภาพไปกลับเฟสพร้อมทั้งลดขนาดของสัญญาณลง ต่อจากนั้นจึงนำไปรวมกับสัญญาณไซน์เวฟความถี่ประมาณ 94 kHz ด้วยวงจรขยายสัญญาณแบบบวกรวม ซึ่งจะทำได้สัญญาณภาพที่มีการเข้ารหัสออกมา หลังจากนั้นจึงนำสัญญาณที่ผ่านการเข้ารหัส เปลี่ยนเป็นแสงโดยวงจรเปลี่ยนไฟฟ้าเป็นแสง (E/O Converter) เพื่อส่งผ่านเส้นใยแสง ส่วนทางด้านรับก็จะทำการเปลี่ยนสัญญาณแสงกลับเป็นไฟฟ้าโดยวงจรเปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้า (O/E Converter) แล้วจึงทำการถอดรหัสสัญญาณภาพให้กลับเป็นดั้งเดิมเพื่อให้สามารถรับชมรายการโทรทัศน์ได้

Abstract

This project is used Telease-Maast system for scrambling and descrambling. It's used in Pay-TV system. The Telease-Maast system is basically an analog video scrambling system. The video is inverted and reduced to half normal amplitude, mixed with a 94-kHz sine wave. Both of these signals are added by summing amplifier, resulting in a composite video output with scrambled. After that the scrambled signal will be transmitted via optical Fiber, converted to optical signal by E/O Converter. The receiver will convert the optical signal to electrical signal by O/E Converter . Finally, the scrambled signal will be descrambled for the normal TV programs.

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 หลักการการสแกนของโทรทัศน์	3
2.2 เทคนิคการสแกนเบิ้ลสัญญาณภาพ	10
2.2.1 การกลับสัญญาณภาพ (Video Inversion)	10
2.2.2 การเลื่อนซิงค์โดยรูปคลื่นไซน์ (Sinewave Sync Shifting)	11
2.2.3 การเลื่อนซิงค์พัลส์ (Pulse Sync Shifting)	11
2.2.4 การแทนสัญญาณซิงค์ (Sync Replacement)	12
2.2.5 การกลับสัญญาณภาพแบบแอคทีฟ (Active Inversion)	13
2.2.6 การตัดและกลับขั้ว (Cut and Invert)	14
2.2.7 การตัดและหมุน (Cut and Rotate)	15
2.2.8 การสับเปลี่ยนเส้น (Line Shuffle)	17
2.3 ระบบสแกนเบิ้ลแบบเทลีส-แมสท์ (Telease-Maast Scrambling System)	17
2.4 วงจรกรองความถี่ต่ำ (Low-pass filter)	20
2.5 เส้นโยนนำแสง	24
บทที่ 3 การทำงานของวงจร	53
3.1 การทำงานของวงจรเข้ารหัสสัญญาณภาพ	53
3.1.1 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์เวฟ (Sine-Wave Generator)	54
3.1.2 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส	58
3.1.3 วงจรขยายสัญญาณแบบบวก (Summing Amplifier)	59
3.1.4 วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Supply)	59
3.2 การทำงานของวงจรถอดรหัสสัญญาณภาพ	60
3.2.1 วงจรขยายสัญญาณภาพแบบกลับเฟส	61
3.2.2 วงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์	62
3.2.3 วงจรเฟสล็อกคูลูป	62
3.2.4 วงจรเลื่อนเฟส	63
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	65
บทที่ 5 บทวิจารณ์และบทสรุป	73
ภาคผนวก	
บรรณานุกรม	

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ทฤษฎีของการหักเหทางไฟฟ้าสถิตย์และทางแม่เหล็กไฟฟ้า	3
รูปที่ 2.2 รูปร่างของกระแสรูปพื้นเลื้อย	4
รูปที่ 2.3 การสแกนจากซ้ายไปขวา	5
รูปที่ 2.4 การสแกนไขว้กัน (interlace scanning)	5
รูปที่ 2.5 รูปร่างของสัญญาณซิงก์	7
รูปที่ 2.6 รูปร่างของสัญญาณซิงก์ที่ใช้ในการส่งโทรทัศน์	8
รูปที่ 2.7 พิลด์ที่เกิดขึ้นในระยะเวลาที่มีสัญญาณแบล็กกิ้งทางแนวตั้งในฟิล์มที่หนึ่งและฟิล์มที่สอง	9
รูปที่ 2.8 ผลของวิธีการกลับสัญญาณภาพ	10
รูปที่ 2.9 ผลของการเลื่อนซิงก์โดยรูปคลื่นไซน์	11
รูปที่ 2.10 ผลของการเลื่อนซิงก์ฟิล์ม	12
รูปที่ 2.11 ผลของการแทนสัญญาณซิงก์	13
รูปที่ 2.12 ผลของการกลับสัญญาณภาพแบบแอกทีฟ	14
รูปที่ 2.13 ผลของการตัดและกลับหัว	14
รูปที่ 2.14 ผลของการตัดและหมุน	16
รูปที่ 2.15 ผลของการสับเปลี่ยนเส้น	17
รูปที่ 2.16 บล็อกไดอะแกรมของการสแกนเบิ้ลระบบเทลิส-แมสท์	18
รูปที่ 2.17 บล็อกไดอะแกรมของการคีสแกนเบิ้ลระบบเทลิส-แมสท์	19
รูปที่ 2.18 วงจรรองความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวิร์ธออเดอร์ 1	21
รูปที่ 2.19 การตอบสนองความถี่	21
รูปที่ 2.20 วงจรรองความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวิร์ธออเดอร์ 2	23
รูปที่ 2.21 การตอบสนองความถี่	24
รูปที่ 2.22 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยแสง	25
รูปที่ 2.23 แสดงผลของ NA และขนาดของคอร์	26
รูปที่ 2.24 แสดงโหมคการเดินทางของการเดินทางของแสง ภายในเส้นใยแสง	27
รูปที่ 2.25 แสดงมุมสะท้อนกลับของแสงที่ทำให้เกิดคลื่นอยู่กับที่ในทิศทางของรัศมี	28
รูปที่ 2.26 แสดงลักษณะการเดินทางของแสงในคอร์ของเส้นใยแสงแต่ละชนิด	31
รูปที่ 2.27 แสดงลักษณะการเดินทางของแสงใน GI-Fiber	31
รูปที่ 2.28 แสดงสาเหตุต่างๆที่ทำให้เกิดการสูญเสียแสง	32
รูปที่ 2.29 แสดงคุณสมบัติการสูญเสียแสงจากการดูดแสงของเส้นใยแสงที่ทำด้วยแก้ว	33

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.30 แสดงการเกิดการขยายกว้างออกในเส้นใยแสง	36
รูปที่ 2.31 แสดงความยาวคลื่นแสงที่ปล่อยออกมาของสารประกอบกึ่งตัวนำแต่ละชนิด	37
รูปที่ 2.32 แสดงระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำแบบ P-type และ N-type	38
รูปที่ 2.33 แสดงสนามไฟฟ้าภายในและระดับพลังงานของ รอยต่อ P-N	39
รูปที่ 2.34 แสดงโครงสร้างทั่วไปของเลเซอร์ไดโอด	39
รูปที่ 2.35 แสดงโครงสร้าง,ระดับพลังงานและลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีการหักเหของเลเซอร์ไดโอด	40
รูปที่ 2.36 แสดงโครงสร้างแบบ Planar Stripe	41
รูปที่ 2.37 แสดงโครงสร้างแบบ Embedding Stripe	42
รูปที่ 2.38 แสดงโครงสร้างและระดับพลังงานของ LED	43
รูปที่ 2.39 แสดงไดโอดแบบปล่อยแสงออกทางด้านข้าง	43
รูปที่ 2.40 แสดงรูปคลื่นเอาท์พุทของแสงและการผสมในการส่งสัญญาณดิจิทัล	44
รูปที่ 2.41 แสดงการผสมแบบ Light Intensity Modulation	44
รูปที่ 2.42 แสดงการเชื่อมแสงระหว่างอุปกรณ์ปล่อยแสงกับเส้นใยแสง	46
รูปที่ 2.43 แสดงตัวอย่าง โมดูลเลเซอร์ไดโอด และ โมดูล LED	46
รูปที่ 2.44 แสดงความยาวคลื่นในการรับแสงของอุปกรณ์รับแสงแต่ละชนิด	47
รูปที่ 2.45 แสดงหลักการทำงานการรับแสงและระดับพลังงานของ PIN-PD	48
รูปที่ 2.46 แสดงหลักการทำงานการรับแสงและระดับพลังงานของ APD	49
รูปที่ 2.47 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้และ โฟโวลต์เคอร์เรนท์	50
รูปที่ 2.48 แสดงตัวอย่าง โครงสร้างภายในของ โมดูล APD	52
รูปที่ 2.49 แสดง โมดูล PIN- PD และ โมดูล APD	52
รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเข้ารหัสสัญญาณภาพ	53
รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมและวงจรการทำงานพื้นฐาน	55
รูปที่ 3.3 วงจรกำเนิดสัญญาณเอาท์พุทคลื่นไซน์, 50% duty cycle	57
รูปที่ 3.4 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส	58
รูปที่ 3.5 วงจรขยายสัญญาณแบบบวกที่ใช้ในโครงการงาน	59
รูปที่ 3.6 วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า	60
รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมของวงจรถอดรหัสสัญญาณภาพ	61
รูปที่ 3.8 วงจรขยายสัญญาณภาพแบบกลับเฟส	61
รูปที่ 3.9 วงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์ 94 kHz	62
รูปที่ 3.10 วงจรเฟสล็อคลูปที่ใช้ไอซีเบอร์ LM565	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.11 วงจรเลื่อนเฟส	64
รูปที่ 4.1 สัญญาณซิงค์ทางแวนอนของสัญญาณภาพปกติจากเครื่องเล่นวีดีโอ	65
รูปที่ 4.2 สัญญาณรูปคลื่นไซน์จากวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ 94 MHz ที่ขา 19 ของไอซี MAX038	66
รูปที่ 4.3 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ 94 MHz ก่อนเข้า Summing Amplifier	67
รูปที่ 4.4 สัญญาณภาพวีดีโอหลังจากผ่านวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสที่ขา 6 ของไอซี LF357	68
รูปที่ 4.5 แสดงการรวมของสัญญาณภาพและสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ 94 MHz	69
รูปที่ 4.6 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเบนด์พาสฟิลเตอร์ในส่วนของวงจรถอดรหัส สัญญาณภาพ	70
รูปที่ 4.7 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเฟสล๊อคลูป	71
รูปที่ 4.8 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	72
รูปที่ 4.9 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส	73
รูปที่ 4.10 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเลื่อนเฟส	74
รูปที่ 4.11 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรถอดรหัสสัญญาณภาพสุดท้ายที่ได้รับกลับคืนมา หลังจากการแยกเอาสัญญาณไซน์ออก	75
รูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณภาพก่อนและหลังผ่านการสแกนเบิ้ล โดยไม่ได้ผ่านเส้นใยแสง	76
รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณภาพที่เข้ารหัสและถอดรหัส โดยผ่านเส้นใยแสง	78

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความถี่ไซน์เวฟที่ใช้ในการเข้ารหัสแบบเทลิส-แมสท์	18
ตารางที่ 2.2 แสดงการแบ่งชนิดของเส้นใยแสง	30
ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆของอุปกรณ์ปล่อยแสง	45
ตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง	51
ตารางที่ 3.1 แสดงหน้าที่การทำงานของขาแต่ละขาของ MAX038	56
ตารางที่ 3.2 การเลือกรูปคลื่นเอาท์พุท	57



บทที่ 1

บทนำ

การพัฒนาของการส่งสัญญาณภาพ การเพิ่มจำนวนของที่อยู่อาศัยที่สามารถรับสัญญาณโทรทัศน์ในระบบเคเบิลทีวีและความหลากหลายของรายการของระบบเคเบิลทีวี จึงเป็นเหตุให้เกิดแนวความคิดโทรทัศน์แบบบอกรับ (Pay TV) ซึ่งแนวความคิดนี้จะจัดเตรียมรายการต่างๆ ตามโปรแกรมที่จัดเตรียมขึ้นมาเพื่อให้เกิดความพึงพอใจต่อผู้ชมรายการในแต่ละช่อง โดยรายการที่รับชมจะมีทั้งแบบเป็นสมาชิกรายเดือนหรือรายการพิเศษที่จะต้องจ่ายค่าบริการเพิ่มเติมเมื่อเลือกชมรายการพิเศษเหล่านั้น ปัญหาของบริษัทที่ประกอบธุรกิจโทรทัศน์แบบบอกรับที่สำคัญก็คือการเก็บค่าบริการและการป้องกันการรับชมรายการจากผู้ที่ไม่ได้เป็นสมาชิก

การเข้ารหัสหรือการกวนสัญญาณหรือที่เรียกว่าระบบ สแกนเม็ล (Scramble) ในความหมายทางอิเล็กทรอนิกส์ก็คือ กระบวนการที่ทำให้สัญญาณภาพ หรือ สัญญาณเสียง ที่ส่งออกไปในดวงกลางใจก็ตามเกิดอาการที่ผิดแผกแตกต่างไปจากเดิม และเมื่อเรารับสัญญาณที่ผ่านกระบวนการนี้มาโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของสัญญาณ หรือ ผู้ส่งแล้ว สัญญาณดังกล่าวก็จะไม่สามารถรับชม หรือรับฟังอย่างเป็นปกติทั่วไปได้ สาเหตุที่ต้องมีการทำสแกนเม็ล เข้าไปในสัญญาณภาพและเสียง เนื่องจากในปัจจุบันนี้ทางเจ้าของกิจการได้มีการลงทุนไปเป็นจำนวนมาก ครั้นจะให้ใครก็ได้ที่มีเครื่องรับต่างๆ ไปมาเปิดรับสัญญาณกันอย่างเสรีและตามใจชอบนั้น คงจะไม่ถูกต้องนักในเรื่องของการลงทุนทางธุรกิจ ดังนั้นจึงต้องทำการสแกนเม็ล ให้กับสัญญาณภาพและเสียง หากผู้ใดมีความประสงค์ที่จะรับชมหรือฟังรายการดังกล่าว ก็จะต้องจ่ายเงินค่าสมาชิกเพื่อที่จะได้เครื่องถอดรหัสสัญญาณ มาทำการถอดรหัสสัญญาณภาพและเสียงให้สามารถรับชม หรือรับฟังได้ตามปกติ

วิธีการเข้ารหัส (Scrambling Methods)

วิธีการที่ใช้ในการเข้ารหัสและถอดรหัสได้มีการพัฒนาปรับปรุงไปอย่างมากมาย บางวิธีที่ใช้ในการเข้ารหัสเป็นวิธีการเข้ารหัสแบบพื้นฐานง่ายๆ (Soft Scrambling) ซึ่งก็ทำให้มีความปลอดภัยในการป้องกันคำหรือในบางวิธีจะใช้วิธีการเข้ารหัสที่มีความซับซ้อนมากทำให้มีความปลอดภัยในการป้องกันสูงตามไปด้วย แต่ในความเป็นจริงการเลือกวิธีการเข้ารหัสจะต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ของเทคโนโลยีและหลักการทางเศรษฐศาสตร์ว่าจะคุ้มหรือไม่

การถอดรหัส (Descrambling)

เครื่องถอดรหัสที่ใช้เป็นมาตรฐานที่ใช้ในการถอดรหัสได้โดยถูกต้องในขณะนี้ เมื่อเวลาผ่านไปไม่นานก็จะเกิดปัญหาอันเนื่องมาจากเครื่องถอดรหัสเถื่อน โดยปัญหานี้จะไม่เกิดขึ้นถ้าผู้ทำงานตรวจสอบมีการทำงานตรวจสอบในพื้นที่ให้บริการอย่างเข้มงวด และปัญหาที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดความรุนแรงกับระบบการเข้ารหัสของการสื่อสารโทรทัศน์ผ่านดาวเทียมมากที่สุดเนื่องจากมีพื้นที่ให้บริการมาก โดยเฉพาะพื้นที่ที่ห่างไกลก็จะมีปัญหามาก ซึ่งการแก้ปัญหาอาจใช้วิธีการตั้งรางวัลแก่ผู้แจ้งข่าวสารการลักลอบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปลอมแปลงเครื่องดนตรีให้ให้กับทางบริษัท หรือการปรับปรุงหรือการเปลี่ยนแปลงการเข้ารหัสใหม่ ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น แต่ทั้งนี้ก็ต้องคำนึงถึงผู้ที่เป็สมาชิกเก่าและผู้ที่กำลังตัดสินใจจะเป็นสมาชิกด้วยว่ามีกำลังทรัพย์ที่จะจัดเตรียมซื้อเครื่องดนตรีรุ่นใหม่ได้หรือไม่ เพราะการแข่งขันทางการตลาดมีค่อนข้างสูงไม่ว่าจะเป็นการแข่งขันจากโทรทัศน์แบบบอกรับด้วยตนเองหรือการแข่งขันจากโทรทัศน์แบบทั่วไปที่ไม่จำเป็นต้องเป็นสมาชิก ซึ่งถ้าหากเครื่องมีราคาแพงเกินไปหรือสามารถที่จะปลอมแปลงได้ง่ายก็จะทำให้ประสบความล้มเหลวได้



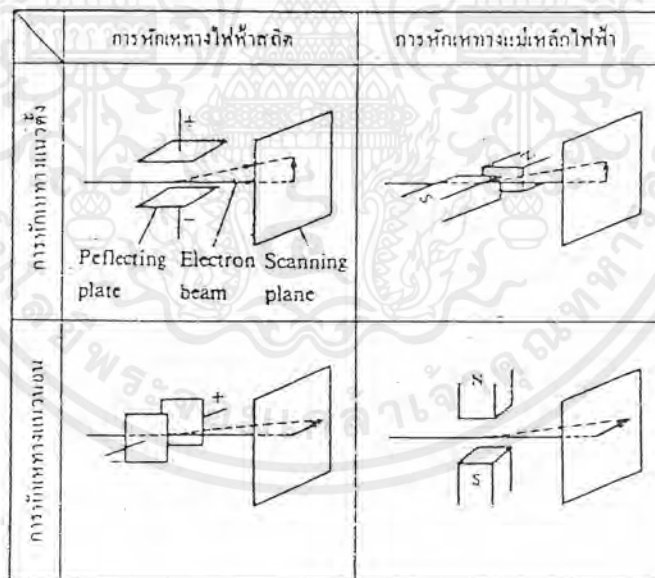
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีหรือหลักการ

2.1 หลักการการสแกนของโทรทัศน์

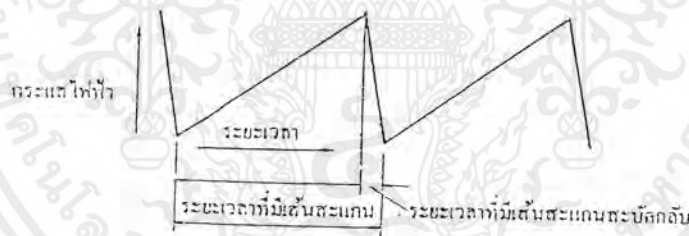
ภาพบนจอหลอดภาพของเครื่องรับโทรทัศน์สีโดยทั่วไป จะประกอบด้วยเส้นขวางเล็กๆ ในแนวนอนเป็นจำนวนมาก ซึ่งแต่ละเส้นเหล่านี้จะมีทั้งส่วนที่ดำสนิทหรือมีสีเข้ม ส่วนที่ดำจางหรือมีสีจาง และส่วนที่สว่างมากปะปนกันอยู่ เส้นขวางเล็กๆ ในแนวนอนเหล่านี้ มีชื่อเรียกว่า เส้นสแกน เส้นเหล่านี้ประกอบด้วยจุดเล็กๆ ซึ่งมีทั้งมืดและสว่างปะปนกันอยู่ ภาพที่ปรากฏบนจอหลอดภาพจึงประกอบด้วยจุดเล็กๆ ที่มีระดับของความสว่างแตกต่างกันเป็นจำนวนมาก จุดเล็กๆ เหล่านี้เรียกว่า ส่วนประกอบของภาพ หรือ picture element ซึ่งมีส่วนสัมพันธ์กับความละเอียดของภาพเช่นเดียวกับจุดดำหรือจุดสีเล็กๆ ในรูปภาพของสิ่งตีพิมพ์ ภาพที่เห็นบนจอหลอดภาพจะมองดูละเอียดกว่า หากมีจำนวนจุดเล็กๆ หรือจำนวนเส้นสแกนในแนวนอนมากเพียงพอ ด้วยเหตุนี้ โทรทัศน์ระบบยุโรปซึ่งมีจำนวนเส้นสแกน 625 เส้นต่อภาพ จึงให้ภาพที่มองดูละเอียดกว่า โทรทัศน์ระบบอเมริกา ซึ่งมีจำนวนเส้นสแกนเพียง 525 เส้นต่อภาพ เท่านั้น อย่างไรก็ตาม ภาพที่มองเห็นบนจอหลอดภาพจะมองดูละเอียดหรือหยาบไม่น่าดูอย่างไรนั้น ยังขึ้นอยู่กับส่วนประกอบอีกหลายอย่างเช่น ความสว่างของภาพและระยะทางที่มองดูภาพ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ทฤษฎีของการหักเหทางไฟฟ้าสถิตย์และทางแม่เหล็กไฟฟ้า

จุดที่เห็นสว่างในจอหลอดภาพของเครื่องรับโทรทัศน์ เกิดขึ้นเพราะอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากแคโทด และถูกคิ่งคูดให้วิ่งเป็นลำไปกระทบแอนโนดหรือจอหลอดภาพ ซึ่งฉาบด้วยวัสดุเรืองแสงบางชนิดเอาไว้ จุดที่มีการกระทบกัน ก็จะมองเห็นเป็นจุดสว่างขึ้นที่จอ การสแกนก็คือ การทำให้จุดสว่างนี้เอกลากรนี้เป็นเอกลากรที่ส่งงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

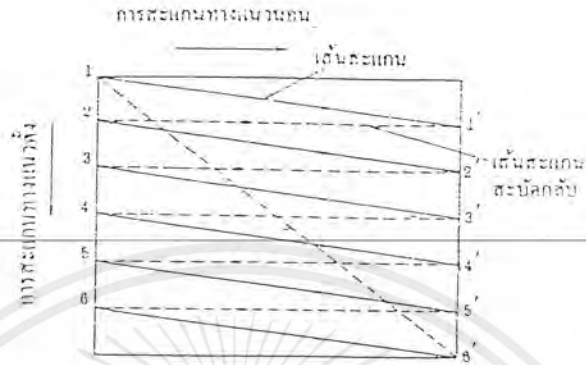
เคลื่อนที่ไปในจังหวะที่ต้องการ ซึ่งในเรื่องของโทรทัศน์ ก็ต้องการให้จุดสว่างนี้เคลื่อนที่ไปทั้งในแนวตั้งและแนวนอน โดยอาศัยความเข้มของสนามแม่เหล็กเข้าช่วยเหลือ ทำให้เกิดการดึงดูดหรือการผลักกันกับอิเล็กตรอน ในหลักการทำให้เกิดการดึงดูดหรือการผลักกันกับอิเล็กตรอนนี้ อาจทำได้โดยวิธีการหักเหของไฟฟ้าสถิต (Electrostatic deflection) หรือวิธีการหักเหของแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic deflection) ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ซึ่งวิธีการนี้นิยมใช้กันมากในทางปฏิบัติ สนามแม่เหล็กนี้เกิดขึ้นโดยการปล่อยกระแสไฟฟ้ารูปฟันเลื่อย (Saw tooth) ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 ให้ไหลผ่านขดลวดของการหักเห (Deflection coil) ที่พันอยู่รอบๆคอหลอดภาพ ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2 ชุด คือ ขดลวดที่พันอยู่รอบคอหลอดภาพในแนวนอนชุดหนึ่ง และขดลวดที่พันอยู่รอบคอหลอดภาพในแนวตั้งอีกชุดหนึ่ง สำหรับโทรทัศน์ระบบยุโรป ความถี่ของกระแสรูปฟันเลื่อยที่ไหลผ่านขดลวดของการหักเหในแนวนอนจะมีค่า 15.625 Hz ส่วนกระแสรูปฟันเลื่อยที่ไหลผ่านขดลวดของการหักเหในแนวตั้ง จะมีค่าเพียง 50 Hz เท่านั้น โดยปกติการสแกนจะเริ่มคืบขึ้น โดยการทำให้จุดสว่างบนจอหลอดภาพเคลื่อนที่จากซ้ายมือด้านบนของจอไปทางขวามือในแนวนอน ซึ่งเมื่อถึงตำแหน่งขวามือสุดก็จะถูกเบนต่ำลงเล็กน้อย อันเป็นผลเนื่องจากการที่มีกระแสรูปฟันเลื่อยไหลผ่านขดลวดของการหักเหในแนวตั้ง แล้วก็จะกลับไปเริ่มต้นใหม่ทางซ้ายมือเพื่อเคลื่อนที่มาทางขวามือในแนวนอนอีก เป็นอยู่เช่นนี้ไปเรื่อยๆจนกระทั่งจุดสว่างนั้นไปถึงตำแหน่งขวามือข้างล่างสุดของจอภาพ จึงเป็นอันเสร็จสิ้นการสแกนภาพหนึ่งภาพหนึ่ง หรือเรียกกันว่า เฟรมหนึ่ง ตามที่แสดงไว้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 รูปร่างของกระแสรูปฟันเลื่อย

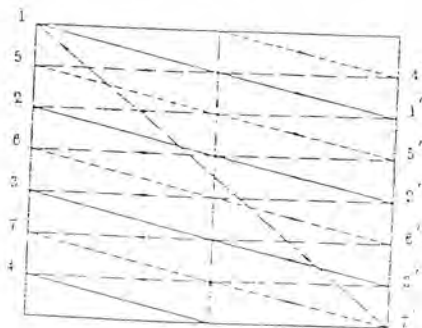
หลังจากนั้น ถ้าอิเล็กตรอนก็จะกลับไปตั้งคืบใหม่ทางซ้ายมือด้านบนสุดของจอหลอดภาพอีก เพื่อสแกนภาพหนึ่งอันดับถัดไป อย่างไรก็ตาม เพื่อลดอาการกระพริบของภาพการสแกนภาพหนึ่งแต่ละภาพ มักนิยมจัดทำสองครั้งในแบบของการสแกนไขว้กัน ซึ่งเรียกว่า Interlace scanning ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 โดยกำหนดให้ภาพหนึ่งเฟรม (Frame) ประกอบด้วยภาพหนึ่งสองฟิลด์ (Field) และเริ่มต้นด้วยการสแกนภาพหนึ่งฟิลด์เส้นคืบก่อน เมื่อถึงตำแหน่งขวามือล่างสุดของจอภาพแล้ว จึงกลับไปเริ่มตั้งคืบใหม่ทางซ้ายมือบนสุดของจอ แล้วเริ่มคืบการสแกนภาพหนึ่งฟิลด์เส้นคืบคู่ต่อไป จนถึงตำแหน่งขวามือล่างสุด หลังจากนั้น จึงจะเริ่มคืบสแกนภาพหนึ่งอันดับอื่นต่อไปใหม่ ฉะนั้น ภาพหนึ่งภาพ หรือ ภาพหนึ่งเฟรม จึงประกอบด้วยฟิลด์เส้นสแกนเส้นคืบและฟิลด์เส้นสแกนเส้นคืบคู่ สำหรับโทรทัศน์ระบบยุโรป ซึ่งใช้เส้นสแกน 625 เส้น ต่อภาพ และ 50 ภาพ ต่อวินาที ภาพหนึ่งแต่ละภาพหรือแต่ละเฟรมจะประกอบด้วยเส้นสแกนนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สแกนแนวนอน 625 เส้น ภาพนิ่งแต่ละฟิลด์จะมีเส้นสแกนแนวนอนครึ่งหนึ่งของ 625 เส้น หรือ 312.5 เส้น ภาพนิ่งแต่ละภาพนี้ จะเกิดขึ้นภายในระยะเวลา 1/25 วินาที ความถี่ของกระแสรูปพื้นเลื้อยที่ใช้ในการหักเหทางแนวนอน ซึ่งในระยะเวลา 1/25 วินาทีจะเกิดเส้นสแกน 625 เส้น



รูปที่ 2.3 การสแกนจากซ้ายไปขวา

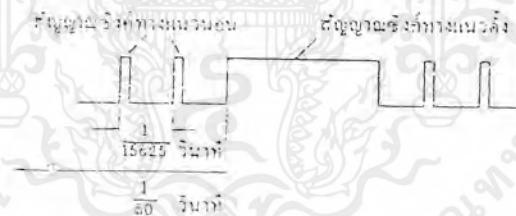
จะมีค่า $(625) \times (25) = 15,625$ Hz ส่วนความถี่ของกระแสรูปพื้นเลื้อยที่ใช้ในการหักเหทางแนวนอน ซึ่งใช้เวลาในการสแกนจากบนสุดมาล่างสุดสำหรับฟิลด์หนึ่งๆ เพียง 1/50 วินาที จะมีค่า 50 Hz การสแกนภาพนิ่งจะสแกนต่อไปเรื่อยๆ โดยมีจำนวนภาพนิ่งหรือจำนวนเส้นสแกนต่อภาพ กับจำนวนภาพต่อวินาทีแตกต่างกันไปตามแต่ชนิดของระบบโทรทัศน์ที่ใช้ ภาพที่ปรากฏบนจอหลอดภาพของเครื่องรับโทรทัศน์ จึงมีผลคล้ายกับการฉายภาพนิ่ง ซึ่งแต่ละภาพมีความแตกต่างกันบ้างเล็กน้อยเป็นจำนวนหลายๆภาพต่อหนึ่งวินาที เนื่องด้วยเหตุผลที่สายตาของคนเรามีคุณลักษณะพิเศษในเรื่องของ Persistence of vision จึงทำให้ผู้ชมโทรทัศน์สามารถมองเห็นภาพบนจอหลอดภาพของเครื่องรับโทรทัศน์เป็นภาพเคลื่อนไหวติดต่อกันไปตลอดเวลา



รูปที่ 2.4 การสแกนแบบตัดคู่ (interlace scanning)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่องที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของการส่งและรับโทรทัศน์ก็คือ จะต้องสามารถหาวิธีการซึ่งทำให้การสแกนของภาพที่เกิดขึ้นที่กล้องโทรทัศน์นั้น เกิดขึ้นพร้อมกันกับการสแกนของภาพที่จอหลอดภาพของเครื่องรับโทรทัศน์ หรือทำให้ความถี่ของกระแสรูปพื้นเลื้อยของวงจรหักเหทางแนวนอน และแนวตั้งทางกล้องโทรทัศน์เท่ากันตลอดเวลา กับความถี่ของวงจรหักเหทางแนวนอนและแนวตั้งทางจอหลอดภาพของเครื่องรับโทรทัศน์ หากความถี่ของกระแสรูปพื้นเลื้อยในวงจรทางเครื่องส่งโทรทัศน์ไม่เท่ากันตลอดเวลา กับความถี่ของกระแสรูปพื้นเลื้อยในวงจรทางเครื่องรับโทรทัศน์ ก็จะพบว่า ภาพจะลึบหรือ ไม่มีภาพทางเครื่องรับโทรทัศน์ การทำให้ความถี่ของกระแสรูปพื้นเลื้อยทางด้านเครื่องส่งโทรทัศน์เท่ากันตลอดเวลา กับความถี่ของกระแสรูปพื้นเลื้อยทางด้านเครื่องรับโทรทัศน์นี้ เรียกว่า เกิดการเข้าจังหวะ (Synchronization) ขึ้น ในทางปฏิบัติสถานีโทรทัศน์จะต้องส่งสัญญาณชนิดหนึ่ง เรียกว่า สัญญาณซิงก์ (Synchronizing signal หรือ sync pulse signal) ไปพร้อมกับสัญญาณ ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6 สัญญาณซิงก์นี้ จะประกอบด้วยสัญญาณซิงก์ทางแนวนอน (Horizontal synchronizing signal) ซึ่งมีความถี่ 15,625 Hz หรือจะมี sync pulse ครั้งหนึ่งในทุกๆ ครั้งที่มีการสแกนในแนวนอนกับ สัญญาณซิงก์ทางแนวตั้ง (Vertical synchronizing signal) ซึ่งมีความถี่ 50 Hz หรือจะมี sync pulse ครั้งหนึ่งในขณะที่มีการสแกนฟิลด์เส้นที่หรือเส้นคู่เสร็จสิ้นลง สัญญาณซิงก์เหล่านี้จะส่งไปพร้อมกับ สัญญาณภาพในช่วงระยะเวลาของเส้นสแกนสลับกลับ หรือช่วงระยะเวลาที่เส้นสแกนกำลังหันกลับไปเริ่มต้นใหม่ (Flyback period)



รูปที่ 2.5 รูปร่างของสัญญาณซิงก์

ในทางปฏิบัติ สถานีโทรทัศน์ขาวดำจะต้องส่งสัญญาณต่างๆ หลายอย่างออกอากาศไปให้เครื่องรับโทรทัศน์ เพื่อทำให้เกิดภาพขาวดำที่จอหลอดภาพของเครื่องรับโทรทัศน์ในลักษณะเดียวกันและพร้อมกันกับ การสแกนภาพของกล้องโทรทัศน์ สัญญาณต่างๆ สำหรับทำให้เกิดภาพขาวดำเหล่านี้ แสดงไว้ในรูปที่ 2.6 ซึ่งประกอบด้วย

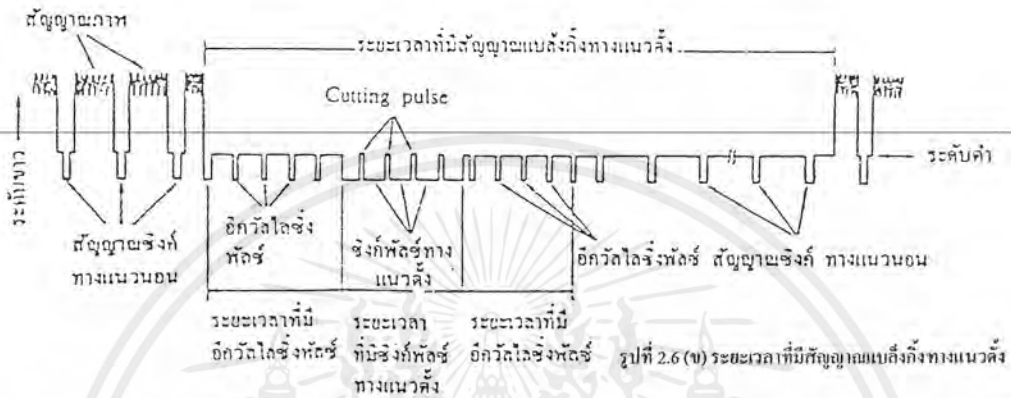
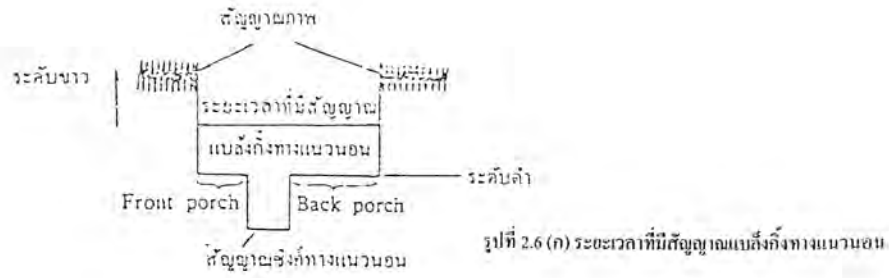
- ๑ สัญญาณภาพ (Video signal)
- ๑ สัญญาณแบล็กอิงก์ (Blanking signal)
- ๑ สัญญาณซิงก์ (Synchronizing signal)
- ๑ สัญญาณเส้นคู่ (คู่) (Equalizing signal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

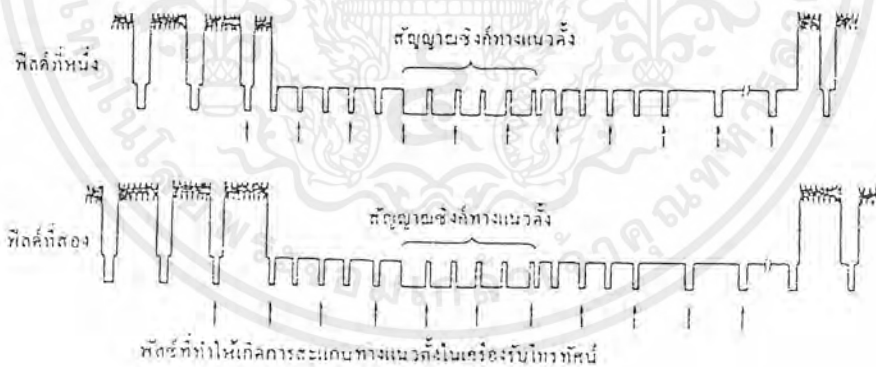
สัญญาณต่างๆ ตามรูปที่ 2.6 จะรวมอยู่เป็นรูปร่างเดียวกัน ซึ่งเรียกว่า สัญญาณภาพรวม (Composite signal) แล้วใช้คลื่นพาห้ของภาพเป็นตัวพาออกอากาศรวมกับคลื่นพาห้ของสัญญาณเสียง เหตุผลและความจำเป็นในการใช้สัญญาณต่างๆมีดังต่อไปนี้

(ก) สัญญาณภาพ (Video signal) และสัญญาณเสียง (Sound signal) เป็นสัญญาณที่ใช้ทำให้เกิดภาพขาวดำที่จอหลอดภาพ และมีเสียงที่ลำโพงของเครื่องรับโทรทัศน์ตามต้องการ สัญญาณภาพ (Video signal) บางครั้งเรียกว่า สัญญาณส่องสว่าง (Brightness signal หรือ Luminance signal)

(ข) สัญญาณแบลิ่งกิ้ง (blanking signal) เป็นสัญญาณที่ใช้ลบเส้นสแกนสะบัดกลับทั้งในแนวนอนและในแนวตั้ง เพื่อมิให้เป็นที่ยังเกตเห็นได้ชัดทางจอหลอดภาพ รูปที่ 2.6 (ก) เป็นรูปขยายของระยะเวลาที่มีสัญญาณแบลิ่งกิ้งทางแนวนอน (horizontal blanking period) และในช่วงระยะเวลาที่สัญญาณแบลิ่งกิ้งทางแนวนอนนี้ ก็จะส่งสัญญาณซิงค์ทางแนวนอน (horizontal synchronizing signal) ไปด้วยแต่จะอยู่ในระดับค่าต่ำกว่าสัญญาณแบลิ่งกิ้งส่วนที่เหลือเล็กน้อยระหว่าง แบลิ่งกิ้งพัลส์ กับซิงค์พัลส์ นี้จะมีอยู่สองส่วนตามรูปที่แสดงไว้ส่วนหน้าเรียกว่า front porch และส่วนหลังเรียกว่า back porch สำหรับโทรทัศน์ระบบอเมริกา ความถี่ของกระแสรูป พื้นเฉลี่ยที่ไหลผ่านขดลวดของการหักเหในแนวนอนมีค่า 15,750 Hz เพราะฉะนั้น ในระยะเวลา $1/15,750$ วินาที หรือ 63.5 ไมโครวินาที จะต้องเกิดเส้นสแกนสะบัดกลับอีกครั้งหนึ่ง จึงจำเป็นต้องใช้แบลิ่งกิ้งพัลส์ทางแนวนอนอีกครั้งหนึ่ง โดยมีขนาดประมาณ 10 ไมโครวินาที ส่วนรูปที่ 2.6 (ข) นั้น เป็นรูปขยายของระยะเวลาที่มีสัญญาณแบลิ่งกิ้งทางแนวตั้ง (vertical blanking signal) สำหรับโทรทัศน์ระบบอเมริกาทุก ๆ ระยะเวลา $1/60$ วินาที หรือ 16.667 ไมโครวินาที จำเป็นต้องให้มี แบลิ่งกิ้งพัลส์ทางแนวตั้งครั้งหนึ่ง โดยมีขนาดประมาณ 1,250 ไมโครวินาที ในระยะที่มีแบลิ่งกิ้งพัลส์ทางแนวตั้งนี้ ก็จะส่งสัญญาณซิงค์ทางแนวตั้งออกไปด้วย และเพื่อประโยชน์ในการช่วยทำให้สัญญาณซิงค์ทางแนวตั้ง ยังคงมีรูปร่างดีเหมือนเดิม หลังจากแยกออกมาจากสัญญาณซิงค์ทางแนวนอนทางเครื่องรับโทรทัศน์แล้วจะนิยมใส่อีควอไลซิง (equalizing pulses) กับคัทคิง (cutting pulses) ไปด้วยตามรูปที่ 2.6 (ข) ความถี่ของอีควอไลซิงพัลส์และคัทคิงพัลส์นี้ จะมีค่าเป็นสองเท่าของความถี่สัญญาณซิงค์ทางแนวนอน เพื่อช่วยให้การ สแกนแบบหนึ่งเฟรมแบ่งออกเป็นสองฟิลด์ทางด้านเครื่องรับโทรทัศน์ เป็นไปอย่างถูกต้องและเหมาะสม จุดตั้งต้นของสัญญาณซิงค์ทางแนวนอนและสัญญาณซิงค์ทางแนวตั้งนี้ จะต้องมีส่วนสัมพันธ์กันอย่างเหมาะสมคือ เมื่อหมดการสแกนฟิลด์หนึ่ง ๆ แล้ว จะต้องเกิดขึ้นพร้อมกันเพื่อทำการสแกนฟิลด์ต่อไป ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 มิฉะนั้น การสแกนไขว้กันทางเครื่องรับโทรทัศน์อาจไม่เป็นไปในจังหวะที่ถูกต้องได้



รูปที่ 2.6 รูปร่างของสัญญาณซิงค์ที่ใช้ในการส่งโทรทัศน์



รูปที่ 2.7 พัลส์ที่เกิดขึ้นในระยะเวลาที่มีสัญญาณแบดถึงทางแนวนอน ในพัลส์ที่หนึ่งและพัลส์ที่สอง

(ค) สัญญาณซิงค์ (Synchronizing Signal) เป็นสัญญาณที่ใช้เพื่อช่วยทำความถี่ของกระแสรูปพื้นเลื่อยที่ใช้ในวงจรของการหักเหทางแนวนอน กับวงจรหักเหทางแนวนอนของเครื่องส่งโทรทัศน์ มีค่าตรงกันกับที่ใช้ในเครื่องรับโทรทัศน์ อันจะมีผลทำให้การสแกนของภาพทางด้านเครื่องส่งโทรทัศน์ ตรงกันกับทางด้านเครื่องรับโทรทัศน์ตลอดเวลาสัญญาณซิงค์ทางแนวนอน จะมีความถี่เท่ากับ ความถี่ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

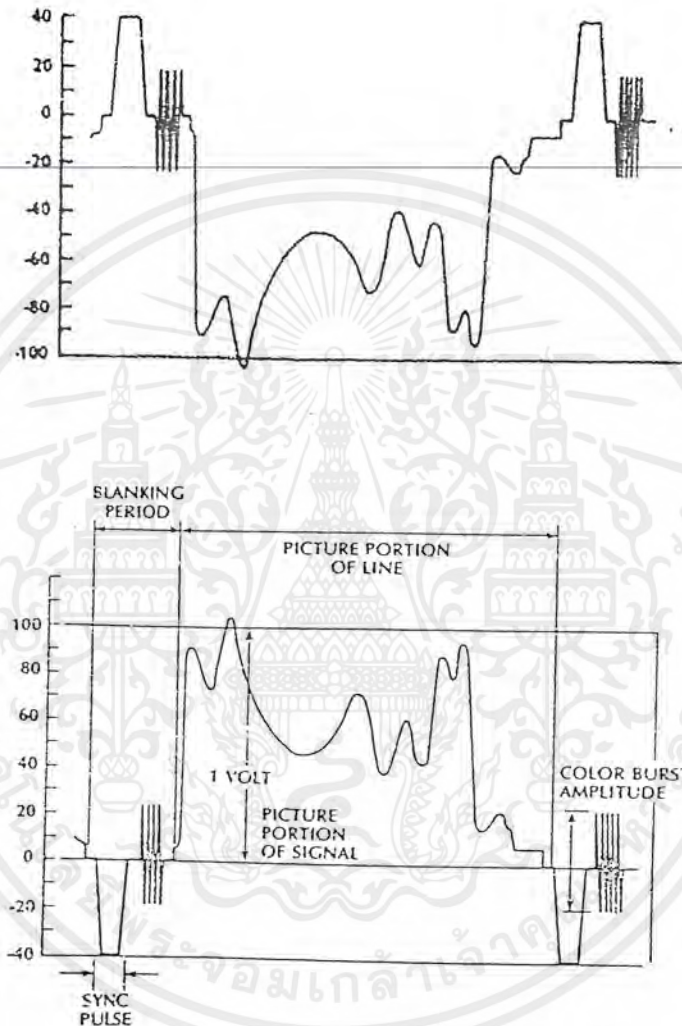
กระแสรูปพื้นเลื่อยที่ใช้ในวงจรการหักเหทางแนวนอน และสัญญาณซิงก์ทางแนวตั้งก็จะมีค่าเท่ากับ ความถี่ของกระแสรูปพื้นเลื่อยที่ใช้ในวงจรของการหักเหทางแนวตั้งเนื่อง จากความถี่ของสัญญาณซิงก์นี้เท่ากันกับ ความถี่ของสัญญาณแบลิ่งกิ้ง จึงจำเป็นต้องป้องกันการรบกวนที่เกิดขึ้น โดยจำเป็นต้องกำหนดขนาดของซิงก์พัลส์ให้น้อยกว่าขนาดของแบลิ่งกิ้ง พัลส์ กล่าวคือ ทำให้ซิงก์พัลส์ทางแนวนอนมีขนาดเพียง 5 ไมโครวินาที และซิงก์พัลส์ทางแนวตั้งมีขนาดเพียง 190 ไมโครวินาทีเท่านั้น นอกจากนี้ยังใช้วิธีส่งซิงก์พัลส์เหล่านี้ไปปะปนกับแบบแบลิ่งกิ้งพัลส์โดยทำให้ฐานของซิงก์พัลส์อยู่ทับขอบบนของแบลิ่งกิ้งพัลส์อีกชั้นหนึ่ง เมื่อได้กำหนดให้ ระดับสูงสุดของแบลิ่งกิ้งพัลส์ก็จะเป็นระดับค่ามีค่านิติ และไม่ทำให้เกิดการรบกวนที่จอหลอดภาพแต่ประการใด

(ง) สัญญาณอีควอลไลซิง (Equalizing Signal) เป็นสัญญาณที่ใช้เพื่อช่วยทำให้สัญญาณซิงก์ทางแนวตั้งยังคงมีรูปร่างดีเหมือนเดิม หลังจากแยกออกมาจากสัญญาณซิงก์ทางแนวนอนในเครื่องรับโทรทัศน์แล้ว สัญญาณนี้มีความถี่เป็นสองเท่าของสัญญาณซิงก์ทางแนวนอน ซึ่งจะช่วยให้การสแกนไขว้ทางเครื่องรับโทรทัศน์เป็นไปโดยเรียบร้อย รวมทั้งสัญญาณซิงก์ทางแนวนอนก็จะไม่ขาดหายในช่วงเวลาที่มีสัญญาณซิงก์ทางแนวตั้งอีกด้วยขนาดของอีควอลไลซิงพัลส์ ก็มีขนาดของซิงก์พัลส์ทางแนวตั้ง คือประมาณ 190 ไมโครวินาที หรือประมาณ 3 เท่าของซิงก์พัลส์ทางแนวนอน นอกจากนี้ ยังนิยมแบ่งพัลส์นี้ออกเป็นพัลส์เล็ก ๆ ตามรูปที่ 2.6 (ข) เพื่อทำให้เกิดซิงก์พัลส์ทางแนวนอนครั้งหนึ่ง ในทุก ๆ สองครั้งที่มีพัลส์เล็ก ๆ เท่านั้น

2.2 เทคนิคการสแกนเบิ้ลสัญญาณภาพ

2.2.1 การกลับสัญญาณภาพ (Video Inversion)

หลักการ วิธีนี้จะทำการกลับสัญญาณภาพ รวมทั้งสัญญาณซิงค์



รูปที่ 2.8 ผลของวิธีการกลับสัญญาณภาพ

เทคนิคการสแกนเบิ้ลวิธีนี้เริ่มแรกใช้ในระบบสแกนเบิ้ลของเคเบิลทีวี (Cable Television) เทคนิคนี้การดิสแกมเบิ้ลทำได้ง่ายเพียงแค่คัดแปลงที่เครื่องรับโทรทัศน์ให้กลับขั้วของสัญญาณสำหรับระบบโทรทัศน์ผ่านดาวเทียม ที่เครื่องรับส่วนมากจะมีสวิตซ์ทำการกลับขั้วของสัญญาณอยู่แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.8 สัญญาณภาพรวมจะถูกกลับจากบวกเป็นลบ จากลบเป็นบวก ทำให้เครื่องรับไม่สามารถซิงก์ภาพได้ และจะทำให้ภาพเป็นเนกาทีฟ (Negative) สัญญาณเบิร์สต์สี (Color Burst) จะถูกเลื่อนเฟสไป 180°

2.2.2 การเลื่อนซิงก์โดยรูปคลื่นไซน์ (Sinewave Sync Shifting)

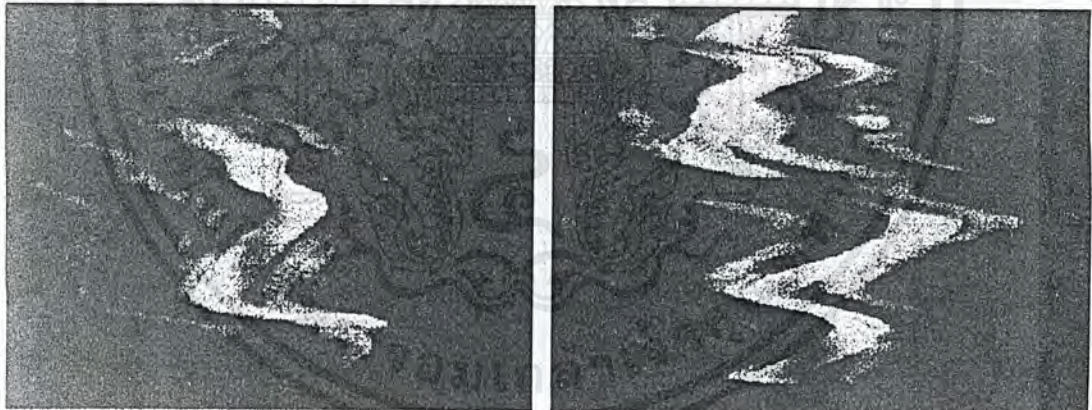
หลักการคือ บวกรูปคลื่นไซน์เข้าไปในสัญญาณภาพ โดยมีความถี่ของคลื่นไซน์เท่ากับความถี่ของสัญญาณภาพ 1 เส้น หรือเป็นจำนวนเท่า

เทคนิคนี้มี 2 แบบ คือ

1. ใช้ความถี่ของคลื่นไซน์เท่ากับความถี่ของสัญญาณภาพ 1 เส้น
2. ใช้ความถี่ของคลื่นไซน์เป็นจำนวนเท่าของสัญญาณภาพ 1 เส้น

การทำงานของเทคนิคนี้คือ แรงดันของคลื่นไซน์จะทำให้ระดับของซิงก์เลื่อนไปอยู่ในระดับของสัญญาณภาพ ซึ่งจะทำให้เครื่องรับไม่สามารถซิงโครไนซ์ภาพได้ ทำให้ภาพที่หน้าจอสายหรือเลื่อน

การบวกคลื่นไซน์เข้าไป จะเป็นผลทำให้ไปเพิ่มแอมพลิจูดของสัญญาณภาพ ถ้าสัญญาณภาพไม่ถูกลดทอนก่อนที่จะทำการสแกนเบิ้ลแล้ว การบวกคลื่นไซน์เข้าไป จะทำให้สัญญาณภาพเบี่ยงเบนมากเกินไป (Overdeviation) ผลก็คือจะทำให้ภาพเพี้ยนไป



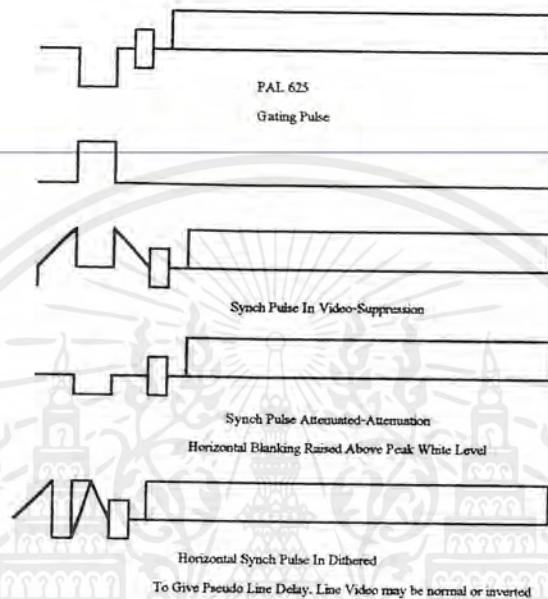
รูปที่ 2.9 ผลของการเลื่อนซิงก์โดยรูปคลื่นไซน์

2.2.3 การเลื่อนซิงก์พัลส์ (Pulse Sync Shifting)

หลักการ ซิงก์จะถูกเลื่อนเข้าไปในย่านของสัญญาณภาพ ซึ่งใช้ได้ทั้งซิงก์ทางแนวนอนและซิงก์ทางแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

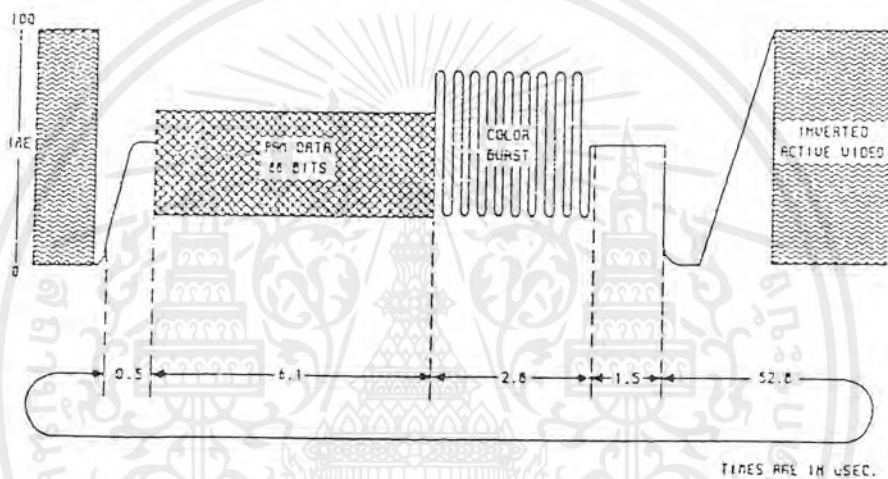
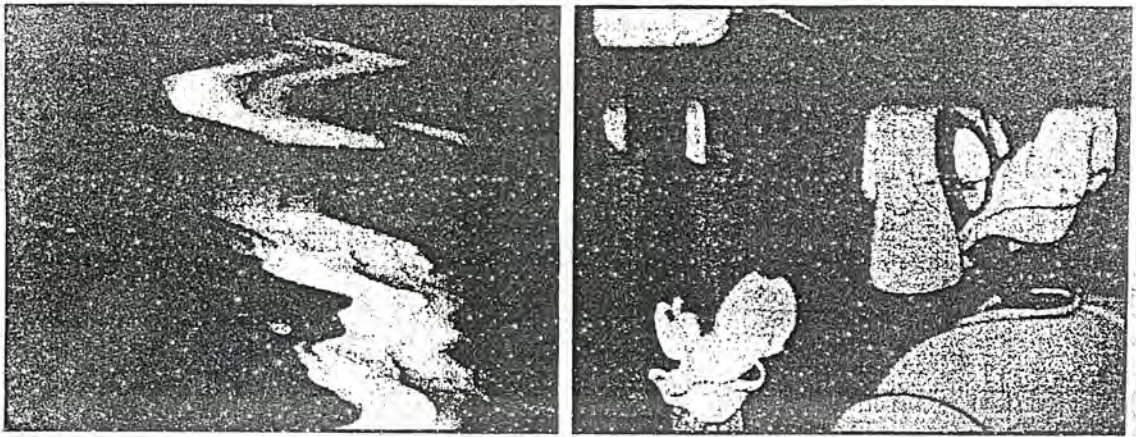
การเลื่อนซิงค์พัลส์สามารถป้องกันเครื่องรับโทรทัศน์จากการถือภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีนี้จะต่างจากวิธีการเลื่อนซิงค์โดยรูปคลื่นไซน์คือการเลื่อนซิงค์พัลส์จะมีผลเฉพาะช่วงสัญญาณซิงค์เท่านั้น



รูปที่ 2.10 ผลของการเลื่อนสัญญาณซิงค์

2.2.4 การแทนสัญญาณซิงค์ (Sync Replacement)

หลักการ สัญญาณซิงค์ทางแนวนอนและซิงค์ทางแนวตั้งจะถูกแทนที่ด้วยสัญญาณรูปแบบอื่นๆ เทคนิคการสแกนเบิ้ลแบบนี้มีใช้ในอเมริกาเหนือและยุโรป และเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในระบบ OAK Orion และระบบ Video Cipher II ในระบบ ORION ช่องว่างที่อยู่ระหว่างสัญญาณซิงค์แนวนอนและสัญญาณเบิร์สต์ความถี่ 2.5 MHz จะมีการใส่เบิร์สต์ข้อมูล (Data Burst) เข้าไป ส่วนระบบ Video Cipher สัญญาณซิงค์ทางแนวนอนจะแทนด้วยเบิร์สต์ข้อมูล ซึ่งเบิร์สต์ข้อมูลจะมีข้อมูลของสัญญาณซิงค์แนวนอนรวมอยู่ด้วย



รูปที่ 2.11 ผลของการแทนสัญญาณซิงค์

2.2.5 การกลับสัญญาณภาพแบบแอคทีฟ (Active Inversion)

หลักการ จะทำการกลับขั้วของสัญญาณภาพแบบแอคทีฟ

วิธีนี้จะกลับขั้วของสัญญาณภาพทีละเส้น ซึ่งสามารถเพิ่มความปลอดภัยของข้อมูลได้ยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามส่วนใหญ่มักจะทำการกลับขั้วโดยกลับทีละเส้นสลับกับ (Alternate Line) ซึ่งทำให้ความปลอดภัยต่ำลง ในบางระบบจะใช้การกลับขั้วฟิลด์ต่อฟิลด์ (Field - by - Field)

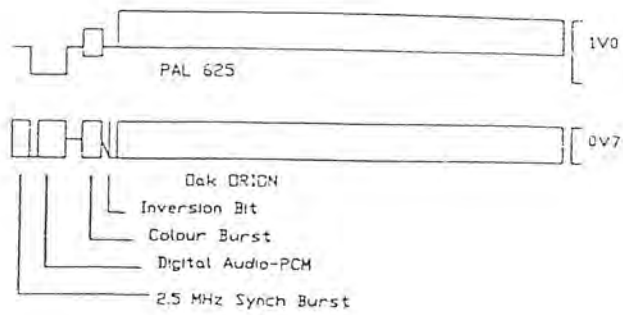
เทคนิคนี้แบ่งได้ 2 แบบ คือ

- แบบที่มีคีย์ (Key)
- แบบที่ไม่มีคีย์ (No Key)

แบบมีคีย์จะมีความปลอดภัยต่ำกว่า คีย์คือพัลส์ที่อยู่ในช่วงแบลิ่งกิ้งของการสแกนทางแนวนอน ซึ่งใช้เป็นตัวบอกขั้วของสัญญาณภาพ

แบบไม่มีคีย์ จะไม่เป็นสิ่งที่ใช้แสดงขั้วของสัญญาณในส่วนของแต่ละเส้นเลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



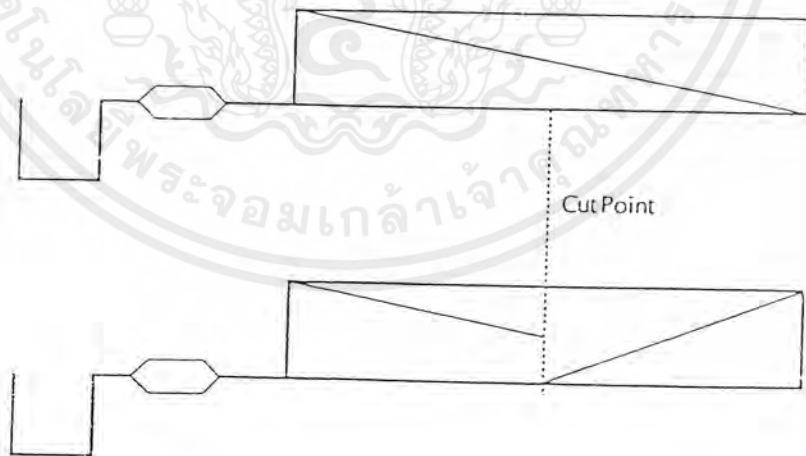
รูปที่ 2.12 ผลของการกลับสัญญาณภาพแบบแอคทีฟ

จากรูปการคีสแตรมบีลจะใช้การเปลี่ยนแปลงของคีย์เป็นตัวแทนของสัญญาณภาพแต่ละเส้น

2.2.6 การตัดและกลับขั้ว (Cut and Invert)

หลักการ สัญญาณภาพแต่ละเส้นจะถูกแบ่งเป็นส่วนย่อยๆ เรียกว่า เซกเมนต์ (Segment) และจะทำการกลับขั้วของสัญญาณในเซกเมนต์ใดเซกเมนต์หนึ่ง หรือที่หลายเซกเมนต์ ดังรูปที่ 2.13

เทคนิคนี้ ไม่เหมาะกับวงจรแบบอนาล็อกเพราะจะออกแบบยาก แต่จะเหมาะกับการออกแบบแบบดิจิทัลซึ่งทำได้ง่ายกว่า



รูปที่ 2.13 ผลของการตัดและกลับขั้ว

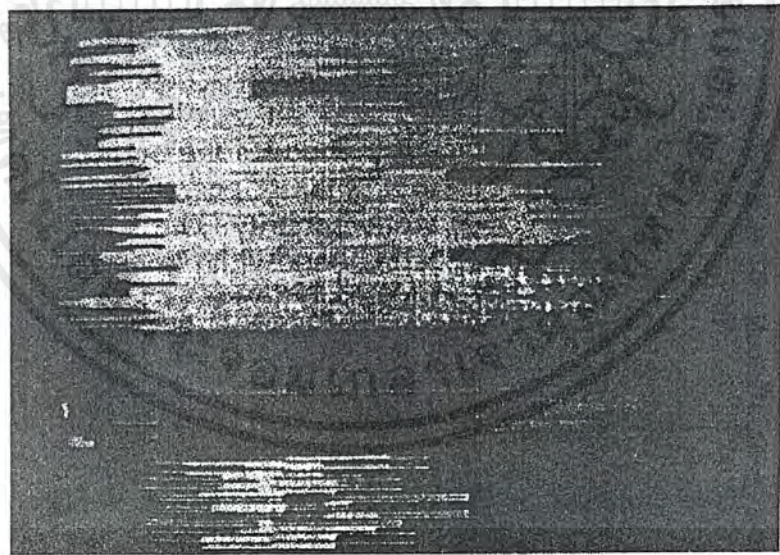
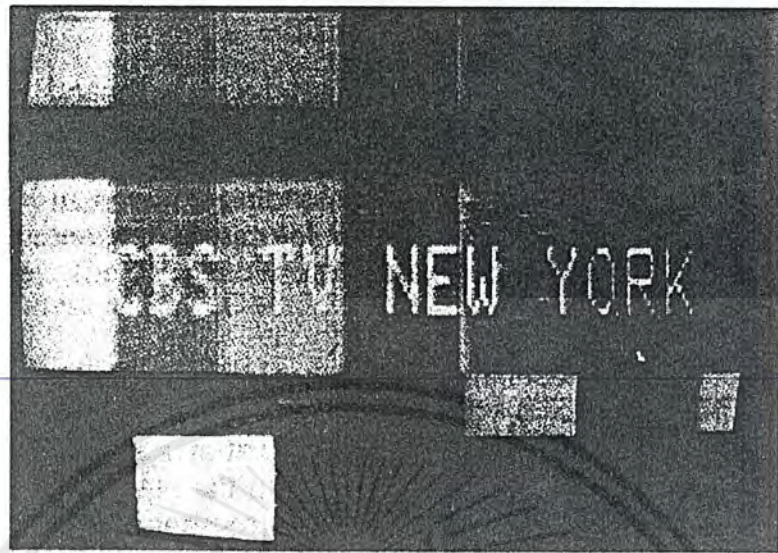
จากรูปที่ 2.13 มีการแบ่งสัญญาณภาพ 1 เส้นออกเป็น 2 เซกเมนต์ และทำการกลับขั้วของสัญญาณที่เซกเมนต์ที่ 2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.7 การตัดและหมุน (Cut and Rotate)

หลักการ สัญญาณภาพแต่ละเส้นจะถูกแบ่งออกเป็นเซกเมนต์ ตามจำนวนเซกเมนต์ที่จัดไว้ ทำการเลื่อนเซกเมนต์สุดท้ายมาไว้ที่เซกเมนต์แรกและเลื่อนเซกเมนต์แรกไปที่เซกเมนต์ที่ 2 และเซกเมนต์อื่นก็เลื่อนในทำนองเดียวกัน

การสแกนเบิ้ลแบบนี้ใช้ในยุโรป และมีประสิทธิภาพดีมาก จำนวนของเซกเมนต์ต่อ 1 เส้นที่ใช้คือ 256 เซกเมนต์





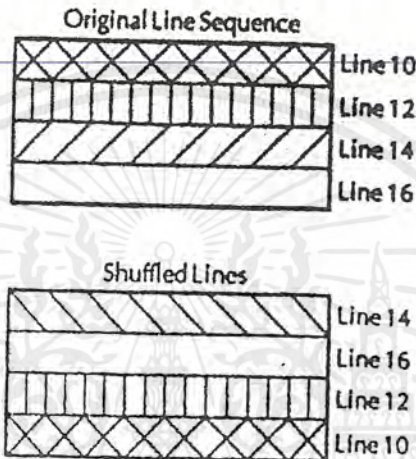
รูปที่ 2.14 ผลของการตัดและหมน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.8 การสับเปลี่ยนเส้น (Line Shuffle)

หลักการ ลำดับของเส้นใน 1 ฟิวด์ หรือเฟรมจะถูกเปลี่ยน ดังนั้นลำดับของเส้นที่ส่งออกไปจะไม่ใช้ภาพที่ถูกค้อง ตัวอย่างเช่น เส้นที่ 15 อาจจะส่งในลำดับที่ 211 แล้วเอาเส้นที่ 211 มาส่งในลำดับที่ 15

การสแกนแบบนี้ต้องการการเก็บฟิวด์หรือเฟรมเพื่อทำการสับเปลี่ยน ดังนั้นจึงเหมาะกับระบบดิจิตอล



รูปที่ 2.15 ผลของการสับเปลี่ยนเส้น

2.3 ระบบสแกนแบบเทลิส - แมสท์ (Telease - Masst Csrambling System)

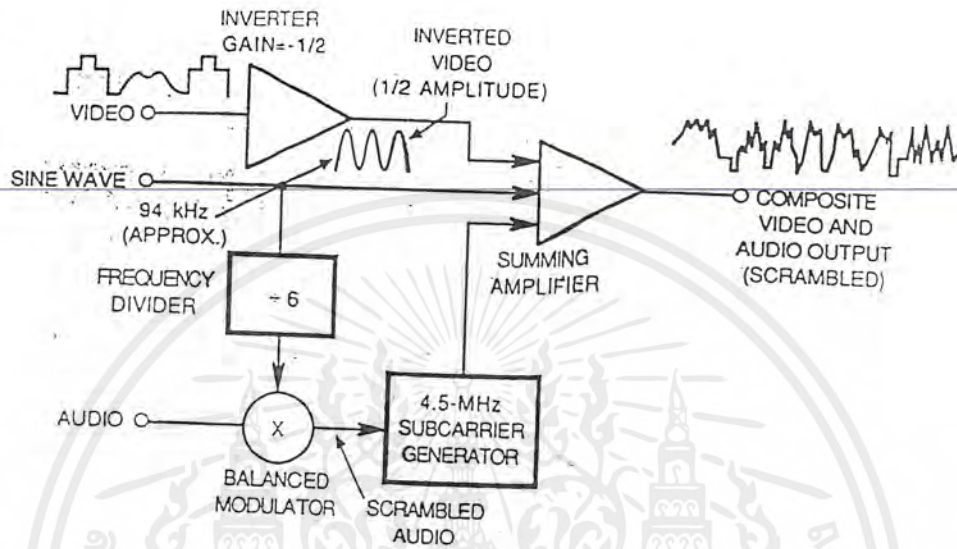
ระบบเทลิส-แมสท์ เป็นระบบที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันนี้โดยมีใช้อยู่ในบางบริการของการสื่อสารดาวเทียมที่มีการสร้างสัญญาณรหัสเข้าไปด้วย โดยส่วนใหญ่จะใช้ในระบบนี้กับช่องสัญญาณกีฬา 2 ช่องและช่องสัญญาณเฉพาะสำหรับผู้ใหญ่ 2 ช่อง แม้ว่าระบบนี้จะไม่เป็นที่นิยมใช้กับระบบเคเบิลแต่ระบบนี้ก็มี ความเหมาะสมในการอ้างอิงและการแสดงคุณสมบัติของระบบการเข้ารหัสและถอดรหัส

ระบบ Telease-Maast เป็นพื้นฐานของระบบการเข้ารหัสสัญญาณภาพและเสียงแบบอนาล็อก ระบบนี้มีหลักการที่คล้ายคลึงกันกับระบบการเข้ารหัสด้วยสัญญาณไซน์ โดยผลที่เกิดจากการเข้ารหัสด้วย ระบบเทลิส-แมสท์ คือ

1. สัญญาณภาพถูกกลับเฟสให้ตรงกันข้ามและแอมพลิจูดจะลดลงครึ่งหนึ่งของขนาดเดิมแอมพลิจูดปกติ
2. สัญญาณไซน์เวฟ 94 kHz จะเข้าไปบนสัญญาณภาพที่ถูกกลับเฟสและแอมพลิจูดลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สัญญาณเสียงจะถูกมอดูเลทกับความถี่พาหะย่อยที่มีความถี่ประมาณ 15.6 kHz ซึ่งผลที่ได้รับจะเป็นสัญญาณเสียงแบบ Double - Sideband (DSB) Suppressed - Carriers

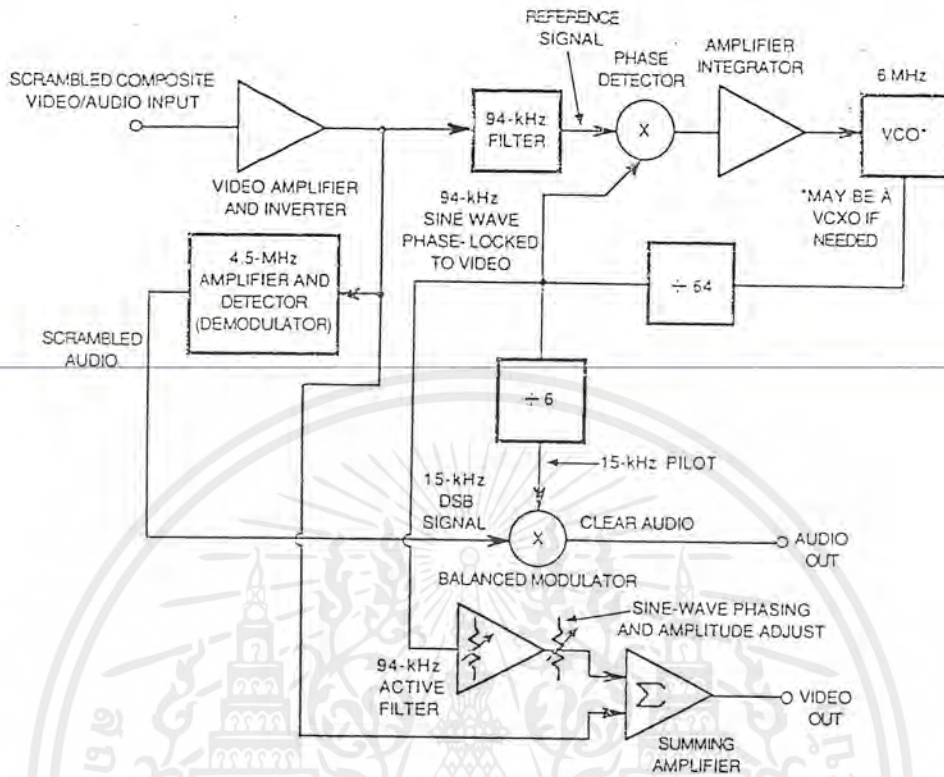


รูปที่ 2.16 บล็อกไดอะแกรมของสแกรมเบิ้ลระบบเทลิส - แมสท์

จากรูปที่ 2.16 จะแสดงถึงบล็อกไดอะแกรมของระบบ โดยระบบนี้ต้องสังเกตความสำคัญของความถี่ 94 kHz ซึ่งไม่พอดีกับ 6 เท่าของความถี่การสแกนตามแนวนอน ในทางปฏิบัติความถี่ที่ใช้อยู่ในช่วง 94 - 95 kHz ดังตารางที่ 2.1 จะแสดงถึงการใช้ความถี่ในบริการด้านต่างๆ โดยพาหะย่อยของสัญญาณเสียงจะใช้ที่ความถี่ 1/6 ของความถี่ที่ใช้ในการเข้ารหัสสัญญาณภาพซึ่งใช้ความถี่ 94 kHz

ตารางที่ 2.1 ความถี่ไซน์เวฟที่ใช้ในการเข้ารหัสแบบ Telease

บริการ	ความถี่ (kHz)
กีฬา	94.5651
	94.6370
	94.1428
Fantasy Channel	94.0689
Adult Movie Channel	94.1944



รูปที่ 2.17 บล็อกไดอะแกรมของการดีสแกรมบีทีเอส - แมสท์ Teletext Descrambling

รูปที่ 2.17 แสดงถึงวิธีการถอดรหัสสัญญาณ เทลีส-แมสท์ ภาคขยายสัญญาณภาพและภาคดีเทคเตอร์ จะใช้การแยกพาหะย่อยของสัญญาณเสียงออกโดยตรง ซึ่งสัญญาณ 15 kHz DSB Suppressed-Carrier ส่วนสัญญาณ 94 kHz จะถูกแยกออกมาด้วยการถอดรหัสไซน์เวฟ โดยวงจร กรองความถี่ที่ใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงจากเฟสล็อกคัล (Phase-Locked Loop) ซึ่งมี VCO ทำงานเป็น 64 เท่า (โดยปกติ 6 MHz) ของความถี่ไซน์เวฟ (VCO อาจเรียกว่า VCXO ในกรณีที่เป็น Voltage-Controlled Crystal Oscillator) สัญญาณความถี่ 6 MHz จะถูกหารด้วย 64 และที่เอาต์พุต VCO (ถูกหารด้วย 64) จะนำไปป้อนให้กับอินพุตของ เฟสดีเทคเตอร์ (Phase Detector) โดยเอาต์พุตของเฟสดีเทคเตอร์ จะคอยควบคุม VCO (หรือ VCXO) ซึ่งทำให้เกิด เฟสล็อก (Phase Lock) ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุต 94 kHz จึงได้มาจากการหาร 64 หน่วยซึ่งเท่ากับความถี่ไซน์เวฟที่นำมาเข้ารหัส โดยสัญญาณไซน์เวฟนั้นถูกกรองด้วยวงจรแอกทีฟแบนด์พาสฟิลเตอร์ (Active Bandpass Filter) เพื่อควบคุมเฟสและแอมพลิจูด และนำไปรวมกับสัญญาณภาพที่มีการเข้ารหัส (สัญญาณที่ถูกกลับแล้ว) ทำให้สัญญาณไซน์เวฟถูกกำจัดไป

ในขณะนี้จะได้สัญญาณภาพปกติกลับมาแล้ว ส่วนสัญญาณเสียง 15 kHz DSB จะถูกป้อนให้ Dually Balanced Mixer (บางครั้งเรียกว่า Product Detector) สัญญาณการเข้ารหัสที่ 94 kHz จะถูกหารด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หก (6) และนำไปใช้เป็นอินพุตอีกด้านของ Double Balanced Mixer ซึ่งทำให้ได้สัญญาณเสียงหรือ TV Modulator ของช่อง 3 หรือช่อง 4 (รวมถึงสัญญาณภาพที่ผ่านการถอดรหัสมาแล้ว) ในการที่จะให้การถอดรหัสเสร็จสมบูรณ์ และไม่หลงเหลือ แถบหรือการกระเพื่อมของสัญญาณภาพรวมทั้งแอมพลิจูดและเฟส ของการเข้ารหัสด้วยสัญญาณไซน์เวฟที่สามารถ Matched ได้อย่างถูกต้องด้วยสัญญาณไซน์เวฟที่ถูกนำ กลับคืนมา

2.4 วงจรกรองความถี่ต่ำ (Low-pass filter)

2.4.1 วงจรกรองความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวิร์ทเธอร์ 1 (First-order Low-pass Butterworth Filter)

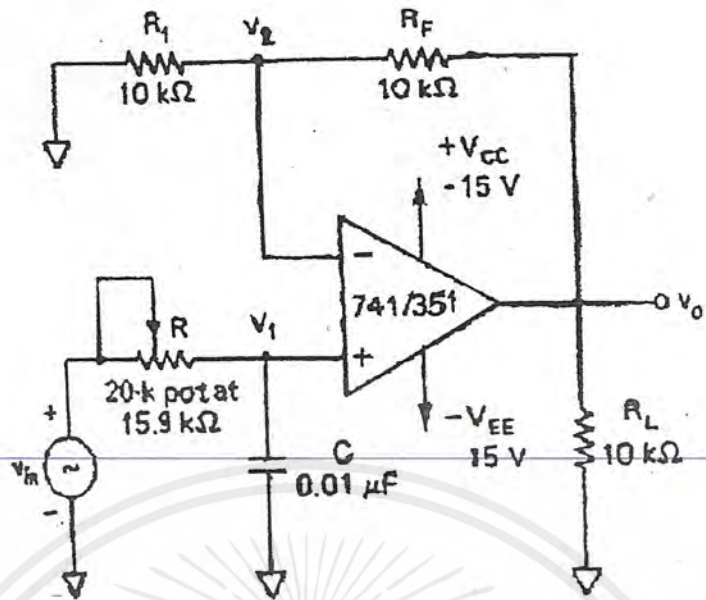
รูปที่ 2.18 แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวิร์ทเธอร์ 1 ซึ่งใช้ RC ในการกรองความถี่ อปแอมป์จะถูกตั้งให้ทำงานแบบนอนอินเวิร์ทติ่ง เกนของวงจรจะถูกกำหนดโดย R_1 และ R_2

จาก voltage-divider rule แรงดันที่ขั้วนอนอินเวิร์ทติ่ง คือ

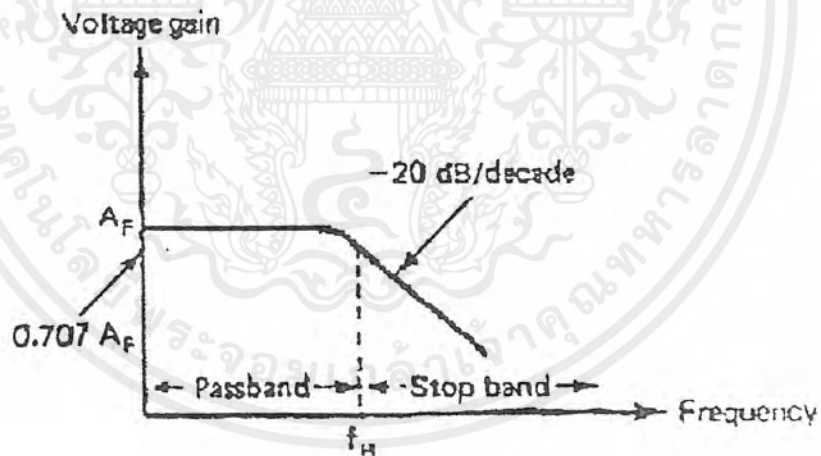
$$v_l = \frac{-jX_c}{R - jX_c} v_{in} \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$j = \sqrt{-1} \quad \text{และ} \quad -jX_c = \frac{1}{j2\pi fC}$$



รูปที่ 2.18 วงจรกรองความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวิร์ทออเดอร์ 1



รูปที่ 2.19 การตอบสนองความถี่

จากสมการ (2.1) จะได้

$$v_l = \frac{v_{in}}{1 + j2\pi fRC}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และแรงดันที่เอาท์พุท

$$v_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) v_i$$

ดังนั้น

$$v_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{v_{in}}{1 + j2\pi fRC}$$

หรือ

$$\frac{v_o}{v_{in}} = \frac{AF}{1 + j\left(\frac{f}{f_H}\right)} \quad (2.2)$$

เมื่อ $\frac{v_o}{v_{in}}$ = เกนของฟิลเตอร์ที่ความถี่ที่ใช้งาน

$$AF = 1 + \frac{R_F}{R_1} = \text{เกนของฟิลเตอร์}$$

f = ความถี่ของสัญญาณอินพุต

$$f_H = \frac{1}{2\pi RC} = \text{ความถี่คัทออฟของฟิลเตอร์}$$

ขนาดของเกนและสมการมุมเฟสของวงจรกรองความถี่ต่ำแสดงในสมการข้างล่าง

$$\left| \frac{v_o}{v_{in}} \right| = \frac{AF}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_H}\right)^2}} \quad (2.3)$$

$$\phi = -\tan^{-1}\left(\frac{f}{f_H}\right) \quad (2.4)$$

เมื่อ ϕ คือมุมเฟสในหน่วยองศา

การทำงานของวงจรกรองความถี่ต่ำสามารถพิสูจน์ได้จาสมการ (2.3)

1. ที่ความถี่ต่ำมาก ๆ, $f < f_H$,

$$\left| \frac{v_o}{v_{in}} \right| \cong AF$$

2. ที่ $f = f_H$,

$$\left| \frac{v_o}{v_{in}} \right| = \frac{AF}{\sqrt{2}} = 0.707 AF$$

3. ที่ $f > f_H$,

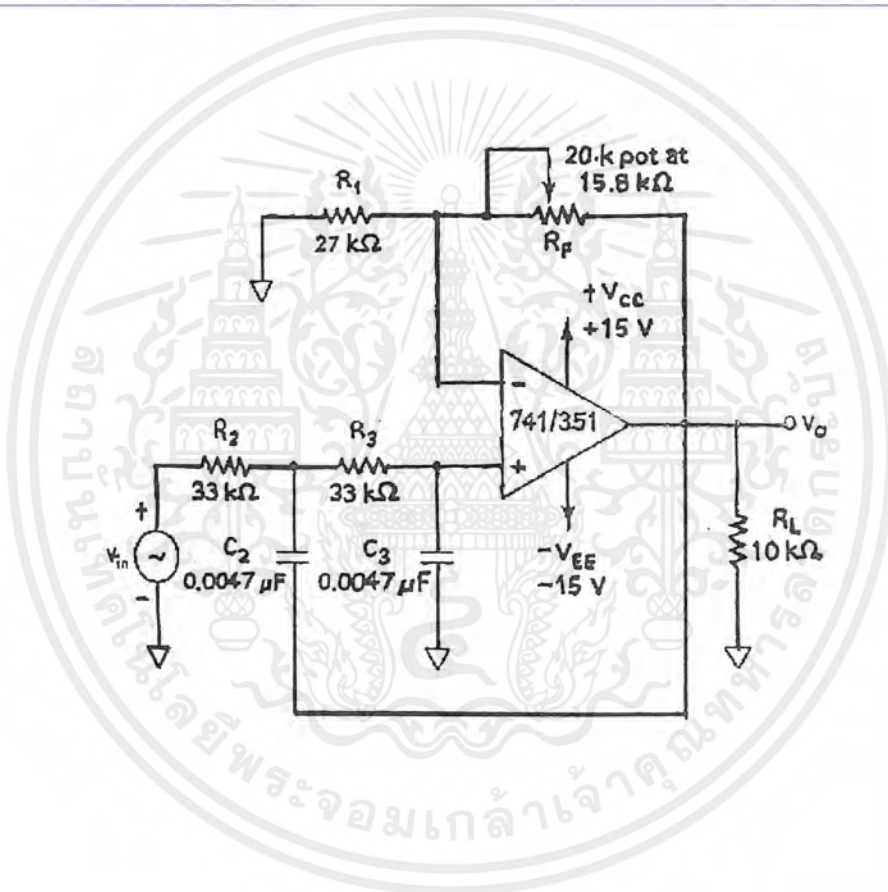
$$\left| \frac{v_o}{v_{in}} \right| < AF$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

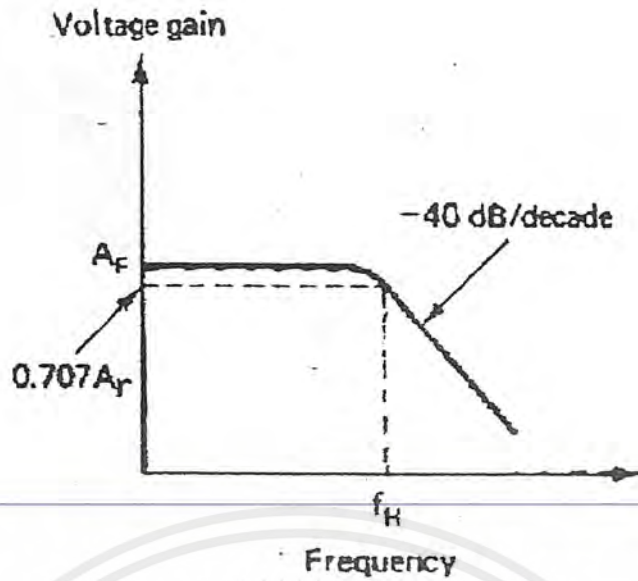
ดังนั้นวงจรกรองความถี่ต่ำจะมีเกนคงที่ A_f จาก 0 Hz ไปที่ความถี่คัทออฟ f_H ที่ f_H เกนจะมีค่า $0.707 A_f$ และเมื่อเลย f_H เกนจะลดลง (ดูรูปที่ 8-2b) ดังนั้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นสิบเท่า โวลเตจเกนจะถูกหาร 10 หรือเกนลดลง 20 dB ($=20\log 10$) เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นสิบเท่า อัตราการลดลงของเกนหลังจาก f_H คือ 20 dB/decade หรือ 6 dB/octave ที่ความถี่ $f = f_H$ เรียกว่า ความถี่คัทออฟ (cutoff frequency) เพราะว่าเกนของฟิลเตอร์ที่ความถี่นี้จะลดลง 3 dB ($=20\log 0.707$) จาก 0 Hz

2.4.2 วงจรกรองความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวิร์ทออร์เดอร์ 2 (Second-order Low-pass Butterworth Filter)

วงจรกรองความถี่ต่ำออร์เดอร์ 2 นี้มีอัตราการลดลงของเกนหลังจาก f_H คือ 40 dB/decade



รูปที่ 2.20 วงจรกรองความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวิร์ทออร์เดอร์ 2



รูปที่ 2.21 การตอบสนองความถี่

เกนของฟิลเตอร์แบบออร์เดอร์ 2 ถูกกำหนดโดย R_1 และ R_F , ขณะที่ความถี่คัทออฟ f_H ถูกกำหนดโดย R_2, C_2, R_3 และ C_3 ดังสมการข้างล่าง

$$f_H = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_2 R_3 C_2 C_3}} \quad (2.5)$$

สมการแสดงขนาดของโวลเตจเกนคือ

$$\left| \frac{v_o}{v_{in}} \right| = \frac{AF}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_H} \right)^2}} \quad (2.6)$$

เมื่อ $AF = 1 + \frac{R_F}{R_1} A_F = 1 + \frac{R_F}{R_1} =$ เกนของฟิลเตอร์

$f =$ ความถี่ของสัญญาณอินพุท (Hz)

$$f_H = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_2 R_3 C_2 C_3}} = \text{ความถี่คัทออฟของฟิลเตอร์}$$

2.5 เส้นใยแสง (Optical Fiber)

เส้นใยแสงคือเส้นใยขนาดเล็กที่ทำหน้าที่เป็นตัวนำแสง โครงสร้างของเส้นใยแสงประกอบด้วย ส่วนที่แสงเดินทางผ่านเรียกว่า คอร์ (Core) และส่วนที่หุ้มคอร์อยู่เรียกว่า แคลด (clad) ซึ่งทั้งสองทำจาก สารไดอิเล็กทริกใส 2 ชนิด โดยค่าดัชนีหักเหของแคลดมีค่าน้อยกว่าค่าดัชนีหักเหของคอร์อยู่เล็กน้อย ประมาณ 0.2-3% การเดินทางของแสงผ่านคอร์นั้นจะอาศัยปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดของแสง ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง ด้านนอกของแคลด มีขนาดประมาณ 0.1 มิลลิเมตร ส่วนคอร์ที่แสงเดินทางมีขนาดเล็ก

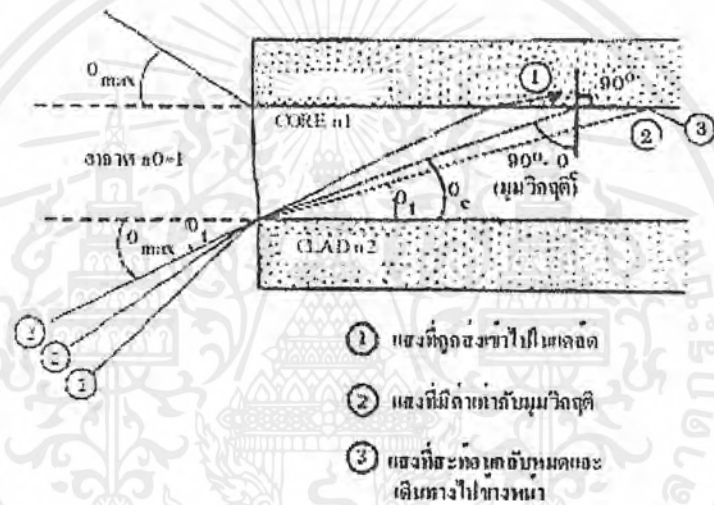
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาก หน่วยเป็น ไมโครเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าความยาวคลื่นแสงประมาณ หลายเท่าถึงหลายสิบบเท่า นอกจากนี้แล้วคุณสมบัติที่สำคัญของเส้นใยแสงที่นอกจากจะมีขนาดเล็กแล้ว ยังมีคุณสมบัติการส่งที่ดีอีกด้วย

ลักษณะการเดินทางของแสงในเส้นใยแสง

การป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยแสง

แสงที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงนั้น จะกระจายกว้างออกเนื่องจากปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของแสง การป้อนแสงเข้าไปจึงต้องทำการรวมแสง แต่ว่าแสงที่มีมุมตกกระทบที่เหมาะสมเท่านั้นจึงจะสามารถผ่านเข้าไปในเส้นใยแสงได้ พิจารณาจากรูปที่ 2.22 ซึ่งจะแสดงมุมรับแสงของเส้นใยแสง จากรูปจะเห็นว่าที่จุดป้อนแสงของเส้นใยแสงนั้นจะเป็นจุดต่อของตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสงต่างกัน 3 ชนิด



รูปที่ 2.22 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยแสง

ตัวกลาง 3 ชนิดนี้ คือ อากาศ คอร์ของเส้นใยแสง และแคลด์ของเส้นใยแสง ถ้าให้ค่านี้นักเหของแสงของตัวกลางทั้ง 3 ชนิดนี้เป็น n_0 ($n_0 = 1$), n_1 และ n_2 ตามลำดับ จะเกิดการหักเห , การสะท้อนกลับของแสงที่รอยต่อของอากาศกับคอร์ และคอร์กับแคลด์ ในที่นี้ให้มุมรับแสงของเส้นใยแสงที่มีค่ามากที่สุดเป็น θ_{max} จากรูปจะเห็นว่าลำแสง 2 นั้นมีมุมรับแสงตรงรอยต่อของคอร์กับแคลด์นั้น มีค่าเป็นมุมวิกฤติ (Critical Angle) ตรงรอยต่อของอากาศกับคอร์ และของคอร์กับแคลด์นั้น จากกฎของ SNELLจะได้ว่า

$$\sin \theta_{max} = n_1 \sin \theta_c$$

$$\sin(90^\circ - \theta_c) = \cos \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

ดังนั้นกรณีที่มีมุมรับแสง θ_{max} มีค่าสูงสุดได้นั้น $n_1 = n_2$ จาก 2 สมการข้างบนจะได้ว่า

$$\sin \theta_{\max} = n_1 \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}} = n_1 \sqrt{2\Delta}$$

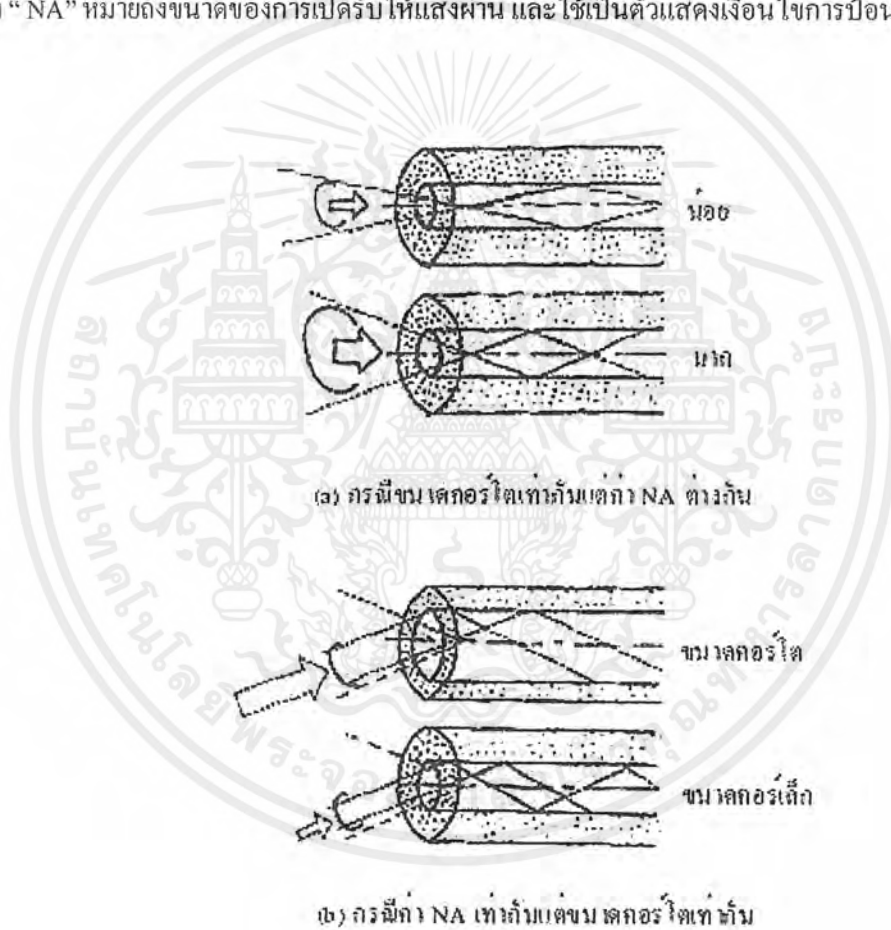
ในที่นี้

เรียกว่า อัตราส่วนของผลต่างของดัชนีการหักเหของแสง

สำหรับ $\sin \theta_{\max}$ นี้ ตามศัพท์เทคนิคของวิชาแสง เรียกว่า “ NUMERICAL APERTURE ” เขียน

$$\Delta = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1}$$

ย่อว่า “ NA ” หมายถึงขนาดของการเปิดรับให้แสงผ่าน และใช้เป็นตัวแสดงเงื่อนไขการป้อนแสงเข้าไปใน



รูปที่ 2.23 แสดงผลของ NA และขนาดของคอร์

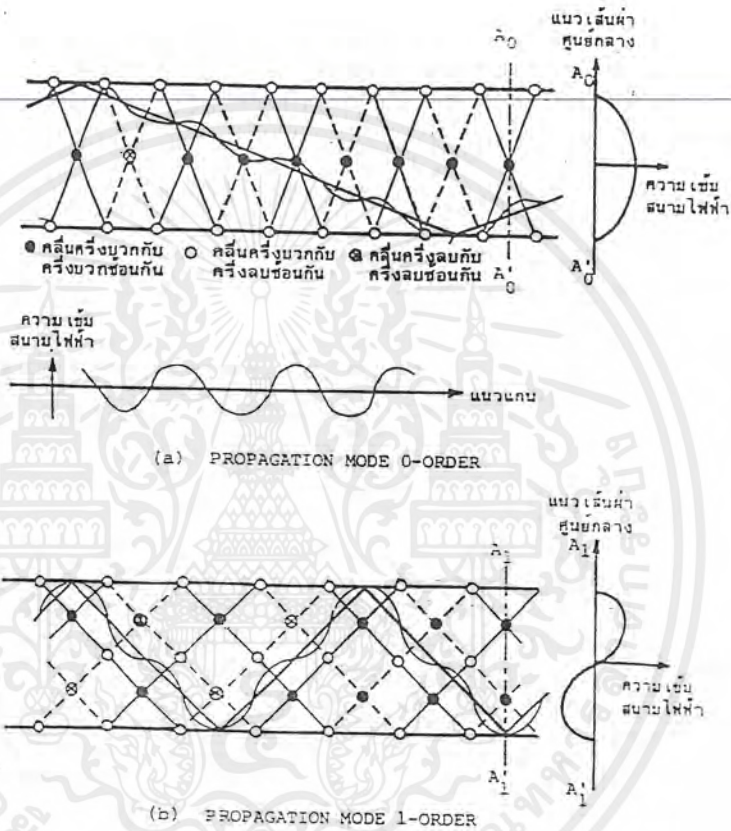
เส้นใยแสง นอกจากนั้นยังถือเป็นตัวประกอบพื้นฐานอันหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเชื่อมต่อแสงระหว่างคันทำเนิดแสงกับเส้นใยแสงด้วย ในรูปที่ 2.23 แสดงความหมายของ NA และ ขนาดของคอร์ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อแสง ระหว่างคันทำเนิดแสงกับเส้นใยแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะเห็นว่าถ้าหากขนาดของ คอรั และ NA มีค่าคงที่แล้ว จะกำหนดปริมาณของแสงที่ป้อนเข้าไปในคอรัได้ทันที เส้นใยแสงที่มีคอรัขนาดใหญ่และมีค่า NA มากจะมีประสิทธิภาพการเชื่อมต่อแสงระหว่างต้นกำเนิดแสงกับเส้นใยแสงสูงมาก

โหมดการเดินทางของแสง (PROPAGATION MODE)

รูปที่ 2.24 แสดงลักษณะของความเข้มของสนามไฟฟ้าภายในคอรัของเส้นใยแสงที่เกิดขึ้นจากการอินเทอร์เฟอเรนซ์ (Interference) ของแสงตกกระทบและแสงสะท้อนที่มีค่ามุมสะท้อนกลับเป็นพิเศษ เฉพาะ

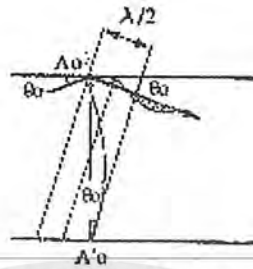


รูปที่ 2.24 แสดงโหมดการเดินทางของการเดินทางของแสง ภายในเส้นใยแสง

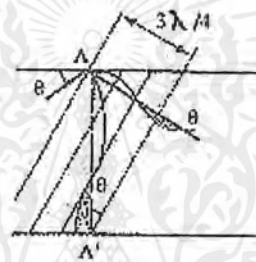
จากรูป 2.24 จะเห็นได้ว่าเป็นการแสดง อินเทอร์เฟอเรนซ์ ของแสงที่มีมุมสะท้อนกลับเป็นพิเศษ เฉพาะ ซึ่งจะทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง 180° , 360° ในทิศทางของรัศมี ลักษณะการเดินทางของแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าเป็นพิเศษเฉพาะภายในคอรั ของเส้นใยแสงนี้ เรียกว่า โหมดการเดินทางของแสง (Propagation Mode) จำนวนโหมดการเดินทางมีค่าจำกัดตามเงื่อนไขของการสะท้อนกลับหมด และนิยตตั้งชื่อ โหมดตามลำดับจาก โหมดการเดินทางที่มีค่ามุมสะท้อนกลับน้อยไปหามาก คือ โหมด 0 , โหมด 1 , โหมด 2 , ..., โหมด (N-1)

จำนวนโหมดการเดินทางของแสง

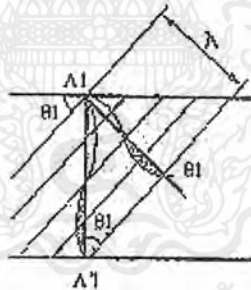
โหมดที่สูงที่สุดของ โหมดการเดินทางคือ (N-1) นั้นเป็นโหมดการเดินทางที่มีมุมสะท้อนกลับใกล้เคียงกับมุมวิกฤติ ดังนั้นถ้าหากให้จำนวนโหมดการเดินทาง N มีค่ามุมสะท้อนกลับเท่ากับมุมวิกฤติ θ_c



(a) เมื่อแสงที่มีมุมสะท้อนกลับ θ_c เคลื่อนที่ไป $\lambda/2$ เฟสของสนามเข้มาตามไฟฟ้าระหว่าง $A_0-A'_0$ จะเปลี่ยนไป 180°



(b) ไม่มีคลื่นอย่างจริงในแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง



(c) เฟสของสนามเข้มาตามไฟฟ้าในแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง เปลี่ยนแปลง 180°

รูปที่ 2.25 แสดงมุมสะท้อนกลับของแสงที่ทำให้เกิดคลื่นอยู่กับที่ในทิศทางของรัศมี

จากรูปที่ 2.25 จะได้ว่า N เป็นเลขเต็มหน่วยสูงสุดที่ทำให้

$$2a \sin \theta_c \geq N \frac{\lambda}{2}$$

โดยที่ $N = 0, 1, 2, \dots, N-1$

ในที่นี้ 2a เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์ของเส้นใยแสง และจากสมการในเรื่องการป้อนแสงในเส้นใยแสง จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sin \theta_c = \frac{\sin \theta_{\max}}{n_1} = \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}}$$

แต่เนื่องจาก

$$N \leq \frac{4a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

ดังนั้น

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n_1}$$

ถ้าเส้นใยแสงที่มีจำนวน โหมดการเดินทางของแสงจำนวนมากเรียกว่า เส้นใยแสงแบบมัลติโหมด (Multimode Optic Fiber)

และถ้าหาค่า N ออกมาได้เท่ากับ 1 หมายความว่า มีเพียง โหมดการเดินทาง 0 เท่านั้นที่สามารถเดินทางไปในเส้นใยแสงได้ เรียกเส้นใยแสงชนิดนี้ว่า เส้นใยแสงแบบซิงเกิลโหมด (Single Mode Optic Fiber)

จากสมการที่ได้ จะเห็นว่าจำนวน โหมดการเดินทาง (N) ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น (λ) ดังนั้นที่ค่าความยาวคลื่นค่าหนึ่ง N จะเป็นซิงเกิลโหมด และที่ค่าความยาวคลื่นอื่นซึ่งมีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่นนี้แล้ว N จะไม่เป็นซิงเกิลโหมด ค่าความยาวคลื่นต่ำสุดที่ทำให้ N เป็นซิงเกิลโหมดนี้ เรียกว่า ความยาวคลื่นคัทออฟ (Cut-Off Wave Length) ใช้สัญลักษณ์ λ_c และจากสมการที่ได้ สามารถเขียนได้ว่า

$$\lambda_c = 4a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

จากสมการที่ได้อันนี้ เป็นในกรณีที่สมมุติว่าเส้นใยแสงแบน แต่ในความจริงแล้วเส้นใยแสงมีลักษณะกลม ดังนั้นจึงเปลี่ยนสมการเป็น

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{2.405} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

สำหรับ λ_c นั้นถือเป็นองค์ประกอบสำคัญอันหนึ่ง ในการแสดงคุณสมบัติของเส้นใยแสงที่เป็นซิงเกิลโหมด

ชนิดของเส้นใยแสง

วิธีการแบ่งชนิดของเส้นใยแสงมีหลายวิธี เช่น แบ่งตามชนิดของสารไดอิเล็กทริกที่ใช้ แบ่งตามจำนวนโหมดการเดินทางของแสง แบ่งตามลักษณะของดัชนีการหักเหของคอร์ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงการแบ่งชนิดของเส้นใยแสง

แบ่งตามชนิดของสาร ไดอิเล็กทริกที่ใช้	Silica Glass Optic Fiber
	Multi-Component Glass Optic Fiber
	Plastic Optic Fiber
แบ่งตามจำนวนโหมดการเดินทาง ของแสง	Single Mode Optic Fiber
	Multi Mode Optic Fiber
แบ่งตามลักษณะของดัชนีการหักเห ของคอร์	Step Index Optic Fiber
	Graded-Index Optic Fiber

1. การแบ่งตามชนิดของสาร ไดอิเล็กทริกที่ใช้ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

- 1) Silica Glass Optic Fiber ใช้สาร ไดอิเล็กทริกที่เป็น Silica Glass
- 2) Multi-Component Glass Optic Fiber ใช้สาร ไดอิเล็กทริกที่เป็น แก้วหลายชนิดปนกัน
- 3) Plastic Optic Fiber ใช้สาร ไดอิเล็กทริกที่เป็นพลาสติก

สำหรับ 1) นั้นนอกจากจะใช้ Silica (SiO_2) เป็นส่วนใหญ่แล้วยังใช้สารอื่นเติมลงไปอีกเพื่อให้ค่าดัชนีการหักเหเปลี่ยนแปลงตามต้องการ สารที่เติมลงไปเรียกว่า DOPANT

สำหรับ 2) นั้นส่วนมากจะใช้ Soda Calcium , แก้ว , แก้วที่มี Boron และ Silicon ผสมอยู่ด้วย เป็นสารหลัก และยังคงเติม DOPANT ลงไปด้วยเช่นกัน

สำหรับ 3) นั้นใช้สารพวก Silicon Resin , Acryl Resin เป็นต้น

เคเบิลเส้นใยแสงที่นิยมใช้กันในการสื่อสาร โทรคมนาคมนั้นนิยมใช้ Silica Glass Optic Fiber เพราะมีข้อดี คือ มีการสูญเสียต่ำ และคุณสมบัติการส่งคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

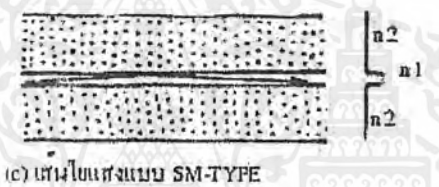
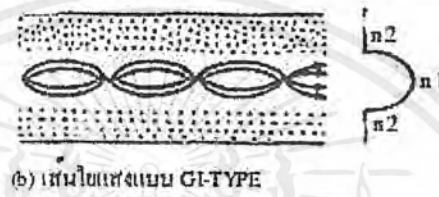
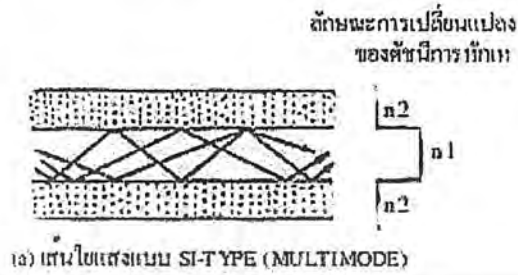
2. การแบ่งตามจำนวน โหมดการเดินทางของแสง

สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ Single Mode Optic Fiber และ Multi Mode Optic Fiber

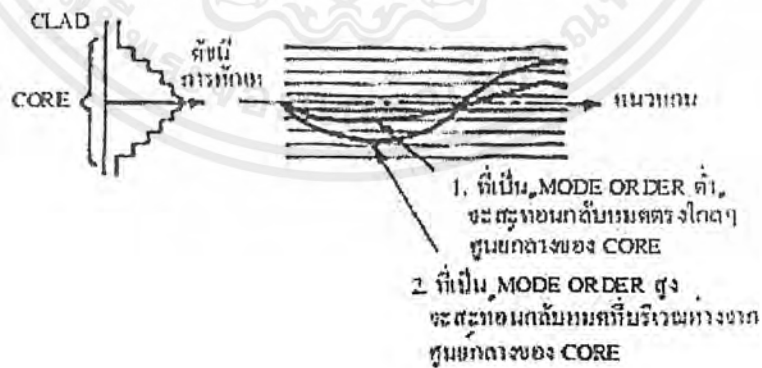
3. การแบ่งตามลักษณะของดัชนีการหักเห สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1) Step Index Optic Fiber (SI-Fiber) เป็นเส้นใยแสงที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหระหว่างคอร์กับแคลด์ เป็นลักษณะขั้นบันได (STEP) จึงเรียกว่า Step Index Optic Fiber

2) Graded Index Optic Fiber (GI-Fiber) เป็นเส้นใยแสงที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหระหว่างคอร์กับแคสிட ค่อยๆลดลงทีละน้อย จึงเรียกว่า Graded Index Optic Fiber ลักษณะการเดินทางของแสงในคอร์ ของเส้นใยแสงแต่ละชนิดแสดงดังในรูป 2.26



รูปที่ 2.26 แสดงลักษณะการเดินทางของแสงในคอร์ของเส้นใยแสงแต่ละชนิด



รูปที่ 2.27 แสดงลักษณะการเดินทางของแสงใน GI-Fiber

จากรูปที่ 2.27 จะเห็นว่า ค่าดัชนีการหักเหของ GI-Fiber นี้จะค่อยๆลดลงทีละน้อยในแนวรัศมีของเส้นใยแสง ดังนั้น ถ้าแสง(1) ที่มีโหมดค่าและเดินทางในระยะทางสั้นนั้นจะสะท้อนกลับก่อนที่จะเดินเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

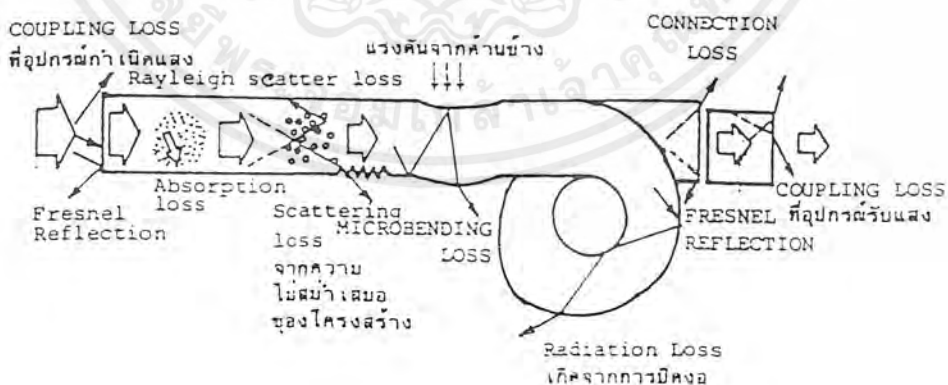
ทางไปถึงรอยต่อของคอร์กับแคสิด ซึ่งกล่าวได้ว่าส่วนใหญ่จะผ่านส่วนที่มีดัชนีการหักเหสูงของคอร์ ส่วนลำแสงที่มีโหมดสูงและเดินทางในระยะทางไกลนั้น ส่วนใหญ่จะผ่านส่วนที่มีดัชนีการหักเหต่ำของคอร์ หนึ่งความเร็วในการเดินทางของแสงนั้นจะเป็นสัดส่วนกลับกับค่าดัชนีการหักเห ดังนั้นสำหรับ โหมดการเดินทางที่ (1) และ (2) นั้น โดยการเลือกลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเห (เรียกว่า PROFILE) ให้เหมาะสมแล้วเราจะทำให้เวลาที่ใช้ในการเดินทางในระยะทางอันหนึ่งของโหมดการเดินทางที่ (1) และ (2) มีค่าเท่ากันได้ด้วยจุดประสงค์อันนี้ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีการหักเหที่เหมาะสมที่สุดเพื่อทำให้ผลต่างของเวลาการเดินทางระหว่าง โหมดการเดินทางต่างๆมีค่าน้อยที่สุดได้นั้น กล่าวกันว่าจะต้องมีรูปร่างเป็นลักษณะพาราโบลา (Parabola) ดังนั้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีการหักเหของ GI-Fiber จึงต้องทำให้มีรูปร่างดังแสดงในรูป 2.27

คุณสมบัติของเส้นใยแสง

การสูญเสียแสงในเส้นใยแสง

ในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสงนั้น มีองค์ประกอบที่สำคัญ 2 อย่างที่จะกำหนดความเร็วในการส่ง (Transmission Speed) และระยะห่างของการถ่ายทอกสัญญาณ (Repeater Span) คือ การสูญเสียแสง (Optical Loss) กับ แบนด์วิดท์ของการส่ง (Transmission Bandwidth) การสูญเสียแสงเป็นฉนวนกให้ทราบว่า ค่าดังของแสงที่เดินทางไปในเส้นใยแสงนั้นจะลดลงไปจากเดิมเท่าไร ซึ่งการสูญเสียแสงนี้ยังมีค่าน้อยเท่าไร จะทำให้สามารถส่งสัญญาณแสงได้ไกลมากยิ่งขึ้น

การสูญเสียแสง แบ่งออกตามความแตกต่างของโครงสร้างที่เกิดขึ้นได้เป็นการสูญเสียที่มีอยู่ในตัวของเส้นใยแสงเอง (Fixed Loss) และการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นมา (Addition Loss) เมื่อนำไปใช้ในระบบสื่อสาร ดังแสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 แสดงสาเหตุต่างๆที่ทำให้เกิดการสูญเสียแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าการสูญเสียที่มีอยู่ในตัวของเส้นใยแสงเองนั้น เกิดจากสาเหตุต่างๆ ได้แก่

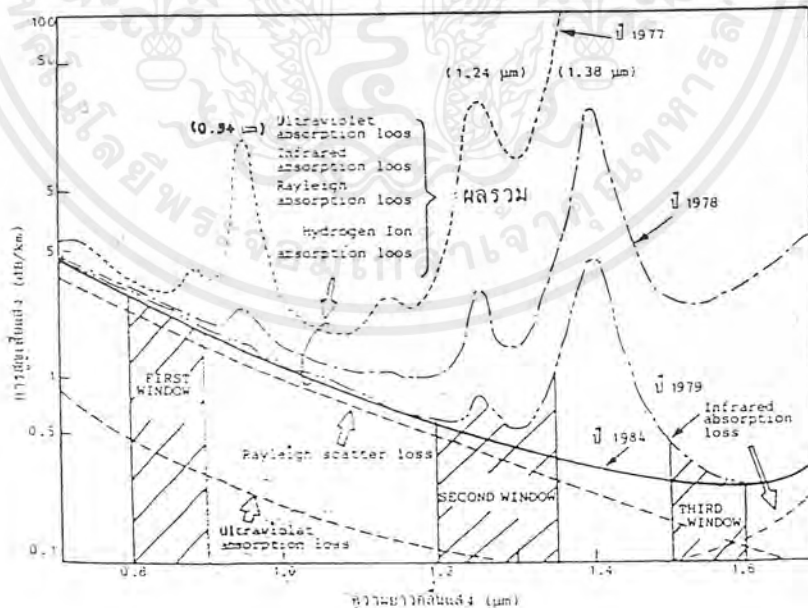
1) การสูญเสียแสงที่เกิดจากการดูดแสง (Absorption Loss)

โดยปกติแล้ว สารที่ใช้ผลิตเส้นใยแสงนั้นจะเป็นตัวดูดแสงที่เดินทางในเส้นใยแสง แล้วเปลี่ยนเป็นการสูญเสียทางความร้อนโดยทั่วไป โดยอาจเกิดจาก การดูดแสงจากสารที่ใช้ทำแก้วเอง หรือ สารที่เจือปนอยู่ในแก้ว

สำหรับการดูดแสงของแก้วเองนั้น จะดูดแสงอัลตราไวโอเล็ต ที่ความยาวคลื่นใกล้กับ 0.1 ไมโครเมตร มากที่สุด กับแสงอินฟราเรด ที่ความยาวคลื่นใกล้กับ 10 ไมโครเมตร ส่วนที่ความยาวคลื่นอื่นๆนั้น การสูญเสียจากการดูดแสงจะลดลงอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.29 จะเห็นว่า จากความยาวคลื่นประมาณ 1.0 ไมโครเมตร ไปจนถึงประมาณ 1.6 ไมโครเมตร การสูญเสียจะลดลงอย่างมาก

การสูญเสียจากการดูดแสงของสิ่งแปลกปลอมที่ปนอยู่นั้น ในยุคแรกๆของการพัฒนาเส้นใยแสงนั้น พบว่าส่วนใหญ่เป็นไอออนของโลหะต่างๆ แต่ต่อมาสามารถทำให้การสูญเสียของเส้นใยแสงลดลง โดยการกำจัดไอออนของโลหะต่างๆออกไปได้ ในปัจจุบันนี้สารเจือปนมักจะเป็นไฮดรอกซีไอออน

ค่าสูญเสียแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 0.94 ไมโครเมตร, 1.24 ไมโครเมตร และ 1.38 ไมโครเมตร นั้นเป็นการสูญเสียจากการดูดของ ไฮดรอกซี ไอออน และส่วนที่เป็นหุบเขา เรียกว่า วินโดว์ ของเส้นใยแสง บริเวณใกล้กับความยาวคลื่น 0.85 ไมโครเมตร, 1.3 ไมโครเมตร และ 1.55 ไมโครเมตร (เรียกว่าวินโดว์ที่ 1, 2, 3 ตามลำดับ) นั้นมีการสูญเสียของแสงต่ำ ซึ่งเราจะใช้ความยาวคลื่นเหล่านี้มาใช้งาน



รูปที่ 2.29 แสดงคุณสมบัติการสูญเสียแสงจากการดูดแสงของเส้นใยแสงที่ทำด้วยแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การสูญเสียแสงที่เกิดจากการกระจัดกระจายแสงแบบเรย์ลี (Rayleigh Scattering Loss)

เกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทาง ไปกระทบกับวัตถุที่มีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่นแล้วทำให้แสงนั้นกระจัดกระจายออกไปในทิศทางต่างๆ

เนื่องจากการผลิตเส้นใยแสงจะเกิดความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นของสารทำแก้ว (หรือคือความไม่สม่ำเสมอของดัชนีหักเหตัวเอง) ตกค้างอยู่ในเส้นใยแสง เป็นสาเหตุทำให้เกิดการสูญเสียแสงที่เกิดจากการกระจัดกระจายแสงแบบเรย์ลีในเส้นใยแสง ซึ่งเราจะไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ในขั้นตอนของการผลิต ถือเป็น การสูญเสียแสงที่มีอยู่ในเส้นใยแสงอยู่แล้ว ขนาดของการกระจัดกระจายแสงแบบเรย์ลี จะเป็นสัดส่วนกลับกับความยาวแสงยกกำลัง 4 ดังนั้น จากรูปที่ 2.29 ก็จะเห็นว่า ถ้าความยาวคลื่นแสงเพิ่มขึ้น การกระจัดกระจายแสงแบบเรย์ลี จะมีค่าน้อยลง

3) การสูญเสียแสงจากการกระจัดกระจายแสง อันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของ โครงสร้างในเส้นใยแสง (Ununiformity Loss)

สำหรับเส้นใยแสงที่สร้างขึ้นมาจริงๆนั้น จากสาเหตุต่างๆในการสร้างทำให้ไม่สามารถได้เส้นใยแสงที่มีลักษณะกลม 100 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้น คอร์และแคสต์ที่ประกอบกันเป็นเส้นใยแสงก็ไม่สามารถทำให้ได้ลักษณะรูปทรงกระบอกที่สม่ำเสมอกันอย่างสมบูรณ์ตลอดความยาวของเส้นใยแสงได้ คือตรงรอยต่อของคอร์กับแคสต์นั้นจะไม่สม่ำเสมอตลอด มีลักษณะขรุขระ และเมื่อรอยต่อไม่เรียบเช่นนี้ จะทำให้เกิดการกระจัดกระจายของแสง ดังแสดงในรูป 2.28 ทำให้แสงบางส่วนไม่สามารถเดินทางไปในคอร์ได้ จะกระจัดกระจายออกไปข้างนอก ดังนั้นรอยต่อที่ไม่เรียบสม่ำเสมอจะทำให้แสงที่เดินทางเกิดการสะท้อนกลับอย่างสะเปะสะปะ ทำให้เกิดการสูญเสียของแสงเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ยังมีการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นมาจากสาเหตุต่างๆดังนี้

1) การสูญเสียจากการกระจายแสงอันเนื่องมาจากการงอโค้งของเส้นใยแสง (Bending Loss)

เกิดขึ้นเมื่อเส้นใยแสงถูกทำให้งอโค้งไป สำหรับการงอโค้งเส้นใยแสงดังแสดงในรูป 2.28 แสงที่มีมุมงอโค้งมากกว่ามุมวิกฤติแล้ว แสงนั้นจะกระจายออกไปนอกคอร์ ทำให้เกิดการสูญเสียขึ้น ดังนั้นในการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสง จะต้องระมัดระวังอย่าให้เกิดมีการงอเส้นใยแสงเป็นส่วนโค้งที่มีรัศมีเกินกว่ารัศมีที่ยอมรับให้งอโค้งได้

2) การสูญเสียที่เกิดจากการงอโค้งแบบ Micro Bending (Micro Bending Loss)

เป็นการสูญเสียที่เกิดจากการที่มีแรงกดที่ไม่สม่ำเสมอมากระทำต่อด้านข้างของเส้นใยแสง ทำให้แกนของเส้นใยแสงบิดงอไปเล็กน้อย (ประมาณ 2-3 ไมโครเมตร) เป็นเหตุให้การสูญเสียเพิ่มขึ้น การสูญเสียนี้เรียกว่า การสูญเสียที่เกิดจากการงอโค้งแบบ Micro Bending ด้วยเหตุนี้ในการออกแบบโครงสร้างเส้นใยแสงจะต้องทำการป้องกันแรงกดจากทางด้านข้างด้วย

3) การสูญเสียที่เกิดจากการต่อเส้นใยแสง (Connection Loss)

การต่อเส้นใยแสง 2 เส้นเข้าด้วยกันนั้น จะต้องทำการปรับคอร์ทั้งสองให้ตรงกันพอดี ถ้าหากว่าคอร์ทั้งสองต่อกันไม่สนิทกันอย่างสมบูรณ์นั้น แสงที่ออกจากคอร์ ด้านหนึ่งบางส่วนจะไม่เข้าไปในคอร์อีกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของอีกด้านหนึ่ง แต่จะกระจายออกไปข้างนอกทำให้เกิดการสูญเสียขึ้น อีกประการหนึ่งคือ ตรงส่วนที่ทำการค่อนั้น ถ้าหากเกิดช่องว่างเพียงเล็กน้อย จะทำให้เกิดการสูญเสียจากการสะท้อนกลับ ถ้าหากช่องว่างกว้างมากขึ้น จะเกิดการสะท้อนกลับที่เรียกว่า Fresnel Reflection ขึ้น

- 4) การสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างเส้นใยแสง กับอุปกรณ์กำเนิดแสงและอุปกรณ์รับแสง (Coupling Loss)

แสงที่ถูกปล่อยออกจากอุปกรณ์กำเนิดแสงนั้น จะต้องป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยแสง โดยมีเงื่อนไขตามค่า NA แต่อุปกรณ์กำเนิดแสงนั้นจะมีความแตกต่างกัน ทางความกว้างของลำแสงที่ปล่อยออกมาจากต้นกำเนิดแสง และถึงแม้ว่าจะใช้เลนส์รวมแสงแล้วก็ตาม ก็ยังจะมีการสูญเสียของการเชื่อมต่อแสงอยู่นอกจากนั้น โครงสร้างของเส้นใยแสงที่จะถูกป้อนแสงเข้าไบนั้น ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์ของเส้นใยแสง แบบ SM และแบบ GI จะมีค่าต่างกันทำให้ขนาดของการสูญเสียของการเชื่อมต่อแสงมีค่าต่างกันไปด้วย

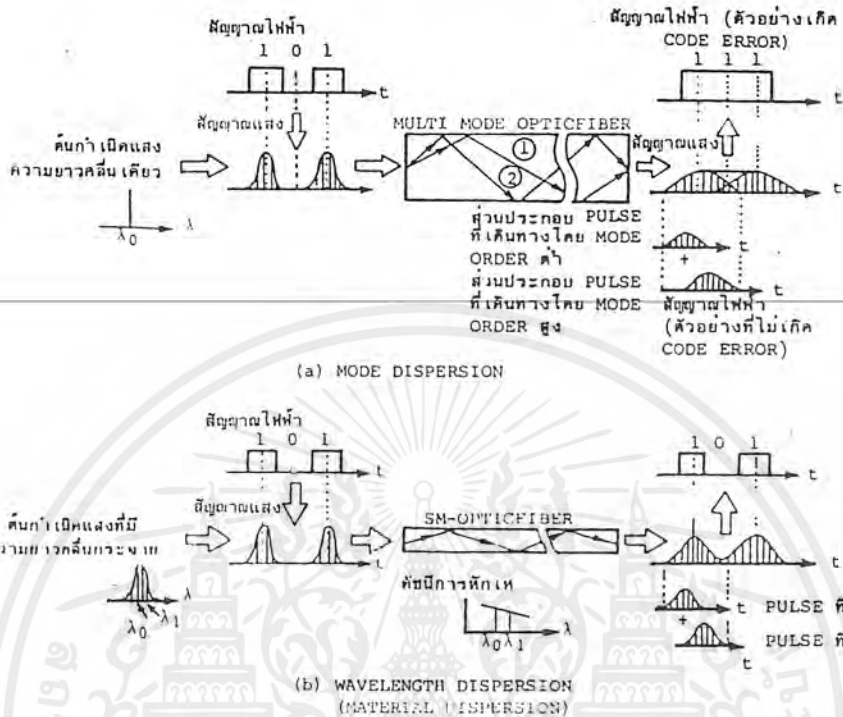
นอกจากนี้แล้ว การสูญเสียของการเชื่อมต่อแสงระหว่างเส้นใยแสงกับอุปกรณ์รับแสงนั้น เส้นใยแสงที่มีค่า NA มาก นั่นคือ แสงที่ออกจากเส้นใยแสงแบบ GI จะมีลำแสงกว้างกว่าลำแสงที่ออกจากเส้นใยแสงแบบ SM ทำให้การสูญเสียแสงมีมากกว่า

การขยายกว้างออก (Dispersion) และแบนด์วิดท์ของการส่ง (Transmission Bandwidth) ของเส้นใยแสง

- 1) การขยายกว้างออกของโหมด (Mode Dispersion)

เกิดขึ้นในเส้นใยแสงแบบมัลติโหมด เพราะความเร็วในการเดินทางของแต่ละโหมดภายในเส้นใยแสงจะต่างกัน ดังในรูปที่ 2.30 (a) จะเห็นว่า พัลส์ของแสงที่ออกมาจากปลายอีกข้างหนึ่งของเส้นใยแสง เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับพัลส์ของแสงทางด้านที่ป้อนเข้าไป จะเห็นว่าขยายออกกว้างกว่า และถึงแม้ว่าความยาวคลื่นของต้นกำเนิดแสงจะเหมือนกันก็ตาม แต่พัลส์ของแสงที่ป้อนเข้าไบนั้นจะแบ่งออกเป็นโหมดต่างๆที่มีความเร็วในการเดินทางต่างกัน ดังนั้นในการสื่อสารด้วยเส้นใยแสงจึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การขยายกว้างออกของโหมด ทำให้ไม่สามารถทำให้ระยะห่างระหว่างพัลส์เล็กลงมากๆได้

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเส้นใยแสงแบบมัลติโหมดนั้น ส่วนใหญ่การขยายกว้างออกของโหมด จะเป็นตัวกำหนดแบนด์วิดท์ ด้วยเหตุนี้ในระบบการส่งข่าวสารจำนวนมากที่ต้องการคุณสมบัติแบนด์วิดท์กว้าง นั้น จะใช้เส้นใยแสงแบบซิงเกิลโหมดที่ไม่มี การขยายกว้างออกของโหมด โดยการทำให้มีโหมดเดียว



รูปที่ 2.30 แสดงการเกิดการขยายกว้างออกในเส้นใยแสง

2) การขยายกว้างออกของความยาวคลื่น (Wavelength Dispersion)

ในตัวกลางเดียวกัน แต่ถ้าหากความยาวคลื่นต่างกันแล้วค่าดัชนีการหักเหจะต่างกัน เป็นผลให้ความเร็วในการเดินทางต่างกันตามค่าความยาวคลื่นที่ต่างกัน การขยายกว้างออกของความยาวคลื่นนี้เป็นสาเหตุให้แบนด์วิดท์ถูกจำกัดค่าความกว้าง เช่นเดียวกันกับกรณีของการขยายกว้างออกของโหมด แต่สาเหตุนี้เรียกว่า การขยายกว้างออกของวัสดุ (Material Dispersion)

นอกจากนี้กรณีที่ว่าผลต่างของดัชนีการหักเหของคอร์กับแคลด์มีค่าน้อยนั้น ปรากฏการณ์การสะท้อนกลับหมดของแสงที่รอยต่อของคอร์กับแคลด์จะไม่เหมือนกับที่เกิดในกระจกเงา กล่าวคือ ส่วนหนึ่งของแสงจะทะลุเข้าไปในแคลด์ก่อนแล้วจึงสะท้อนกลับหมด และขนาดการทะลุเข้าไปนี้จะแตกต่างกันออกไปตามความยาวคลื่น เป็นผลให้ระยะทางการเดินทางของแสงนี้ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น การขยายกว้างออกของระยะทางการเดินทางของแสงนี้เรียกว่า การขยายกว้างออกของโครงสร้าง (Structure Dispersion) ในการสื่อสารด้วยเส้นใยแสงนั้นการเกิดการขยายกว้างออกของวัสดุและการขยายกว้างออกของโครงสร้าง รวมแล้วเรียกว่า การขยายกว้างออกของความยาวคลื่น

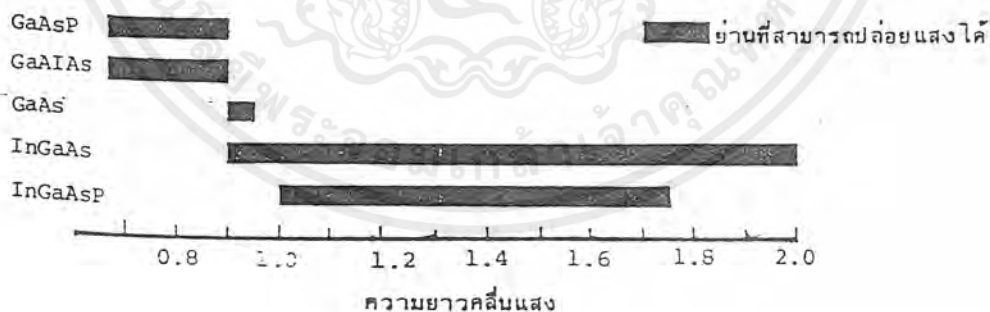
โดยส่วนมากแล้วการขยายกว้างออกของโหมคจะเป็นตัวกำหนดแบนด์วิดท์ของการส่ง ในเส้นใยแสงแบบมัลติโหมค และการขยายกว้างออกของความยาวคลื่นนั้นก็จะมีผลกระทบต่ออย่างมากกับแบนด์วิดท์ของการส่งในเส้นใยแสงแบบซิงเกิลโหมค

2.6 อุปกรณ์แสง

สารที่ใช้ในการสร้างและโครงสร้างของอุปกรณ์ปล่อยแสง

สารที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ปล่อยแสง

การปล่อยแสงเกิดจากการที่อิเล็กตรอนถ่ายเท (Transfer) จากคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) ไปยัง วาเลนซ์แบนด์ (Valence Band) ดังนั้นสารกึ่งตัวนำจึงถูกแบ่งออกเป็น พวกที่สามารถถ่ายเทอิเล็กตรอนได้ง่ายกับพวกที่ถ่ายเทอิเล็กตรอนได้ยาก พวกที่ถ่ายเทได้ง่ายเรียกว่า DIRECT TRANSFER SEMICONDUCTOR ส่วนพวกที่ถ่ายเทได้ยากเรียกว่า INDIRECT TRANSFER SEMICONDUCTOR และตัวอย่างของสารพวก DIRECT TRANSFER SEMICONDUCTOR ได้แก่ พวกสารประกอบของ Indium (In), Gallium (Ga), Arsenide (As), และฟอสฟอรัส (P) เป็นต้น ส่วนสารพวก Silicon (Si), Germanium (Ge) นั้นเป็น INDIRECT TRANSFER SEMICONDUCTOR ปล่อยแสงออกมาจาก เนื่องจากความยาวคลื่นแสงที่ปล่อยออกมานั้น เป็นสัดส่วนกับผลต่างระหว่างพลังงานของคอนดักชันแบนด์กับวาเลนซ์แบนด์ แต่ว่าผลต่างนี้จะมีค่าแตกต่างกันตามส่วนประกอบสารกึ่งตัวนำ จึงทำให้มีความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆ ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับสารประกอบของอุปกรณ์ปล่อยแสง แสดงดังรูป 2.31 และจากการพิจารณาถึงคุณสมบัติต่างๆของสารในทางปฏิบัติ นั้น สำหรับย่านความยาวคลื่นสั้น 0.85 ไมโครเมตร นิยมใช้ GaAlAs และย่านความยาวคลื่น 1.3 ไมโครเมตร นิยมใช้ InGaAsP

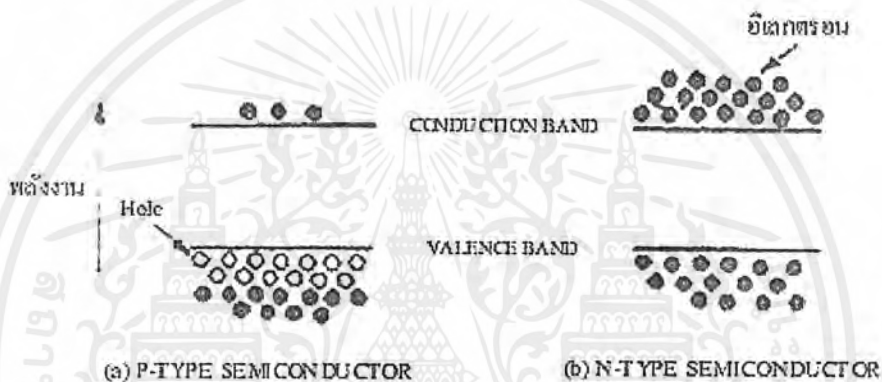


รูปที่ 2.31 แสดงความยาวคลื่นแสงที่ปล่อยออกมาของสารประกอบกึ่งตัวนำแต่ละชนิด

โครงสร้างของอุปกรณ์เปลวแสง

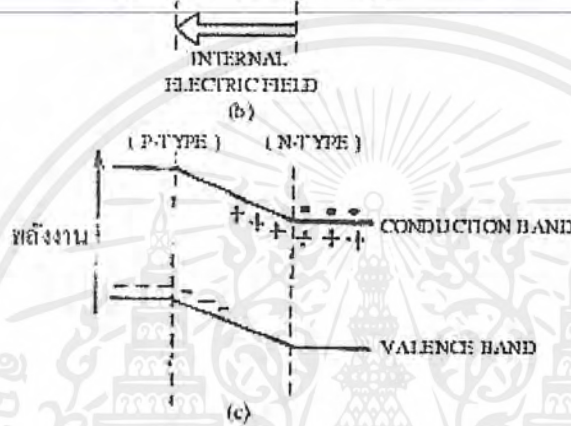
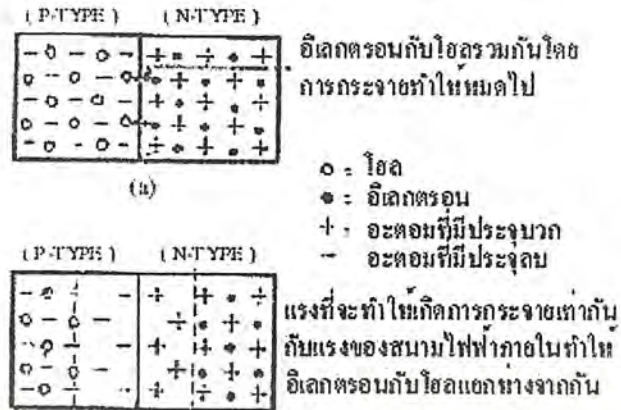
1) รอยต่อ P-N

สำหรับสารกึ่งตัวนำนั้น ปกติจำนวนของอิเล็กตรอน (หรือจำนวนโฮล) ที่มีอยู่นั้นจะมีค่าคงที่ตามชนิดของอะตอม และอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะรวมตัวกันอยู่ในวาเลนซ์แบนด์ สารกึ่งตัวนำที่มีสภาพอย่างนี้เรียกว่า GENUINE SEMICONDUCTOR แต่สารที่เรียกว่า สารกึ่งตัวนำแบบ P-type นั้นมีสภาพที่มีจำนวนโฮล (อนุภาคที่มีประจุบวกในตัว) มาก และมีอิเล็กตรอน (มีประจุลบ) น้อย ดังแสดงในรูป 2.32 (a) ส่วนสารที่เรียกว่า สารกึ่งตัวนำแบบ N-type นั้นจะมีสภาพตรงข้ามกับสารกึ่งตัวนำแบบ P-type และจำนวนอิเล็กตรอนที่มากมายนี้จะรวมตัวกันอยู่ใน คอนดักชันแบนด์ ดังแสดงในรูป 2.32 (b)



รูปที่ 2.32 แสดงระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำแบบ P-type และ N-type

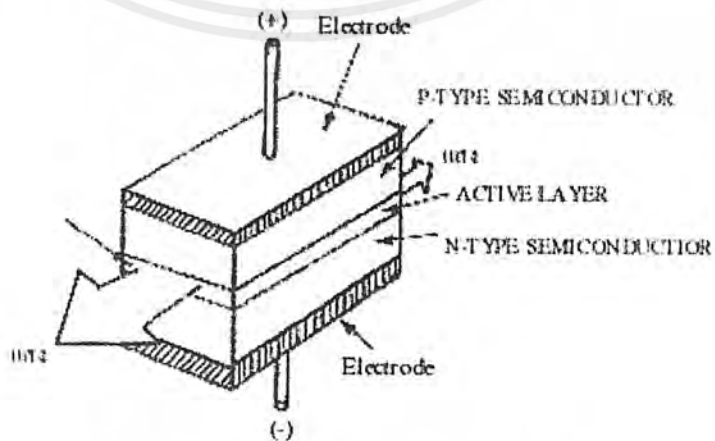
ถ้าเรานำสารกึ่งตัวนำทั้งสองแบบมาเชื่อมต่อกัน และบริเวณที่เชื่อมต่อกันนั้นอิเล็กตรอนที่มีจำนวนมากใน N-type จะรวมตัวกับโฮลที่มีจำนวนมากใน P-type ดังรูปที่ 2.33 (a) และจากปริมาณการรวมตัวที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆนั้น ทำให้เกิดประจุไฟฟ้าลบใน P-type (เพราะโฮลลดลงเหลือแต่อิเล็กตรอน) และเกิดประจุไฟฟ้าบวกขึ้นใน N-type (เพราะอิเล็กตรอนลดลงเหลือแต่โฮล) ดังรูป 2.33 (b) จากผลอันนี้ทำให้เกิดสภาพ ดิพลชัน โซน (Depletion Zone) ขึ้นตรงบริเวณใกล้ๆรอยเชื่อมต่อกัน และได้โครงสร้างของระดับพลังงานดังรูป 2.33 (c) เกี่ยวกับโครงสร้างของระดับพลังงานนี้มีความหมายสำคัญอย่างมากในการนำไปใช้พิจารณาโครงสร้างของอุปกรณ์เปลวแสง



รูปที่ 2.33 แสดงสนามไฟฟ้าภายในและระดับพลังงานของ รอยต่อ P-N

2) โครงสร้างของเลเซอร์ไดโอด

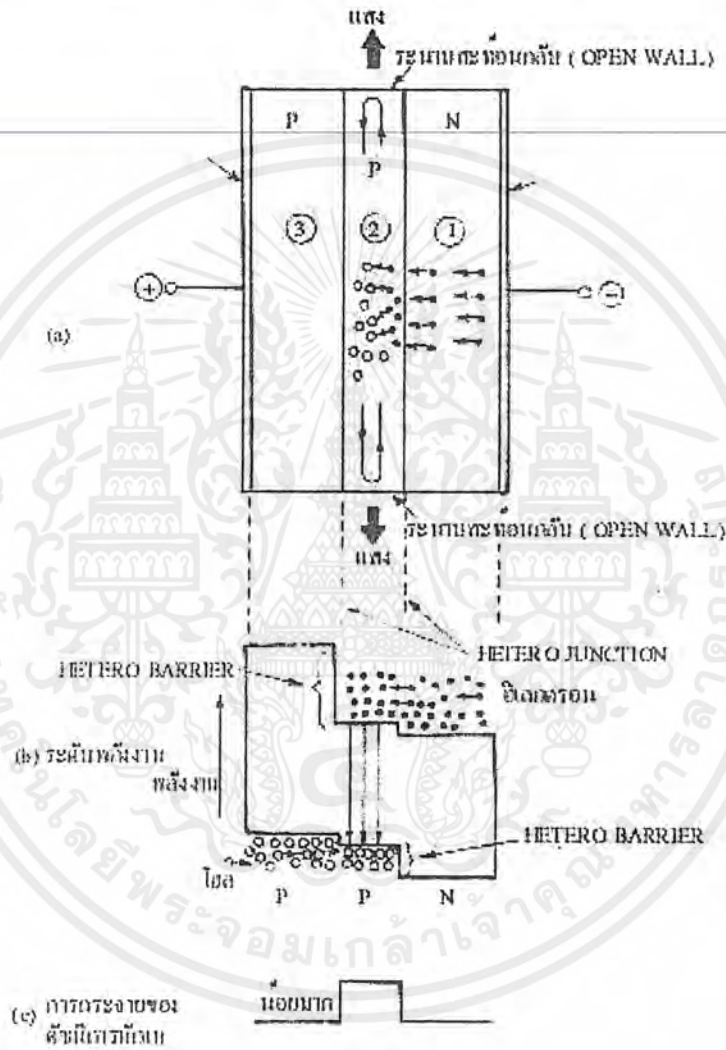
โดยทั่วไปแล้วเลเซอร์ไดโอดจะมีโครงสร้าง 3 ชั้น (Three Layer) ดังแสดงในรูป 2.34 ในการทำให้เกิดเลเซอร์ออสซิลเลชัน (LASER Oscillation) นั้น คือส่วนที่ทำหน้าที่เป็นรีโซเนเตอร์ (Resonator) ซึ่งเรียกว่า ชั้นแอคทีฟ (Active Layer) ซึ่งมีตำแหน่งอยู่ระหว่าง สารกึ่งตัวนำ P-type กับ N-type



รูปที่ 2.34 แสดง โครงสร้างทั่วไปของเลเซอร์ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป ถ้าทำให้กระแสไหลจากขั้วบวกไปยังขั้วลบจะเกิดแสงเลเซอร์ออกมาในทิศทางที่แสดง ด้วยหลักการเกี่ยวกับวิธีการเกิดออสซิลเลชันของเลเซอร์ไดโอดนั้น อธิบายโดยเน้นตรงบริเวณชั้นทั้ง 3 ของ P-type , N-type และชั้นแอกทีฟนี้ สำหรับโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำอย่างนี้เรียกว่า DOUBLE HETERO JUNCTION ซึ่งหมายความว่า รอยต่อของชั้นของสารกึ่งตัวนำประกอบต่างกัันนั้นมี 2 ด้าน โครงสร้าง , ระดับพลังงาน และลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีการหักเหของเลเซอร์ไดโอด แสดงดังรูป 2.35



รูปที่ 2.35 แสดง โครงสร้าง,ระดับพลังงาน และลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีการหักเหของเลเซอร์ไดโอด

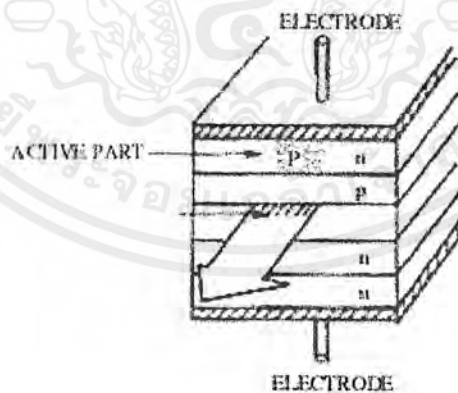
ในการทำให้เกิดเลเซอร์ออสซิลเลชันนั้นจะต้องทำให้ผลต่างระหว่างระดับพลังงานของคอนดักชันแบนด์ ของ สารกึ่งตัวนำแบบ P-type และคอนดักชันแบนด์ของชั้นแอกทีฟ มีค่ามาก พร้อมทั้งทำให้ผลต่างระหว่างพลังงานของคอนดักชันแบนด์กับวาเลนซ์แบนด์ ของสารกึ่งตัวนำแบบ P-type มีค่ามากด้วย นอกจากนี้ยังจะต้องทำให้ระดับพลังงานของวาเลนซ์แบนด์ของสารกึ่งตัวนำแบบ N-type มีค่าต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับพลังงานของวาเลนซ์แบนด์ของชั้นแอกทีฟด้วย จากนั้นจึงนำมาเชื่อมต่อกันจะได้ระดับพลังงาน ดังแสดงในรูป 2.35(b) เมื่อทำให้มีกระแสไหลในสารกึ่งตัวนำที่มีการเชื่อมต่อกันในลักษณะที่กล่าวมาแล้ว โดยให้มีทิศทางไหลจาก P-type ไปหา N-type จะเป็นผลให้อิเล็กตรอนส่วนเกินที่มีอยู่ใน N-type เคลื่อนที่ไปยัง P-type และโฮลส่วนเกินที่มีอยู่ใน P-type เคลื่อนที่ไปยัง N-type ผลของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลเหล่านี้ ทำให้เกิดมีอิเล็กตรอนและโฮลอยู่ในชั้นแอกทีฟ (โดยทั่วไปชั้นแอกทีฟจะใช้สาร P-type) เมื่อสังเกตระดับพลังงานของชั้นทั้ง 3 ที่อยู่ในรูป 2.35(b) จะเห็นว่าเกิดมีกำแพงของพลังงาน เรียกว่า HETERO BARRIER ขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนและโฮลที่เคลื่อนที่ไปนั้น ถูกขังอยู่ในชั้นแอกทีฟ เป็นผลให้เกิดสภาพ INVERSION DISTRIBUTION ได้อย่างดีทำให้มีผลการขยายความเข้มของการปล่อยแสง

อนึ่งโดยการทำให้ดัชนีการหักเหของชั้นแอกทีฟมีค่ามากกว่าชั้นข้างเคียง ดังแสดงในรูป 2.35(c) จะมีสภาพเหมือนกับเส้นใยแสง แสงที่ปล่อยออกมาจะถูกกักและเดินทางอยู่ในชั้นแอกทีฟ จากผลการกักอิเล็กตรอนและโฮลเอาไว้ในชั้นแอกทีฟ และผลการกักแสงเอาไว้ในชั้นแอกทีฟ ทำให้ได้การปล่อยแสงที่มีประสิทธิภาพดีได้

แสงจะออกมาจากระนาบสะท้อนกลับ โดยที่ระนาบสะท้อนกลับนี้ทำจากการใช้สิ่งที่มีคมมาก ๆ คล้ายใบมีดโกน ไปตัดสารกึ่งตัวนำที่ประกอบกันเป็นเลเซอร์ไดโอด ให้มีช่องเปิด เรียกว่า OPEN WALL โดยการทำเช่นนี้แสงเลเซอร์จะถูกกักขังอยู่ในชั้นแอกทีฟได้ดี แต่ถ้ามันเดินทางมาถึง OPEN WALL มันจะหลุดออกมาข้างนอกตลอดแนวของ OPEN WALL นี้ ทำให้ประสิทธิภาพของการเชื่อมแสงเข้ากับเส้นใยแสงไม่ดีด้วยเหตุนี้ เพื่อเป็นการทำให้ประสิทธิภาพดี จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงต่างๆ เพื่อให้มีปฏิกิริยานำคลื่นแสงในทิศทางแนวนอน (Horizontal) ด้วยตัวอย่างอันหนึ่งของวิธีการปรับปรุงก็คือ สิ่งที่เราเรียกว่า โครงสร้างแบบ Planar Stripe ดังแสดงในรูป 2.36

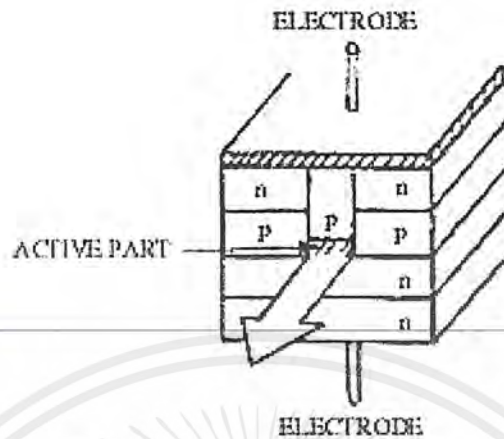


รูปที่ 2.36 แสดง โครงสร้างแบบ Planar Stripe

เพื่อให้ เลเซอร์ไดโอดสามารถผลิตได้ง่ายขึ้น จะทำให้มีโครงสร้างเป็น 5 ชั้น และทำให้บริเวณที่กระแสไหลมีขนาดแคบ ส่วนเลเซอร์ออสซิลเลชันเป็นการใช้หลักการที่ทำให้ออสซิลเลชันเกิดขึ้นเฉพาะตรงส่วนที่กระแสไหล นั่นคือ ตรงส่วนที่มีการกระตุ้น (Stimulation) เท่านั้น นอกจากนี้ยังมีโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบอื่นๆที่มีคุณสมบัติดีกว่าแบบ Planar Stripe และนิยมใช้กันมากคือ แบบ Embedding Stripe ดังแสดงในรูป 2.37

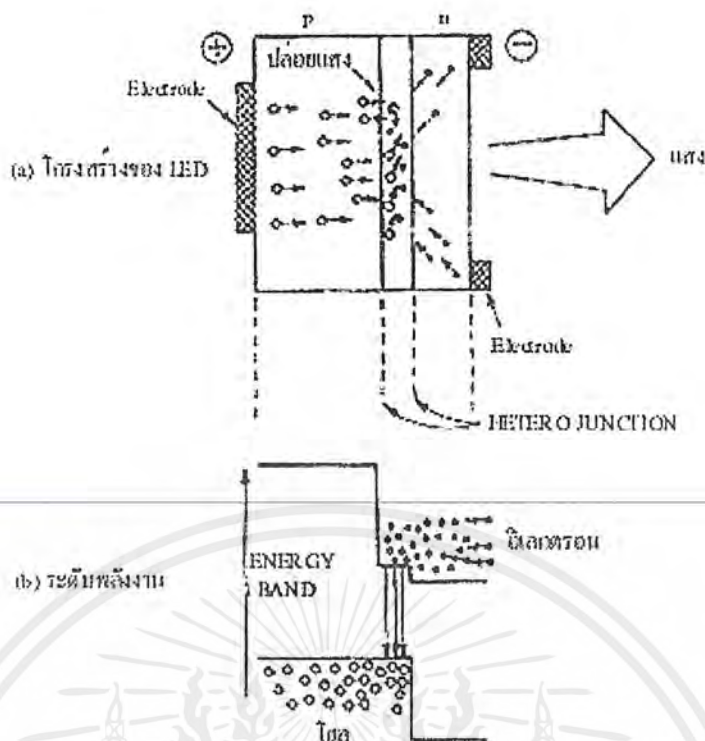


รูปที่ 2.37 แสดง โครงสร้างแบบ Embedding Stripe

โครงสร้างนี้มีลักษณะพิเศษตรงที่ ทำให้ค่าดัชนีหักเหของชั้นแอกทีฟมีค่าสูง ทั้งส่วนบน , ด้าน , ซ้าย , ขวา นั่นคือส่วนบนของชั้นแอกทีฟมีชั้นของ P-type อยู่ ซึ่งจะเหมือนกับแบบ Planar Stripe และ กระแสจะไหลเฉพาะส่วนนี้เท่านั้นจากข้างบนไปข้างล่าง นอกจากจะสามารถทำให้เกิดเลเซอร์ออสซิลเลชันด้วยกระแสที่มีค่าน้อยแล้ว ยังทำให้ค่าดัชนีหักเหของชั้นแอกทีฟมีค่าสูงมากขึ้นอีก จึงเป็นผลให้ประสิทธิภาพของการกักแสงเพิ่มขึ้น สามารถ ได้แสงที่ปล่อยออกมาเป็นลำแสงที่คมมาก

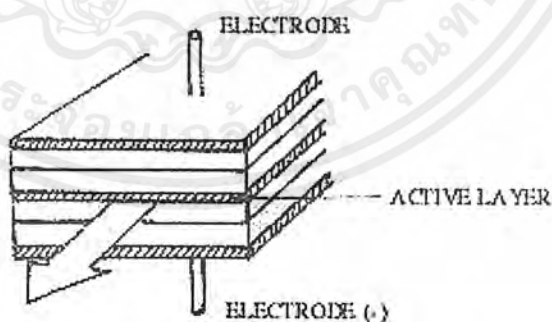
3) โครงสร้างของ LED

โครงสร้างพื้นฐานของ LED เหมือนกันกับของ เลเซอร์ไดโอด คือเป็น DOUBLE HETERO JUNCTION อิเล็กตรอนที่ไหลผ่าน รอยต่อ P-N จะไปรวมกับ โฮลภายในชั้นแอกทีฟเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูป 2.38 และจะเกิดการปล่อยแสงขึ้นภายในชั้นแอกทีฟ เนื่องจากถูกกักด้วยกำแพงของ HETERO JUNCTION แต่สำหรับกรณีของ LED นั้น โครงสร้างของมันไม่มีการขยาย ออสซิลเลชันของแสงเหมือนอย่างเลเซอร์ไดโอด เพราะไม่มีระนาบสะท้อนแสง แสงที่ปล่อยออกมาตรงส่วนที่อยู่ห่างจากด้านข้างนั้น จึงออกจากด้านข้างได้ยาก ด้วยเหตุนี้ LED ทั่วไปจึงให้แสงปล่อยออกมาข้างนอกจากด้านหน้าที่อยู่กับขั้วไฟฟ้า ดังรูป 2.38 (a)



รูปที่ 2.38 แสดง โครงสร้างและระดับพลังงานของ LED

นอกจากนี้ในปัจจุบันได้มีการผลิต LED อีกแบบหนึ่งขึ้นมา โดยการทำให้ค่าดัชนีการหักเหของชั้นแอลทีพีมีค่าสูง และทำให้เกิดปฏิกิริยาการนำแสงขึ้นในชั้นแอลทีพี และให้แสงปล่อยออกมาจากทางด้านข้างของชั้นแอลทีพี เหมือนกันกับเลเซอร์ไดโอด ดังแสดงในรูป 2.39 ออกทางด้านข้าง



รูปที่ 2.39 แสดง ไดโอดแบบปล่อยแสงออกทางด้านข้าง

LED แบบนี้เรียกว่า LED แบบปล่อยแสงออกทางด้านข้าง (Side Emission Type LED) และเมื่อเปรียบเทียบกับแบบปล่อยแสงออกทางด้านหน้าแล้วปรากฏว่า โดยการให้กระแสไหลผ่านเท่านั้น จะได้แสงออกมามีกำลังน้อยกว่าแบบปล่อยแสงออกทางด้านหน้า แต่เนื่องจากบริเวณการปล่อยแสงมีขนาดแคบมากกว่า จึงมีข้อดีที่ว่า มีประสิทธิภาพการเชื่อมแสงกับเส้นใยแสงสูงกว่า

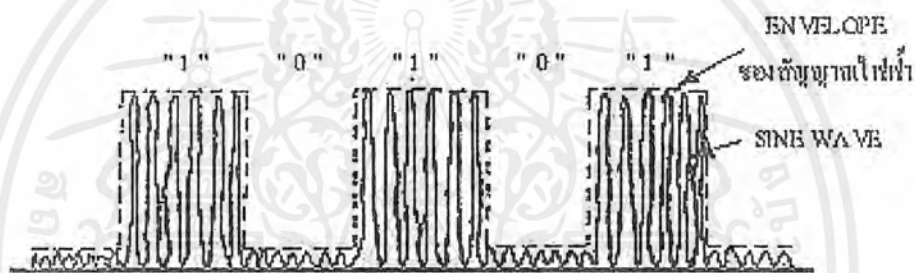
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติต่างๆของอุปกรณ์ปล่อยแสง

คุณสมบัติต่างๆที่ต้องการจากอุปกรณ์ปล่อยแสง ได้แก่

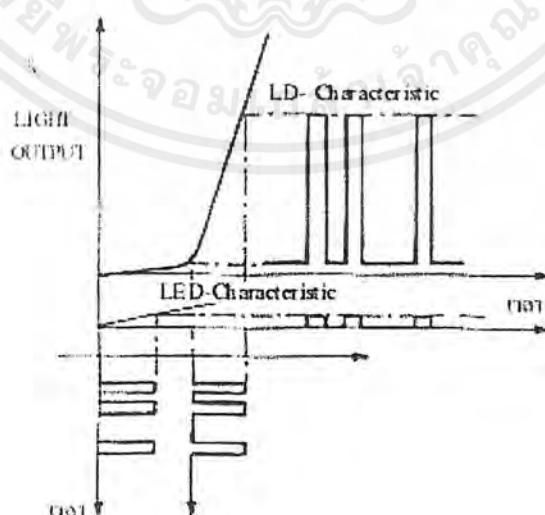
- คุณสมบัติการผสมของแสงกับไฟฟ้า (นั่นคือ กำลังงานเอาท์พุทของแสง , ความเป็นเส้นตรง หรือ Linearity)
- ความกว้างของสเปกตรัมของแสง
- ความเร็วในการตอบสนองต่อความถี่ (Frequency Response Speed) เป็นต้น

แสงที่ได้จากอุปกรณ์แสงจะมีความยาวแสงจำนวนหนึ่งปะปนอยู่ ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้แสงเป็นคลื่นพาห์สำหรับการมอดูเลททางความถี่และทางเฟสได้ แต่จะใช้สำหรับการผสมที่เรียกว่า การมอดูเลททางความเข้มของสัญญาณ (Intensity Modulation) ซึ่งทำการผสมโดยตรงกับความเข้มของแสง อย่างเช่นกรณีของสัญญาณดิจิทัล แสงจะกระพริบสว่าง หรือดับตามสัญญาณไฟฟ้าที่เป็น 1 หรือ 0 ภายในแอนวีโลป (Envelope) หนึ่งของสัญญาณจะมีแสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ข้างใน ดังแสดงในรูป 2.40



รูปที่ 2.40 แสดงรูปคลื่นเอาท์พุทของแสงและการผสมในการส่งสัญญาณดิจิทัล

ส่วนคุณสมบัติการผสมของอุปกรณ์ปล่อยแสงแสดงดังรูป 2.41



รูปที่ 2.41 แสดงการผสมแบบ Light Intensity Modulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.41 จะเห็นว่าเนื่องจาก LED ใช้ปรากฏการณ์การปล่อยแสงตามธรรมชาติ ดังนั้นปริมาณของแสงที่ปล่อยออกมา จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่ป้อนเข้าไปกระตุ้น แต่สำหรับ เลเซอร์ไดโอดนั้น ให้ปฏิกิริยาการออสซิลเลชัน (Oscillation) โดยมีการกระตุ้นให้ปล่อยแสง (Stimulated Emission) ออกมา ดังนั้นปริมาณของแสงที่ปล่อยออกมานั้นจะมีลักษณะที่มีการเพิ่มปริมาณขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเลยค่าของกระแสค่าหนึ่ง (Threshold Value Current) ไปแล้ว ดังในรูปที่ 2.41

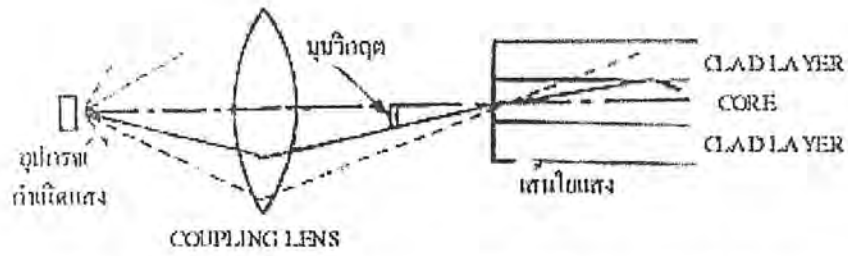
ในตารางที่ 2.2 แสดงถึงตัวอย่างคุณสมบัติต่างๆของ LED และเลเซอร์ไดโอด จากการพิจารณาคุณสมบัติต่างๆในตารางนี้จะเห็นว่าเกี่ยวกับกำลังงานเอาต์พุทของแสงนั้น เลเซอร์ไดโอดจะมีค่ามากกว่า เพราะมีการออสซิลเลชันและการขยายของแสง และเกี่ยวกับกำลังงานอินพุทที่ป้อนเข้าไปในเส้นใยแสงก็เช่นกัน เนื่องจากเลเซอร์ไดโอดมีคุณสมบัติของทิศทางของแสง (Directivity) ดีกว่า เป็นผลให้มีการสูญเสียการเชื่อมแสงกับเส้นใยแสงต่ำ ทำให้กำลังงานของแสงป้อนเข้าไปในเส้นใยแสงได้มาก

ตาราง 2.3 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆของอุปกรณ์ปล่อยแสง

	LED	LD
กำลังงานเอาต์พุทของแสง	2.5 มิลลิวัตต์	10 มิลลิวัตต์
กำลังงานอินพุทของแสงในเส้นใยแสง	<input type="checkbox"/> 0.05 มิลลิวัตต์	<input type="checkbox"/> 3 มิลลิวัตต์
ความกว้างของสเปกตรัมที่จุดกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (คอนมอดูเลท)	100 นาโนเมตร	3 นาโนเมตร
ความเร็วในการตอบสนองทางความถี่	<input type="checkbox"/> หลายร้อยเมกะเฮิรตซ์	<input type="checkbox"/> หลายจิกะเฮิรตซ์
อายุการใช้งาน	<input type="checkbox"/> 10^6 ชั่วโมง	<input type="checkbox"/> 10^6 ชั่วโมง

การเชื่อมอุปกรณ์ปล่อยแสงกับเส้นใยแสง

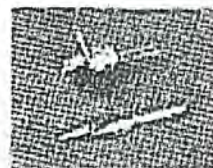
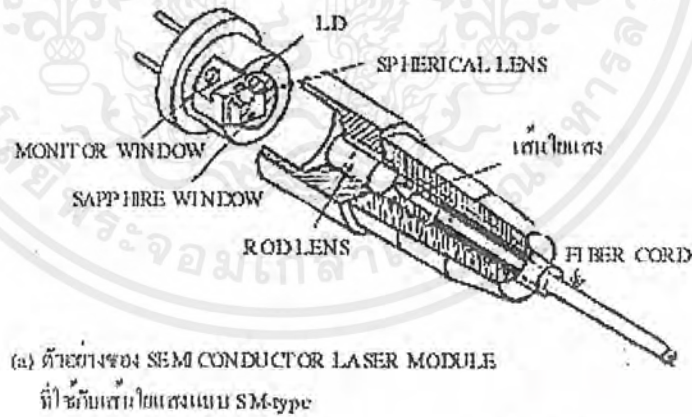
โดยทั่วไปแล้วแสงที่ปล่อยออกจากอุปกรณ์ปล่อยแสง จะกว้างออก เนื่องด้วยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของแสง (Diffraction) การป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยแสงที่มีขนาดเล็กประมาณ 10 ไมโครเมตร ถึงหลายสิบลไมโครเมตร จึงเป็นการยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการใช้วิธีการต่างๆ เช่น การใช้เลนส์มาทำการบีบลำแสงให้เล็กลงในการเชื่อมแสงระหว่างอุปกรณ์ปล่อยแสงกับเส้นใยแสง ดังแสดงในรูป 2.42



รูปที่ 2.42 แสดงการเชื่อมแสงระหว่างอุปกรณ์ปล่อยแสงกับเส้นใยแสง

ในการป้อนแสงเข้าไปในคอร์ของเส้นใยแสงนั้น จำเป็นต้องปล่อยแสงเข้าไปด้วยค่าของมุมตกกระทบที่อยู่ในช่วงที่ต่ำกว่า มุมรับแสงสูงสุดของเส้นใยแสง ถ้าหากว่าป้อนแสงเข้าไปด้วยมุมตกกระทบที่มีค่ามากกว่ามุมรับแสงสูงสุดของเส้นใยแสง ดังแสดงในรูป 2.42 จะเห็นว่าแสงที่ป้อนเข้าไปนี้จะทะลุออกไปยังแคสค์หมด ด้วยเหตุนี้จึงต้องใช้เลนส์นำไปวางใกล้ๆ อุปกรณ์ปล่อยแสงเพื่อบีบแสงให้แคบลง ในทางตรงกันข้ามถ้าหากวางตำแหน่งของเลนส์ใกล้กับอุปกรณ์ปล่อยแสงมากเกินไป จะทำให้ลำแสงถูกขยายกว้างมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์ของเส้นใยแสง ทำให้ประสิทธิภาพการเชื่อมแสงต่ำลงไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับแต่งเลนส์ที่ใช้และปรับแต่งตำแหน่งของเลนส์ ระหว่างอุปกรณ์ปล่อยแสงกับเส้นใยแสงให้เหมาะสมถูกต้องซึ่งเป็นการปรับที่ละเอียดมาก

ตัวอย่างของ โครงสร้างของ โมดูลเลเซอร์ไดโอดที่เชื่อมต่อแสงกับเส้นใยแสงแบบเชิงเกิด โหมด และตัวอย่างด้านนอกของ โมดูลเลเซอร์ไดโอด , โมดูล LED แสดงดังรูป 2.43 และเพื่อให้ประสิทธิภาพการบีบแสงเข้าไปในเส้นใยแสงดีขึ้น นิยมใช้เลนส์ 2 ลักษณะ คือ เลนส์ทรงกลมและทรงกระบอก



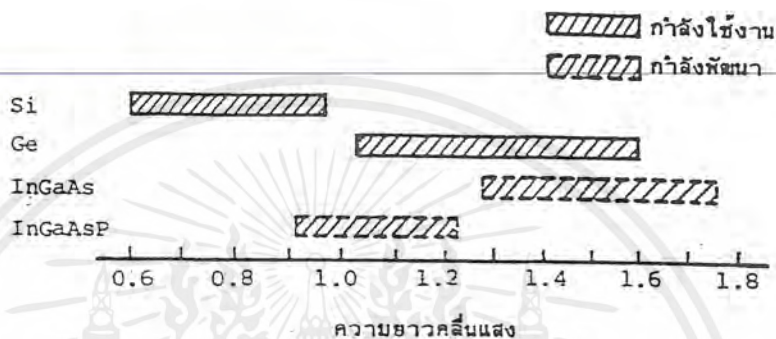
(b) ตัวอย่างแสดงลักษณะภายนอกของ LD และ LED

รูปที่ 2.43 แสดงตัวอย่าง โมดูลเลเซอร์ไดโอด และ โมดูล LED

สารและโครงสร้างของอุปกรณ์รับแสง

สารของอุปกรณ์รับแสง

สารที่ใช้สำหรับอุปกรณ์รับแสงมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน นอกจากนั้นผลต่างของพลังงานของคอนดักเตอร์แบนด์และวาเลนซ์แบนด์ ของอุปกรณ์รับแสงมีค่าแตกต่างกัน ทำให้มีย่านความยาวคลื่นต่างกันที่ดูดสัญญาณแสงที่เข้ามาได้ง่าย หรือมีความไวในการรับแสงดี คุณสมบัติและความไวในการรับแสงของสารแต่ละชนิดแสดงดังรูป 2.44



รูปที่ 2.44 แสดงความยาวคลื่นในการรับแสงของอุปกรณ์รับแสงแต่ละชนิด

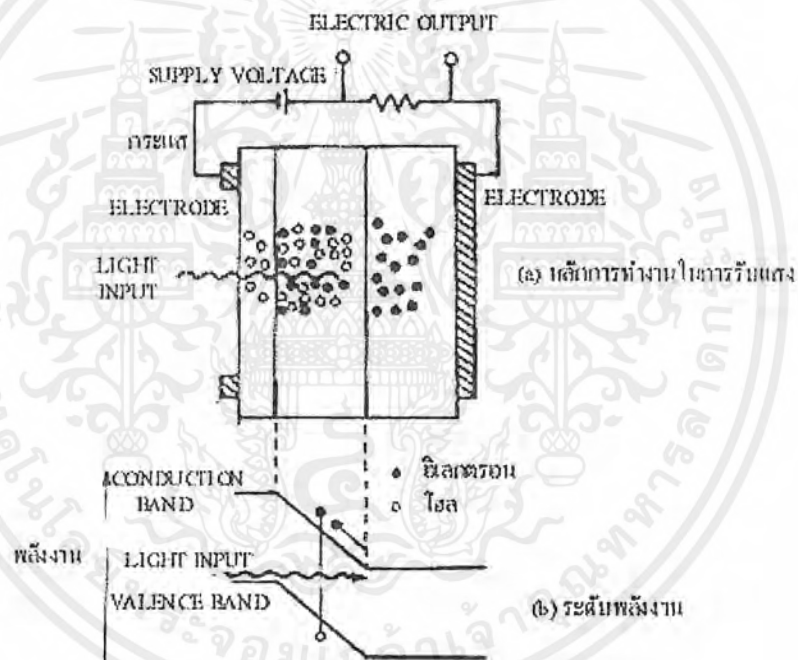
ในการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสงนั้น จะต้องเลือกอุปกรณ์รับแสงที่เหมาะสมกับความยาวคลื่นที่ใช้เช่นเดียวกับอุปกรณ์กำเนิดแสง สำหรับย่านความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 1 ไมโครเมตร จะใช้ซิลิกอน (Silicon) สำหรับย่านความยาวคลื่นจาก 1-1.7 ไมโครเมตร ใช้เจอร์เมเนียม (Germanium) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนั้นในปัจจุบันสำหรับความยาวคลื่นในช่วง 1.55 ไมโครเมตร เป็นความยาวคลื่นที่มีการสูญเสียในเส้นใยแสงน้อยมาก และเป็นความยาวคลื่นที่อยู่ในวินโดวที่ 3 การใช้งานอุปกรณ์รับแสงชนิดใหม่ที่ทำจากสารที่เป็นสารประกอบของสารกึ่งตัวนำ InGaAs และอื่นๆ ซึ่งมีความไวในการรับแสงดีมากนั้น กำลังได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

โครงสร้างของอุปกรณ์รับแสง

อุปกรณ์รับแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำนี้แบ่งออกเป็นพวกใหญ่ๆ ได้ 2 พวก ตามปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้จากภายนอก คือ

- โฟโอดีไดโอด (Photo Diode : PD) เป็นพวกที่ได้รับการป้อนแรงดันไฟฟ้าปริมาณน้อย
- อวาลานซ์โฟโอดีไดโอด (Avalanche Photo Diode : APD) ได้รับการป้อนแรงดันไฟฟ้าปริมาณมาก

ตัวอย่างของ PD คือ PIN-PD ดังแสดงในรูปที่ 2.45 PIN หมายถึงว่าในระหว่างสารกึ่งตัวนำ P-type และ N-type มีสารกึ่งตัวนำแบบที่เรียกว่า อินทรินสิค (Intrinsic : I) คั่นอยู่ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า กระแสลอยเลื่อน (Drift Current) นั้นเกิดขึ้นในดีพลักชัน โชน และผลของสนามไฟฟ้าทำให้มีการตอบสนองเร็ว แต่ในทางตรงกันข้ามกระแสแพร่กระจาย (Diffusion Current) ที่เกิดขึ้นภายนอกดีพลักชัน โชน นั้นมีการตอบสนองช้า ดังนั้นถ้าความกว้างของดีพลักชัน โชนยิ่งกว้างมากเท่าใด ประสิทธิภาพทางควอนตัม (Quantum Efficiency) และความเร็วในการตอบสนองความถี่ยิ่งดีขึ้น ความกว้างของดีพลักชัน โชนนี้ ถ้าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และโฮลของ P-type และ N-type ยิ่งต่ำจะยิ่งกว้าง ดังนั้นสารกึ่งตัวนำแบบ อินทรินสิค ที่คั่นกลางระหว่าง P-type กับ N-type จึงมีหน้าที่เพื่อทำให้ความกว้างของดีพลักชัน โชน กว้างขึ้นนั่นเอง เนื่องจาก PD ที่ใช้ในระบบการสื่อสารนั้น โดยทั่วไปต้องการความเร็วในการตอบสนองสูง ดังนั้นส่วนใหญ่มักจะใช้ PIN-PD

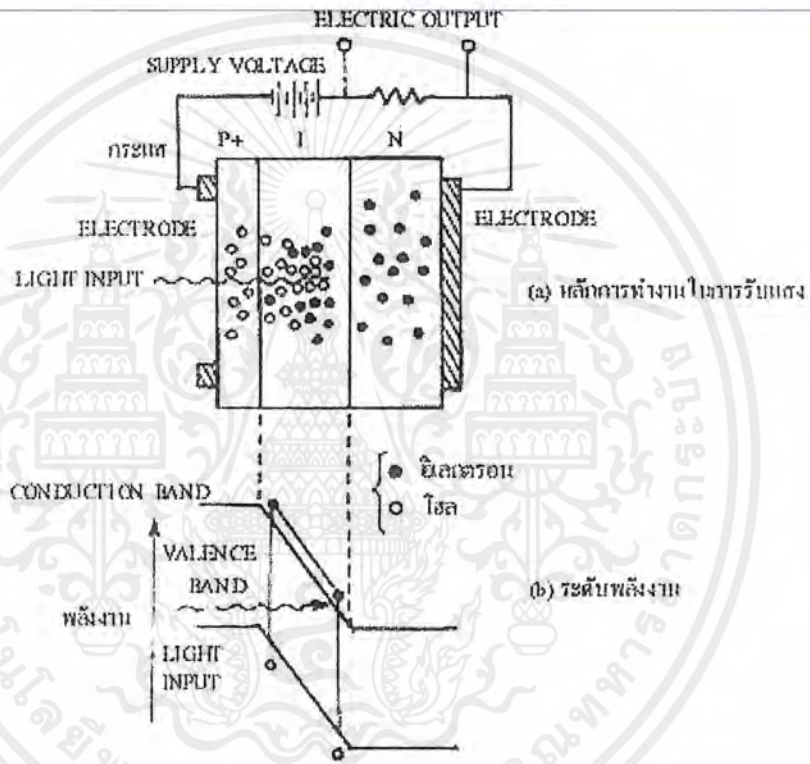


รูปที่ 2.45 แสดงหลักการการทำงานการรับแสงและระดับพลังงานของ PIN-PD

นอกจากนี้ APD นั้นใช้ปฏิกิริยาการขยาย Avalanche ของอิเล็กตรอน และโฮลในสารกึ่งตัวนำ เมื่อเปรียบเทียบกับ PD แล้ว เป็นอุปกรณ์รับแสงที่ให้กระแสจำนวนมาก หลักการทำงานของ APD แสดงดังรูป 2.46 สำหรับโครงสร้างนั้นส่วนใหญ่ทางด้าน P ของรอยต่อ P-N จะมีสารกึ่งตัวนำแบบ P-type ที่มีความหนาแน่นของโฮลสูงคั่นอยู่ โดยการทำเช่นนี้จะทำให้สนามไฟฟ้าภายในของบริเวณใกล้เคียงรอยต่อที่มี P-Layer เป็นศูนย์กลางมีค่ามาก อิเล็กตรอนที่ดูดแสงที่มาจากทางด้าน P⁺ และถูกกระตุ้นจากวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลนซ์แบนด์ไปยังคอนดักชันแบนด์ ในระหว่างที่มันได้รับอัตราเร่งและผ่าน P-Layer นั้นมันจะได้รับพลังงานจำนวนมากกว่าผลต่างของพลังงานของ คอนดักชันแบนด์กับวาเลนซ์แบนด์ จากผลนี้ทำให้สามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์และทำให้เกิดอิเล็กตรอนกับโฮลใหม่ได้ และอิเล็กตรอนกับโฮลใหม่นี้ยังถูกสนามไฟฟ้าเร่งอัตราเร่งให้อีก ทำให้เกิดอิเล็กตรอนกับโฮลใหม่ออกมาอีก เมื่อขบวนการนี้เกิดอย่างต่อเนื่องกัน จำนวนของอิเล็กตรอนกับโฮลจะเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากมาย (Avalanche) เป็นผลให้เกิดการขยายที่เรียกว่า Avalanche Multiplication ผลนี้ทำให้กระแสถูกขยายนั่นเอง



รูปที่ 2.46 แสดงหลักการการทำงานการรับแสงและระดับพลังงานของ APD

คุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง

ประสิทธิภาพของอุปกรณ์รับแสงประเมินจากคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ประสิทธิภาพทางควอนตัม ซึ่งแสดงว่าแสงที่รับมานั้นถูกเปลี่ยนเป็นไฟฟ้าได้มากเท่าไร , ความไวการรับแสง คือระดับรับแสงต่ำสุดที่ต้องการสำหรับการส่งที่มีคุณภาพ ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการออกแบบระยะเวลาถ่ายทอของระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสง , สัญญาณรบกวน (Noise) ที่เกิดขึ้นและความเร็วของการตอบสนองการทำงาน สำหรับประสิทธิภาพทางควอนตัม กำหนดจากสารและโครงสร้างของอุปกรณ์รับแสงแต่สำหรับ

ความไวการรับแสงนั้นจะเกี่ยวข้องกับขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

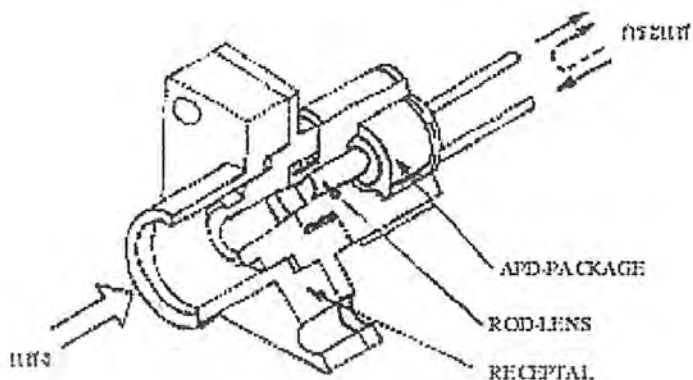
ความเร็วการตอบสนองความถี่ เป็นสิ่งที่กำหนดจากเวลาที่สัญญาณแสงเข้ามา จนกระทั่งเกิดปรากฏการณ์คู่แสง แต่ในปัจจุบันเนื่องจากทั้ง PD และ APD สามารถตอบสนองความเร็วได้ถึงหลายจิกะเฮิร์ต จึงไม่มีปัญหาในการใช้งาน การเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆของ PD กับ APD แสดงดังตาราง 2.4

ตาราง 2.4 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง

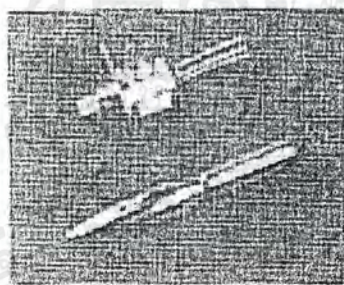
	PD	APD
ประสิทธิภาพทางควอนตัม	ประมาณ 80%	ประมาณ 80%
ความไวในการรับแสง ⁽¹⁾	-15 ถึง 20 dBm	-30 ถึง 40 dBm
ความเร็วการตอบสนองความถี่	ประมาณหลายจิกะเฮิร์ต	ประมาณหลายจิกะเฮิร์ต
อัตราขยาย	1	ประมาณ 500
ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำงาน	0-20 V	30-200 V

การเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์รับแสงกับเส้นใยแสง

การเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์รับแสงกับเส้นใยแสงเป็นองค์ประกอบสำคัญอันหนึ่งในการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสง ในกรณีที่ถูกปล่อยออกไปในอากาศจากปลายของเส้นใยแสงนั้น แสงที่เดินทางมาในเส้นใยแสงจะถูกปล่อยออกไปจากปลายเส้นใยแสงในลักษณะที่มีความกว้างใกล้เคียงกับค่า NA (Numerical Aperture) ของเส้นใยแสง ด้วยเหตุนี้เพื่อที่จะทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์รับแสงเข้ากับเส้นใยแสง จะต้องทำให้อุปกรณ์รับแสงอยู่ใกล้กับปลายของเส้นใยแสงให้มากที่สุดเท่าที่จะมากได้ หรือไม่อย่างนั้นก็ต้องทำอุปกรณ์รับแสงให้มีพื้นที่รับแสงโตมาก เส้นผ่านศูนย์กลางการรับแสงของอุปกรณ์รับแสงที่ทำงานด้วยความเร็วสูงนั้น โดยทั่วไปต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100 ไมโครเมตร ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการรวมแสงให้แก่ด้านรับแสงโดยใช้ ร็อดเลนส์ (Rod Lens) ซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งกลมยาว ไปวางไว้ข้างหน้าอุปกรณ์รับแสง เพื่อทำหน้าที่รวมแสงที่ปล่อยออกมาจากเส้นใยแสงให้แก่ด้านรับแสงของอุปกรณ์รับแสง ร็อดเลนส์และอุปกรณ์รับแสงที่ประกอบเป็นชิ้นเดียวกันนี้เรียกว่า โมดูล (Module) ของอุปกรณ์รับแสง ตัวอย่างโครงสร้างภายในของโมดูลนี้ แสดงดังรูป 2.48 และตัวอย่างของ โมดูล PIN-PD และ โมดูล APD แสดงอยู่ในรูป 2.49



รูปที่ 2.48 แสดงตัวอย่างโครงสร้างภายในของโมดูลAPD



รูปที่ 2.49 แสดง โมดูล PIN- PD และ โมดูล APD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

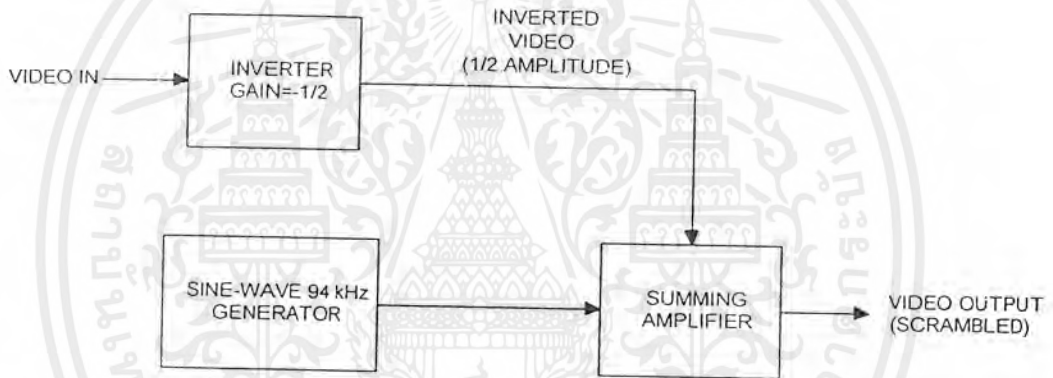
บทที่ 3

การทำงานของวงจร

3.1 การทำงานของวงจรเข้ารหัสสัญญาณภาพ

วงจรเข้ารหัสสัญญาณภาพที่ใช้ที่นี่ เป็นการประยุกต์ใช้วิธีในการเข้ารหัสหรือสแกนแบบต่างๆ คือ การกลับสัญญาณภาพ การเลื่อนซิงค์โดยใช้คลื่นรูปไซน์และการสแกนแบบ เทลีส-แมสท์ โดยมีส่วนประกอบของวงจรการเข้ารหัส โดยแยกเป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ที่สำคัญได้ดังนี้

- วงจรกำเนิดสัญญาณ ไซน์เวฟ (Sine-Wave Generator)
- วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส
- วงจรขยายสัญญาณแบบบวก (Summing Amplifier)
- วงจรแหล่งจ่ายกำลัง



รูปที่ 3.1 บล็อกโคเดแกรมของวงจรเข้ารหัสสัญญาณภาพด้วยวิธีเทลีส-แมสท์

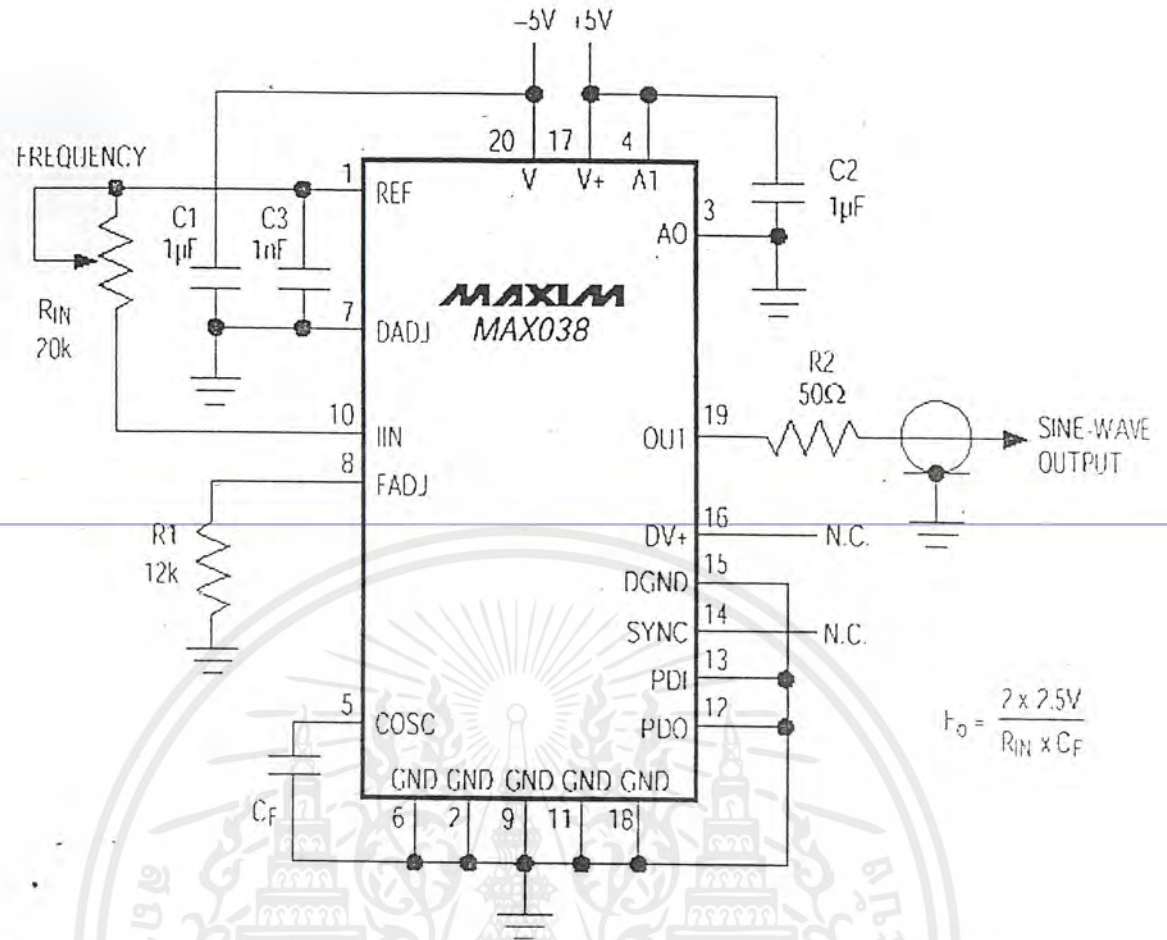
การทำงานของวงจรเข้ารหัสสัญญาณภาพจะไม่ค่อยมีความยุ่งยากมากนัก โดยจะเริ่มจากการนำสัญญาณภาพปกติ (Video Signal) ที่เราต้องการเข้ารหัส มาผ่านวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสซึ่งจะทำให้สัญญาณภาพถูกกลับเฟส 180 องศาและถูกลดขนาดแอมพลิจูดลงเหลือครึ่งหนึ่ง หลังจากนั้นวงจรกำเนิดสัญญาณ ไซน์เวฟ ซึ่งจะสร้างสัญญาณ ไซน์เวฟความถี่ประมาณ 94 kHz โดยสัญญาณ ไซน์เวฟนี้จะใช้ในการเข้ารหัสสัญญาณภาพ โดยเราจะนำสัญญาณภาพที่ผ่านการกลับเฟสและลดขนาดแอมพลิจูดเรียบร้อยแล้ว นำไปรวมกับสัญญาณ ไซน์เวฟความถี่ 94 kHz ที่วงจรขยายสัญญาณแบบบวก ซึ่งสัญญาณ ไซน์เวฟนี้มีความถี่เป็น 6 เท่าของความถี่การสแกนสัญญาณซิงค์ตามแนวนอน (Horizontal Sync) ที่มีความถี่ 15,625 kHz จึงเป็นผลให้สัญญาณ ไซน์เวฟไปก่อกับสัญญาณซิงค์ตามแนวนอนทำให้สัญญาณภาพสลับ ดังนั้นเราจะได้เอาท์พุทจากวงจรขยายสัญญาณแบบบวก เป็นสัญญาณภาพที่เข้ารหัส (Encode Video Signal) ออกมา ซึ่งถ้าหากนำไปส่งด้วยเครื่องส่งและทำการรับด้วยเครื่องรับ อิทธิทัศน์โดยไม่ผ่านเครื่องถอดรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

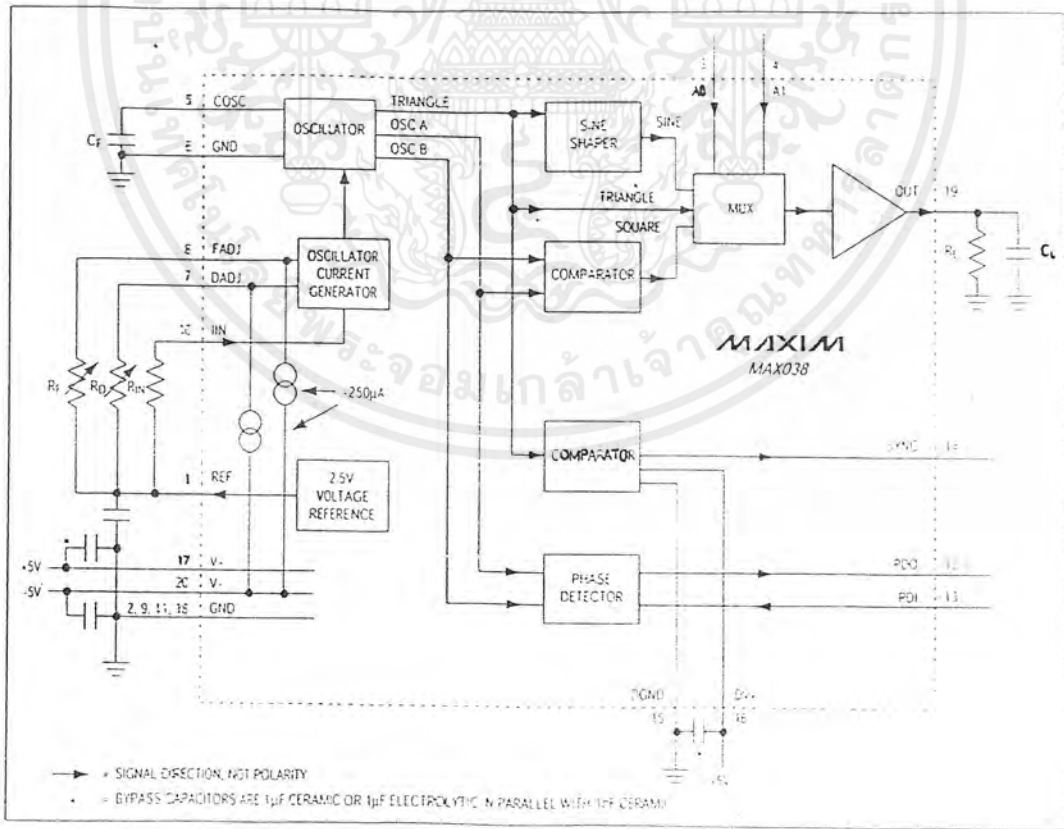
3.1.1 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์เวฟ (Sine-Wave Generator)

สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์ 94 kHz ที่ใช้ในการเข้ารหัสสัญญาณภาพ จะใช้ IC เบอร์ MAX038 ซึ่งเป็น IC กำเนิดรูปคลื่นความถี่สูงที่มีความเที่ยงตรงในการผลิตรูปคลื่นสามเหลี่ยม, ฟันเลื่อย, ไซน์, สี่เหลี่ยมและพัลส์ โดยสามารถควบคุมการผลิตความถี่เอาท์พุทให้อยู่ในย่านความถี่ 0.1 Hz ถึง 20 MHz ด้วยการอ้างอิงกับแรงดันภายใน bandgap 2.5 V และตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุจากวงจรภายนอก ส่วน duty cycle สามารถปรับได้โดยใช้สัญญาณควบคุม ± 2.3 V ทำให้สะดวกต่อการปรับ Pulse-Width Modulation และการกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย





$$f_o = \frac{2 \times 2.5V}{R_{IN} \times C_F}$$



รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมและวงจรการทำงานพื้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำ MAX038 สามารถนำไปใช้งานได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับนำไปประยุกต์ โดยมีรายละเอียดการทำงานของแต่ละขา ดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงหน้าที่การทำงานของแต่ละขาของ MAX038

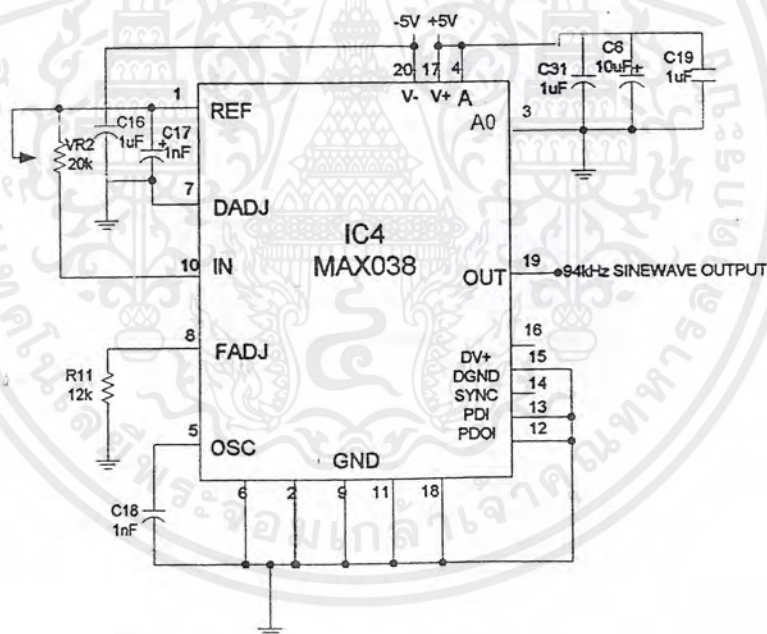
ขาที่	ชื่อ	หน้าที่
1	REF	เอาต์พุตอ้างอิงแรงดัน bandgap 2.5 V
2,6,9,11,18	GND	กราวด์
3	A0	อินพุตเลือกรูปคลื่น ; TTL/CMOS compatible
4	A1	อินพุตเลือกรูปคลื่น ; TTL/CMOS compatible
5	COSC	จุดต่อตัวเก็บประจุภายนอก
7	DADJ	อินพุตปรับ duty cycle
8	FADJ	อินพุตปรับความถี่
10	IIN	อินพุตกระแสตรงสำหรับควบคุมความถี่
12	PDO	เอาต์พุต phase detector, ถ้าไม่ใช้ phase detector ให้ต่อลงกราวด์
13	PDI	อินพุตสัญญาณนาฬิกาอ้างอิง phase detector, ถ้าไม่ใช้ phase detector ให้ต่อลงกราวด์
14	SYNC	เอาต์พุต TTL/CMOS-compatible, อ้างอิงระหว่าง DGND และ DV+ สามารถยอมให้ออสซิลเลเตอร์ภายในไปเป็นซิงโครไนซ์กับสัญญาณภายนอก และหากไม่ใช้งานก็สามารถปล่อยลอยขาไว้ได้
15	DGND	กราวด์ดิจิตอล
16	DV+	อินพุตแหล่งจ่ายดิจิตอล +5V ถ้าไม่ใช้งานใช้งาน SYNC ก็ไม่สามารถที่จะปล่อยลอยขาไว้ได้
17	V+	อินพุตแหล่งจ่าย +5V
19	OUT	เอาต์พุตรูปคลื่นไซน์, สี่เหลี่ยมหรือสามเหลี่ยม
20	V-	อินพุตแหล่งจ่าย -5V

รูปคลื่นเอาต์พุตไซน์, สี่เหลี่ยมหรือสามเหลี่ยมสามารถเลือกได้โดยการตั้งค่าที่ขา A0 และ A1 ดังตารางที่ 3.1 สัญญาณเอาต์พุตจากรูปคลื่นทั้งสามแบบจะเป็นสัญญาณ 2 Vp-p เอาต์พุต อิมพีแดนซ์ต่ำสามารถขยายได้ถึง ± 20 mA

ตารางที่ 3.2 การเลือกรูปคลื่นเอาต์พุต

A0	A1	รูปคลื่น
X	1	คลื่นไซน์
0	0	คลื่นสี่เหลี่ยม
1	0	คลื่นสามเหลี่ยม

เอาต์พุต SYNC จากออสซิลเลเตอร์ภายในจะรักษาค่า duty cycle ไว้ที่ 50% ตลอดเวลาโดยไม่คำนึงว่าในขณะนั้นรูปคลื่นจะมี duty cycle เท่าใดและอุปกรณ์อื่นที่ซึ่งใครในช้ออยู่ในระบบขณะนั้น ออสซิลเลเตอร์ภายในนี้สามารถซิงโครไนซ์กับสัญญาณนาฬิกา TTL ภายนอกที่ต่ออยู่กับ PDI



รูปที่ 3.3 วงจรกำเนิดสัญญาณเอาต์พุตคลื่นไซน์, 50% duty cycle

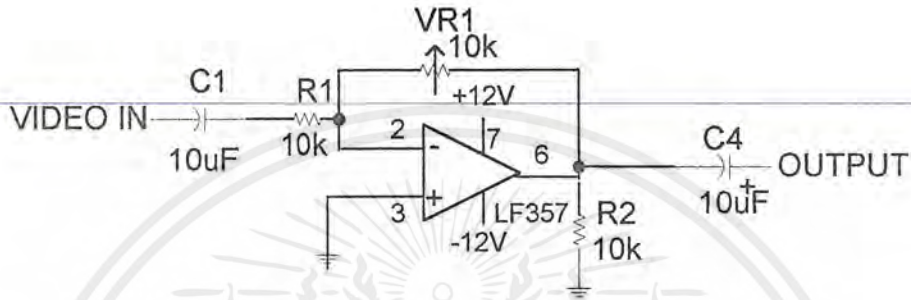
สำหรับในโครงการนี้จะนำ MAX038 มาใช้เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณเอาต์พุตคลื่นไซน์ มีความถี่ 94 kHz และค่า duty cycle เท่ากับ 50% ดังรูปที่ 1.2 วงจรนี้จะกำหนดให้ A0 = "0" และ A1 = "1" ซึ่งจะ ทำให้ได้สัญญาณเอาต์พุตเป็นคลื่นไซน์ ส่วนความถี่เอาต์พุต (Fo) คำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$F_o = (2 \times 2.5V) / (R_{IN} \times C_F)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำหนดให้ CF มีค่า $0.0005 \mu\text{F}$ ดังนั้นเมื่อต้องการความถี่ 94 kHz จะต้องปรับค่า RIN ให้มีค่าประมาณ $10 \text{ k}\Omega$

3.1.2 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส



รูปที่ 3.4 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

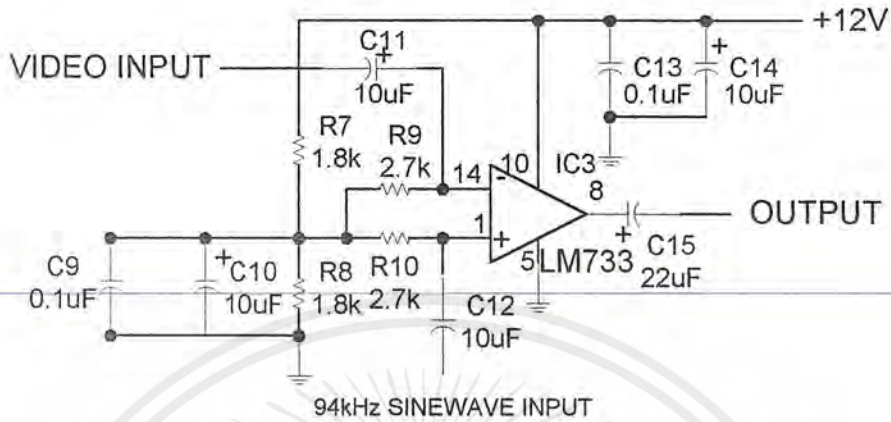
วงจรมีใช้ออปแอมป์เบอร์ LF357 คือเป็นวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสซึ่งจะกลับเฟสไป 180 องศา โดยมีอัตราขยายเท่ากับ $-1/2$ และสามารถคำนวณอัตราการขยายได้จากสมการ

$$A_v = -\frac{R_f}{R_{in}}$$

- เมื่อ A_v คือ อัตราการขยายของวงจร
 R_f คือ ค่าตัวต้านทานขยายป้อนกลับ
 R_{in} คือ ค่าตัวต้านทานอินพุท

ดังนั้นเมื่อต้องการอัตราการขยายเท่ากับ $-1/2$ จะกำหนดให้ค่าตัวต้านทานอินพุทเท่ากับ $10 \text{ k}\Omega$ และค่าตัวต้านทานขยายป้อนกลับจะใช้แบบปรับค่ามีค่าเท่ากับ $10 \text{ k}\Omega$ โดยจะปรับค่าให้ได้ประมาณ $5 \text{ k}\Omega$

3.1.3 วงจรขยายสัญญาณแบบบวก (Summing Amplifier)



รูปที่ 3.5 วงจรขยายสัญญาณแบบบวกที่ใช้ในโครงการ

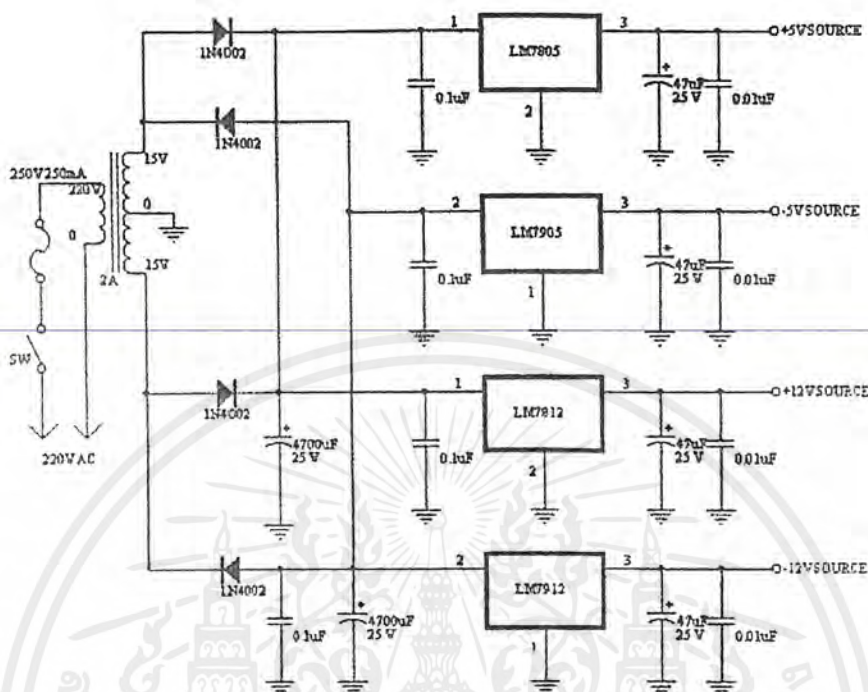
ในรูปที่ 3.5 เป็นรูปแสดงการใช้งานวงจรขยายสัญญาณภาพซึ่งใช้ IC เบอร์ LM733 วงจรขยายนี้มีคุณสมบัติในการขยายสัญญาณความแตกต่าง โดยทำให้มีการผลิตสัญญาณเอาต์พุต ซึ่งเป็นผลจากอัตราการขยายของวงจรและความแตกต่างทั้งสองของสัญญาณที่ค่านอินพุต โดยการทำให้สัญญาณอินพุตอันหนึ่งเป็นศูนย์ วงจรนี้ก็จะทำงานเป็นวงจรขยายตามปกติทั่วไป และคุณสมบัติอีกประการของวงจรนี้ คือการทำงานเป็นวงจรมอดูเลเตอร์ เพื่อใช้ในการเข้ารหัสหรือถอดรหัสสัญญาณภาพ โดยนำสัญญาณภาพปกติหรือสัญญาณภาพที่ผ่านการเข้ารหัสมาแล้วป้อนเข้าที่ขา 14 ของ LM733 ส่วนสัญญาณไซน์เวฟที่ใช้ในการเข้ารหัสหรือถอดรหัสสัญญาณภาพจะป้อนเข้าที่ขา 1 โดยสัญญาณทั้งสองนี้จะถูกส่งผ่าน โดยตัวเก็บประจุก่อนส่งไปให้ LM733 ซึ่งวงจรนี้จะขยายความแตกต่างของสัญญาณทั้งสอง เพื่อให้เกิดการเข้ารหัสหรือถอดรหัสสัญญาณภาพ โดยสัญญาณเอาต์พุตที่เป็นบวก (positive) จะปรากฏที่ขา 8 ส่วนสัญญาณที่เป็นลบ (negative) จะปรากฏที่ขา 7 ของ LM733

3.1.4 วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Supply)

จากรูปที่ 3.5 แสดงถึงวงจรเครื่องจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยวงจรนี้จะใช้การกรองแรงดันแบบ half-wave ซึ่งวงจรนี้จ่ายแรงดัน ไฟฟ้าเอาต์พุตเป็น -12 V, +12 V, -5 V และ +5 V โดยหม้อแปลงเป็นแบบ 12 โวลท์ มี center tap (12 V - 0 V - 12 V)

สำหรับ IC กรองแรงดันทุกตัวจะต้องมีการติดอุปกรณ์ระบายความร้อน (heat sink) ให้กับ IC ทุกตัว เพราะในขณะที่วงจรทำงานจะเกิดความร้อนที่ตัว IC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



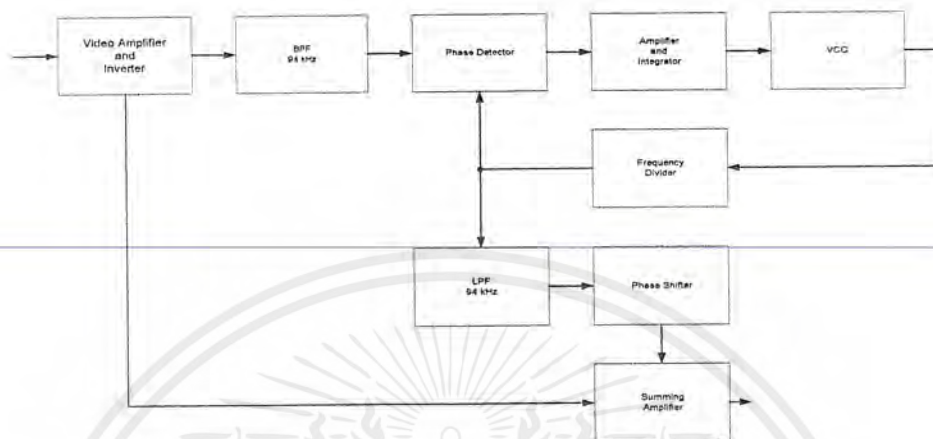
รูปที่ 3.6 วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า

3.2 การทำงานของวงจรอครหัสสัญญาณภาพ

วงจรอครหัสสัญญาณภาพจะเริ่มจากการนำสัญญาณภาพที่ผ่านการเข้ารหัสมาแล้ว โดยสัญญาณที่ผ่านการเข้ารหัสแล้วจะมีลักษณะที่ถูกกลับเฟสไป 180 องศา, ขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณภาพถูกลดครึ่งหนึ่งและถูกนำไปรวมกับสัญญาณรูปคลื่นไซน์ 94 kHz ดังนั้นในขั้นตอนแรกของการอครหัสสัญญาณภาพก็คือ การกลับสัญญาณภาพและการขยายขนาดของแอมพลิจูดของสัญญาณภาพมาให้เหมือนเดิม โดยขั้นตอนนี้จะถูกกระทำโดยวงจรขยายสัญญาณภาพแบบกลับเฟส (Video Amplifier and Inverter) ในขั้นตอนต่อไปจะเป็นขั้นตอนที่ค่อนข้างยุ่งยากมานั้นคือการนำสัญญาณรูปคลื่นไซน์กลับคืนมา โดยในขั้นตอนที่สองนี้จะเริ่มจากการแยกสัญญาณรูปคลื่นไซน์ออกมาจากสัญญาณภาพที่ถูกเข้ารหัสด้วยวงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์ 94-kHz (Band Pass Filter 94-kHz) ต่อจากนั้นสัญญาณรูปคลื่นไซน์จะถูกนำไปผ่านวงจรเฟสล็อกคูลูป (Phase Lock Loop) เพื่อทำให้สัญญาณรูปคลื่นไซน์ 94 kHz มีเสถียรภาพ แต่เนื่องจากสัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจึงต้องนำไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ 94 kHz เพื่อให้มีขนาดเท่ากับสัญญาณรูปคลื่นไซน์เดิมและมีเฟสที่ต่างกัน 180 องศาด้วยวงจรขยายสัญญาณและวงจรเลื่อนเฟส (Phase Shifter) ตามลำดับ ในขั้นตอนสุดท้ายก็จะนำสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ได้ไปรวมกับสัญญาณภาพที่

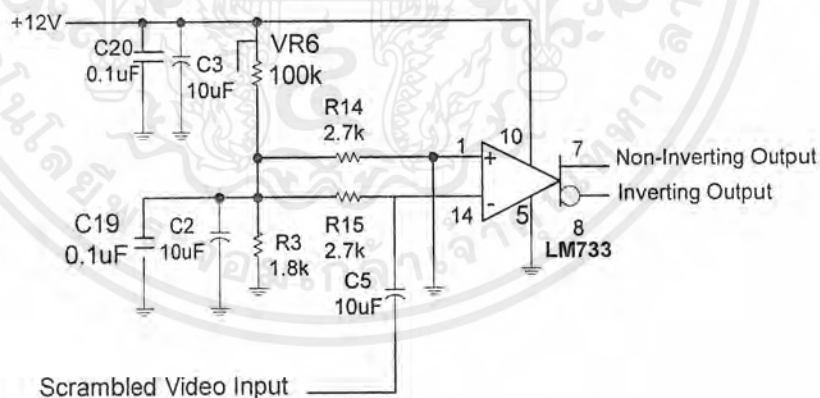
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในทางอื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านการกลับเฟสและขยายขนาดของสัญญาณภาพมาแล้วที่วงจรขยายสัญญาณแบบบวก (Summing Amplifier) สัญญาณที่ได้ในขั้นสุดท้ายนี้จะเป็นสัญญาณภาพปกติที่สามารถจะต่อเข้ากับสัญญาณภาพอินพุทของโทรทัศน์และรับชมได้ตามปกติ



รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมของวงจรถอดรหัสสัญญาณภาพ

3.2.1 วงจรขยายสัญญาณภาพแบบกลับเฟส (Video Amplifier and Inverter)



รูปที่ 3.8 วงจรขยายสัญญาณภาพแบบกลับเฟส

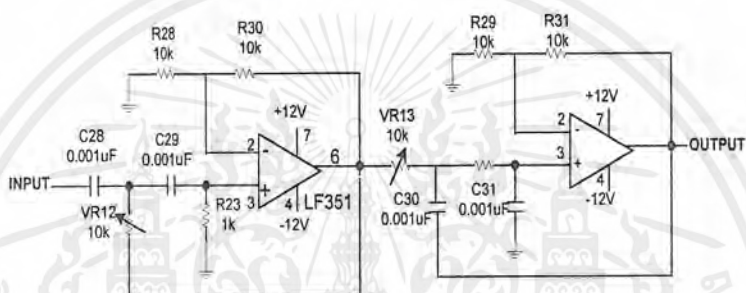
โดยวงจรขยายสัญญาณภาพแบบกลับเฟสนี้จะมีอัตราขยายเป็น 2 เท่าและมีการกลับเฟสของสัญญาณไป 180 องศา โดยวงจรนี้จะใช้ไอซีเบอร์ LM733 และอัตราขยายของวงจรจะสามารถปรับได้จาก VR6 ซึ่งสัญญาณที่เข้ามาทางขา 14 จะถูกขยายและกลับเฟสออกมาที่ขา 7 วงจรขยายสัญญาณภาพแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลับเฟสนี้จะมีลักษณะของวงจรเช่นเดียวกับวงจรขยายสัญญาณแบบบวก แต่จะต่างกันที่วงจรขยายสัญญาณภาพแบบกลับเฟสจะให้ขา 1 ลงกราวด์เพื่อให้มีการขยายและกลับเฟสเท่านั้น

3.2.2 วงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์ (Band Pass Filter)

วงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์ที่ใช้นี้เป็นวงจรที่ประกอบด้วยวงจรกรองความถี่สูงและวงจรกรองความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวิร์ทออร์เดอร์ 2 โดยวงจรจะถูกออกแบบให้มีแบนด์วิดท์ 1 kHz และมีความถี่ศูนย์กลางอยู่ที่ 94-kHz ซึ่งขั้นตอนในการออกแบบได้อธิบายไว้ในบทที่ 2



รูปที่ 3.9 วงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์ 94 kHz

3.2.3 วงจรเฟสล็อกกลูป (Phase Lock Loop)

วงจรเฟสล็อกทำงานด้วยการเปรียบเทียบสัญญาณของความถี่ voltage control oscillator (VCO) กับ สัญญาณอ้างอิง โดยปกติสัญญาณอ้างอิงจะเป็นสัญญาณอินพุต ซึ่งสัญญาณอินพุตและสัญญาณ VCO จะถูกเปรียบเทียบโดยเฟสดีเทกเตอร์ (phase detector) ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งเอาท์พุทของเฟสดีเทกเตอร์จะมีการขยายสัญญาณและป้อนให้กับ VCO เพื่อให้ VCO ปรับค่าความแตกต่างเฟสให้ลดลง ในบางครั้ง VCO จะทำได้ครั้งละหลายๆ อินพุต จากวงจรดังรูปจะมีตัวหารความถี่ ($\div N$) ในตำแหน่งของลูปกลับ (feedback loop)

สำหรับวงจรเฟสล็อกกลูปที่ใช้นี้จะใช้ไอซีเบอร์ LM565 ซึ่งเป็นไอซีเฟสล็อกกลูปที่นิยมใช้กัน โดยทั่วไปเนื่องจากสามารถนำไปใช้งานได้ง่ายและต่ออุปกรณ์ภายนอกอีกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยในการออกแบบจะมีการคำนวณความถี่ที่ออกมาจากเอาท์พุทของ VCO ได้จากสมการ

$$f_o \cong \frac{0.3}{R_o C_o}$$

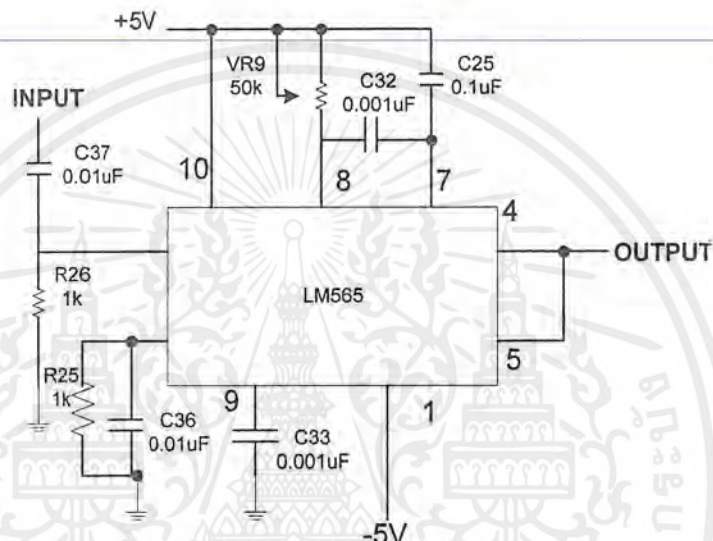
เมื่อ f_o คือ ความถี่ free running

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_o คือ ค่าความต้านทานที่ต่ออยู่ระหว่างขา 10 และขา 8

C_o คือ ค่าตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่ระหว่างขา 9 กับกราวด์

จากวงจรในรูปที่ 3.10 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ 94 kHz จะเข้ามาทางขา 2 ซึ่งเป็นอินพุทของเฟสดีเทกเตอร์และจะได้เป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ขา 4 หรือขา 5 ซึ่งเป็นเอาต์พุทของ VCO และอินพุทของตัวเปรียบเทียบเฟสตามลำดับ



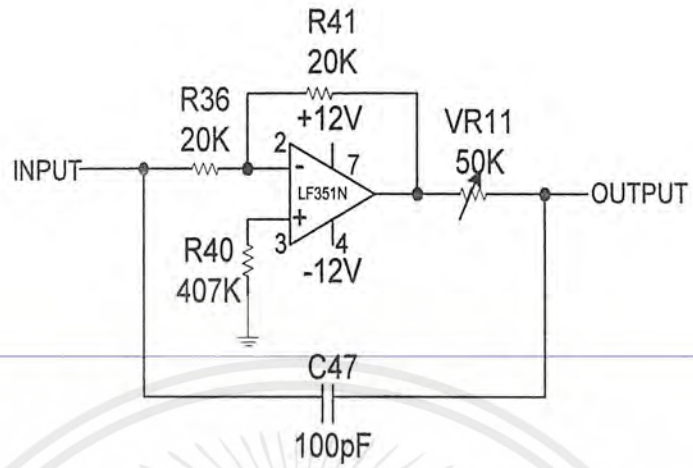
รูปที่ 3.10 วงจรเฟสล็อกคูลูปที่ใช้ไอซีเบอร์ LM565

3.2.4 วงจรเลื่อนเฟส (Phase Shifter)

วงจรเลื่อนเฟสที่ใช้เป็นวงจร All Pass Equalizer แบบ Negative phase active equalizer โดยวงจรนี้จะมีอัตราการขยายที่ใกล้เคียงกันในทุกความถี่และมีการแสดงให้เห็นถึงเฟสที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการเปรียบเทียบกับอินพุท ซึ่งวงจรนี้จะใช้กับการปรับเฟสหรือการคิเล็คสัญญาณเพื่อเป็นการชดเชยจากวงจรในส่วนต่างที่สัญญาณผ่านมาโดยวงจรจะมีทรานสเฟอร์ฟังก์ชันดังนี้

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \pm \frac{s - 1/RC}{s + 1/RC}$$

โดย R ในทรานสเฟอร์ฟังก์ชันก็คือ VR14 ในวงจรและ C คือ C48 ในวงจร



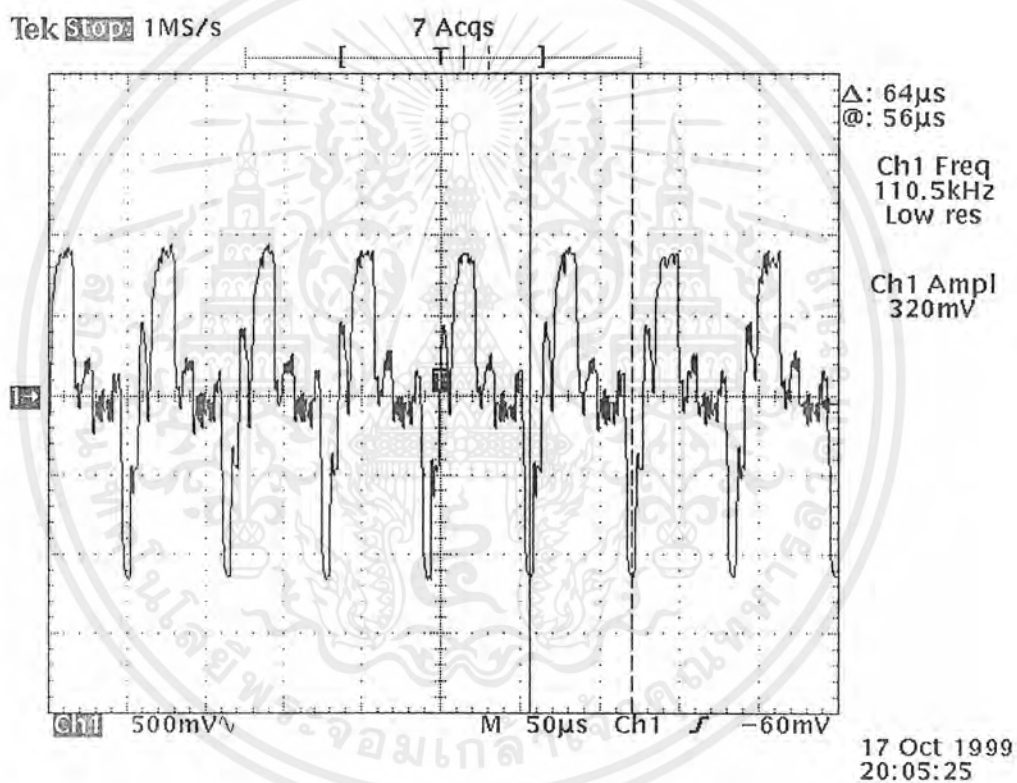
รูปที่ 3.11 วงจรเลื่อนเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

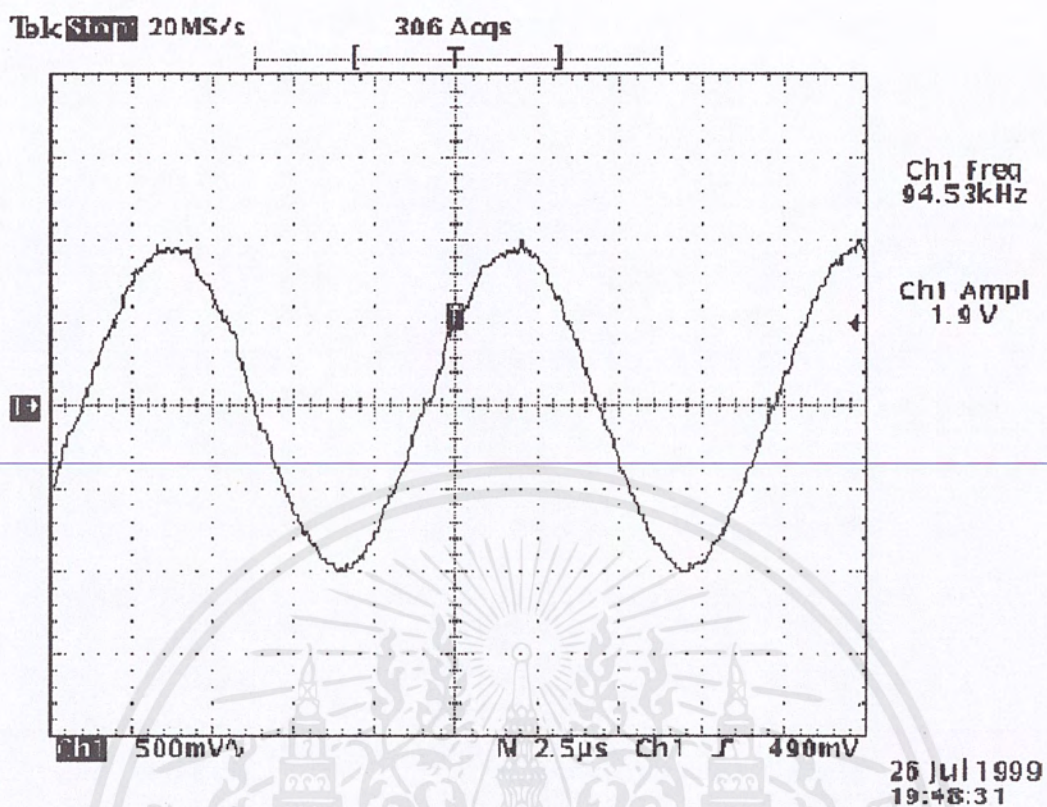
การทดลองและผลการทดลอง

ส่วนประกอบต่างๆของวงจรเข้ารหัสสัญญาณภาพ ในการทดลองทำการวัดสัญญาณที่จุดต่างๆ ได้รูปสัญญาณแสดงให้เห็นดังต่อไปนี้

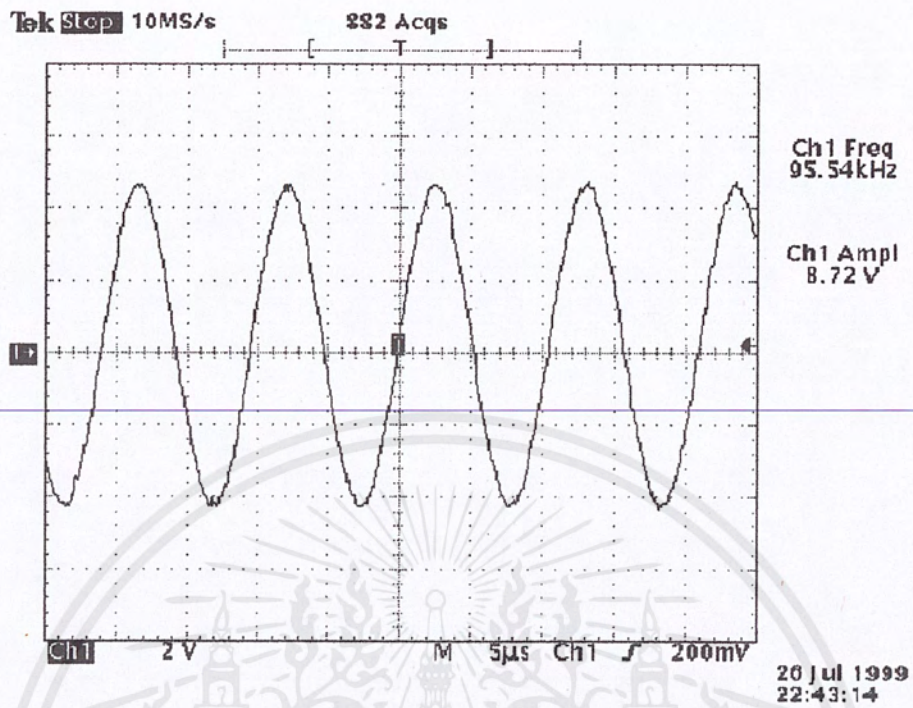


รูปที่ 4.1 สัญญาณซิงก์ทางแนวนอนของสัญญาณภาพปกติจากเครื่องเล่นวีดีโอ

สัญญาณภาพดังกล่าวนี้ จะมีความถี่ของสัญญาณซิงก์ตามแนวนอนมีค่าประมาณ 15.6 kHz

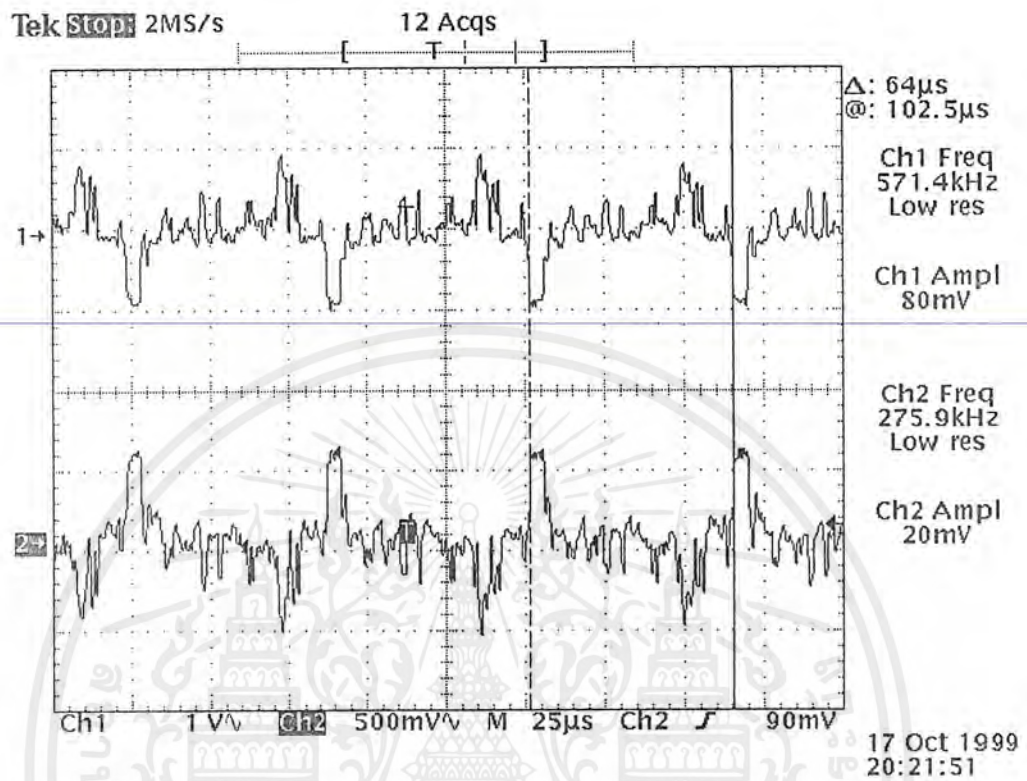


รูปที่ 4.2 แสดงสัญญาณรูปคลื่นไซน์จากวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ 94-kHz
ที่ขา 19 ของไอซี MAX038



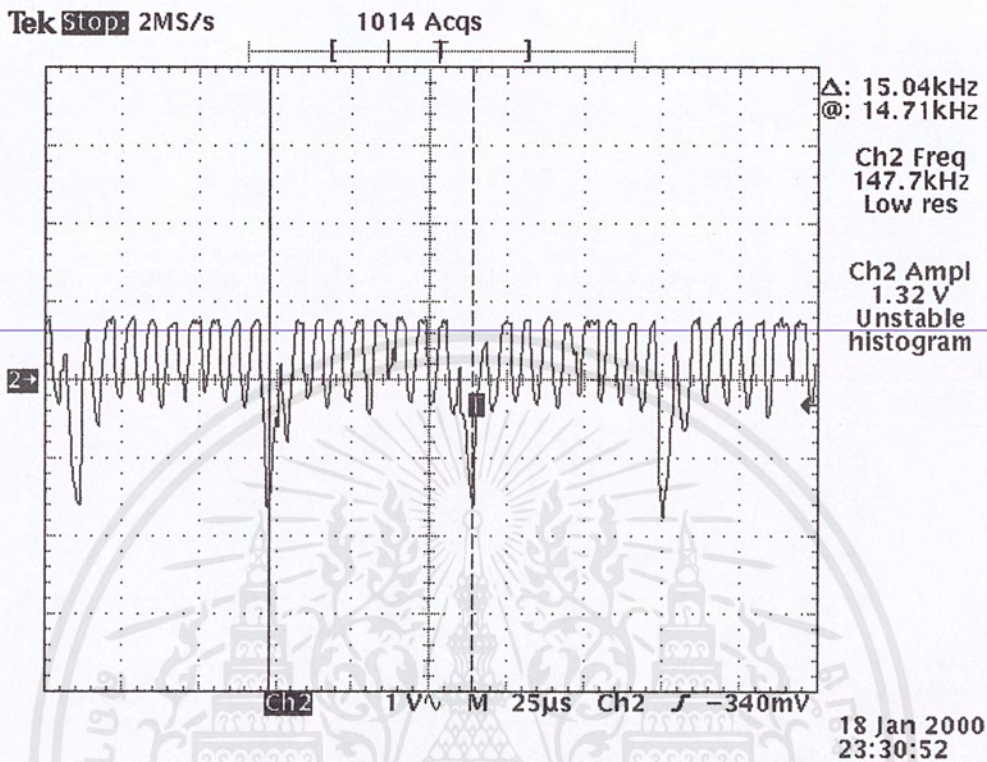
รูปที่ 4.3 แสดงสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ 94-kHz ก่อนเข้า Summing Amplifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



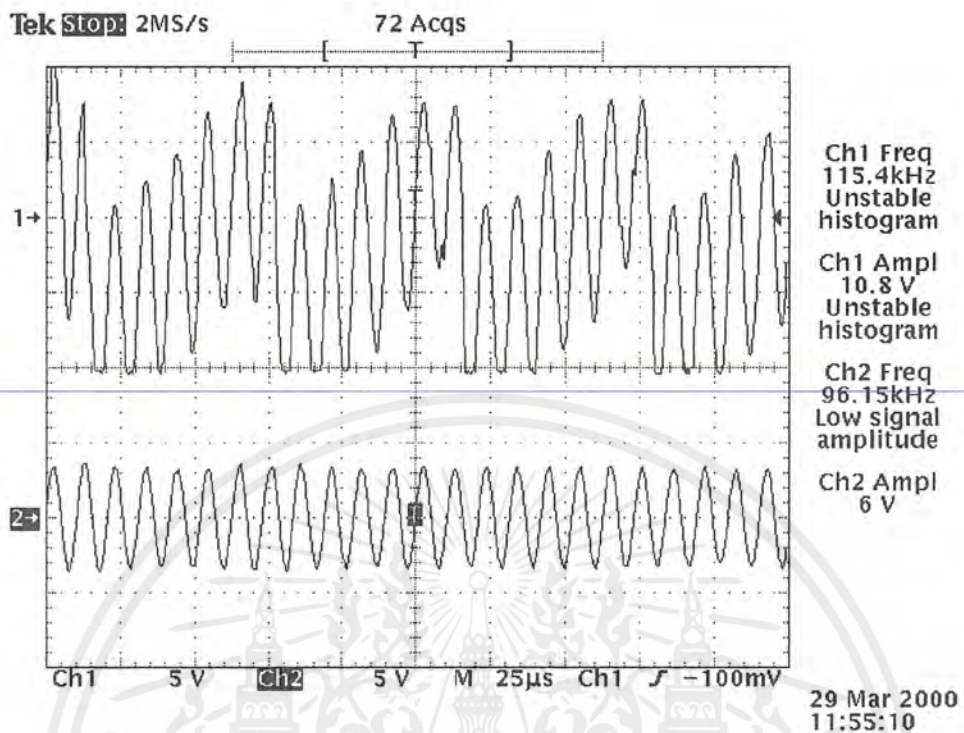
รูปที่ 4.4 แสดงสัญญาณภาพหลังจากผ่านวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส
ที่ขา 6 ของ ไอซี LF357

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



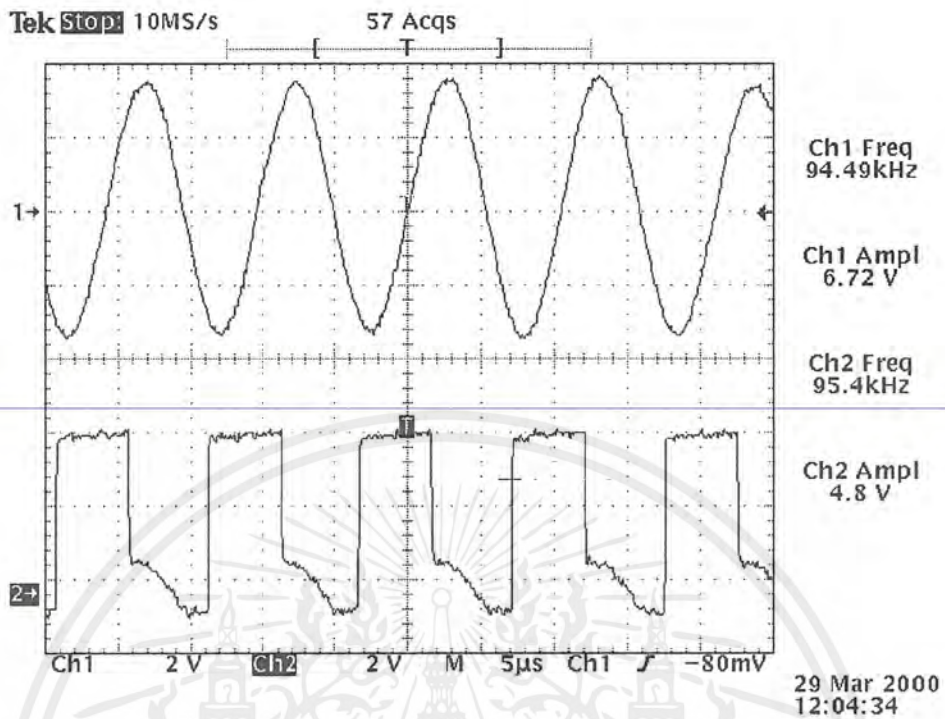
รูปที่ 4.5 แสดงการรวมกันของสัญญาณภาพและสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ 94-kHz
(Scrambled signal)

สัญญาณเอาต์พุตของวงจรเข้ารหัสเป็นสัญญาณที่มีการกลับเฟสของสัญญาณของสัญญาณภาพ ลดขนาดของสัญญาณภาพลงครึ่งหนึ่งและนำไปรวมกับสัญญาณรูปคลื่นไซน์ 94-kHz และสัญญาณที่ผ่านการเข้ารหัสนี้จะเป็นสัญญาณอินพุตของวงจรถอดรหัสสัญญาณภาพต่อไปนั่นเอง



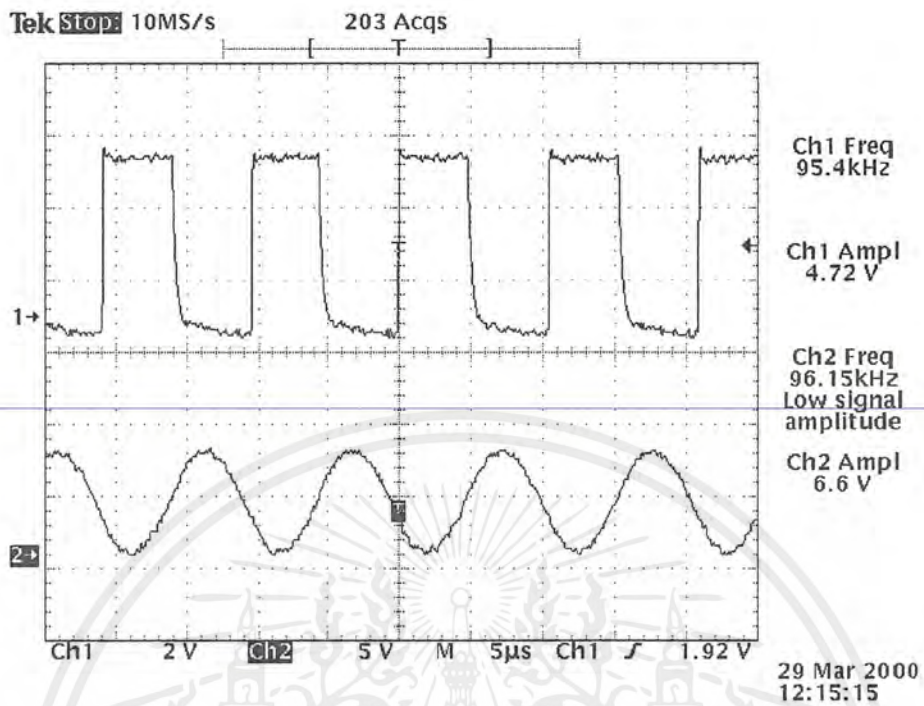
รูปที่ 4.6 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเบนซ์ฟาสฟิลเตอร์ในส่วนของวงจรถอดรหัสสัญญาณภาพ

สัญญาณเอาต์พุตของวงจรเบนซ์ฟาสจะได้ความถี่ประมาณ 94-kHz แต่สัญญาณจะยังไม่เสถียรภาพดีเท่าที่ควร



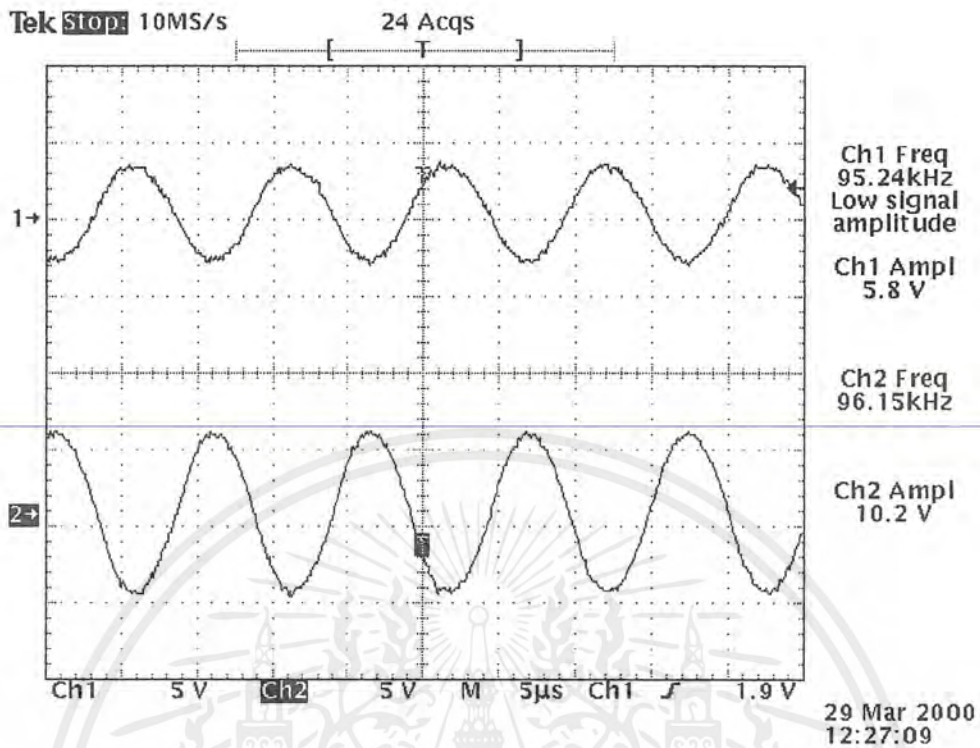
รูปที่ 4.7 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเฟสล็อกคูลูป

สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรเฟสล็อกคูลูปที่ได้จะเป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม โดยมีความถี่ประมาณ 94-kHz



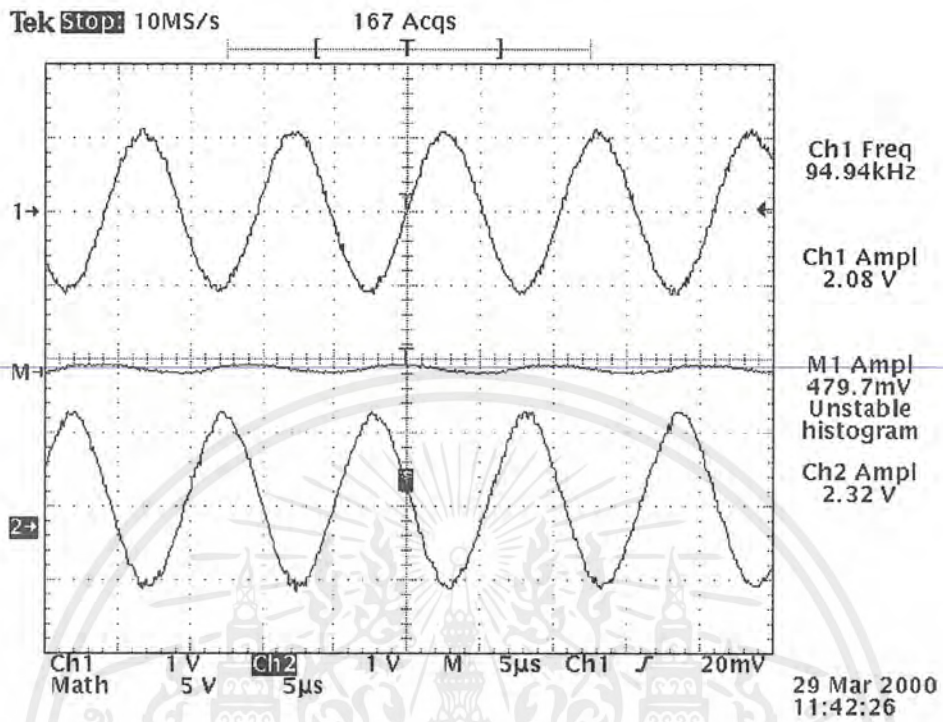
รูปที่ 4.8 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



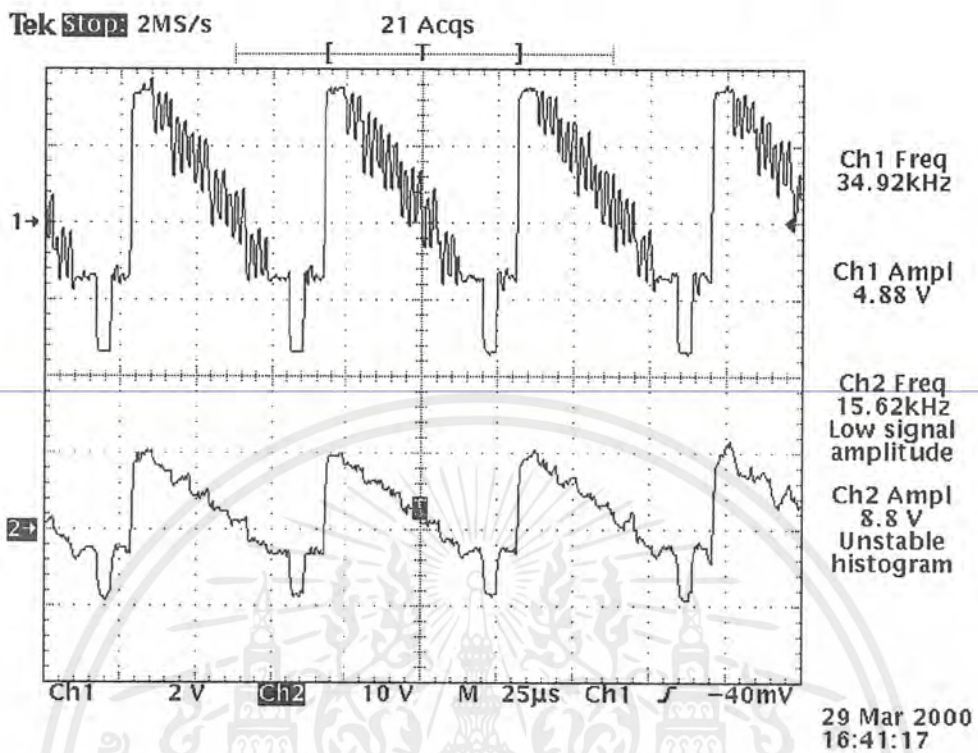
รูปที่ 4.9 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเลื่อนเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรอครหัสสัญญาณภาพสุดท้าย
ที่ได้รับกลับคืนมาหลังจากการแยกเอาสัญญาณไซน์ออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ภาพปกติจากเครื่องเล่นวีดีโอ



ข) ภาพที่ผ่านการเข้ารหัสแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



c) ภาพที่ผ่านการถอดรหัสแล้ว

รูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณภาพก่อนและหลังผ่านการสแกนเบิ้ล โดยไม่ได้ผ่านเส้นโยแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) สัญญาณภาพที่ผ่านการเข้ารหัสและส่งผ่านเส้นใยแสง



b) สัญญาณภาพที่ผ่านออกจากเส้นใยแสงและทำการถอดรหัสเรียบร้อยแล้ว

รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณภาพที่เข้ารหัสและถอดรหัส
โดยผ่านเส้นใยแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และบทสรุป

5.1 สรุป

จากการวัดสัญญาณที่จุดต่างๆของวงจรเข้ารหัสสัญญาณภาพ จะสังเกตเห็นได้ว่ามีสัญญาณรบกวนค่อนข้างมาก เนื่องจากผลของการใช้งานบอร์ดเนกประสงค์ ในการต่อวงจรซึ่งมีสัญญาณรบกวนต่อตารางหน่วยค่อนข้างสูง และจากการที่ใช้รูปคลื่นของสัญญาณภาพจากเครื่องเล่นวีดีโอในการทดสอบวงจรเข้ารหัสสัญญาณภาพ จึงทำให้สัญญาณที่วัดได้มีรูปคลื่นของสัญญาณที่ไม่แน่นอน แต่ทั้งนี้ก็ไม่มีผลสำคัญต่อวงจรมากมายนัก เพราะว่าการทดลองต้องการเพียงที่จะวัดรูปคลื่นและความถี่ของสัญญาณซิงก์เท่านั้น

การเข้ารหัสสัญญาณภาพด้วยวิธีการกลับเฟสสัญญาณภาพไป 180 องศา และทำการลดขนาดของแอมพลิจูดของสัญญาณภาพลงครึ่งหนึ่งด้วย การนำสัญญาณภาพที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวข้างต้นแล้วนั้น ไปรวมกับสัญญาณรูปคลื่นไซน์ 94-kHz เป็นวิธีการเข้ารหัสสัญญาณภาพในระบบบอเนลล็อก ซึ่งถือได้ว่าเป็นมีความปลอดภัยในการการลักลอบได้ในระดับปานกลาง และมีการลงทุนที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงสามารถที่จะนำไปใช้งานได้ทันทีโดยไม่ต้องมีการระดับความป้องกันสูงหรือทำงานเกินไป และหากนำไปใช้งานจริงระบบนี้ก็ไม่ใช่ว่าระบบที่จะนำไปใช้งานได้ระยะเวลาสั้นเช่นกัน จะต้องมีการปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงตามเวลาและเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับยุคสมัยด้วย

5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

ในระหว่างการทำการทดลองนั้น ได้เกิดปัญหาและอุปสรรคต่างๆขึ้น ซึ่งทางคณะผู้จัดทำได้ทำการรวบรวมปัญหา และแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ดังต่อไปนี้

การนำวงจรต่างๆมาต่อรวมกันเป็นจำนวนมาก จะทำให้สัญญาณที่จุดต่อนั้นๆเกิดการผิดเพี้ยนไปจากที่ควรจะเป็นเล็กน้อย ดังนั้นจึงต้องมีการต่อตัวเก็บประจุเข้าไปด้วยเพื่อให้สัญญาณมีการผิดเพี้ยนน้อยลง

เนื่องจากการทดลองจะเห็นได้ว่ามีสัญญาณรบกวนค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการป้องกันการรบกวนของสัญญาณรบกวนให้ดี เพราะว่า สัญญาณรบกวนเหล่านี้จะมีผลอย่างมากต่อวงจรถอดรหัสสัญญาณภาพ ซึ่งจะทำให้การถอดรหัสสัญญาณภาพทำได้ยากยิ่งขึ้น สำหรับในการป้องกันนั้น ได้แก่ ในขั้นตอนของการลงอุปกรณ์นั้นจะต้องลงให้ขาอุปกรณ์อุปกรณ์สั้นที่สุดเพื่อเป็นการลดการเหนี่ยวนำสัญญาณในส่วนที่ไม่ต้องการ การต่อสายสายนำสัญญาณต่างๆจะต้องใช้สายที่มีชีลด์ในตัวเพื่อเป็นการลดการเหนี่ยวนำเช่นเดียวกัน

สัญญาณรูปคลื่นไซน์ 94-kHz ที่ใช้สำหรับวงจรเข้ารหัสสัญญาณภาพ จะต้องมียุติภาพที่ดีเพราะจะมีผลอย่างมากในขั้นตอนของการนำสัญญาณรูปคลื่น ไซน์กลับคืนมาสำหรับวงจรถอดรหัสสัญญาณภาพ ดังนั้นในการเลือกใช้อุปกรณ์จะต้องมีการออกแบบมาอย่างดี

สำหรับการใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ที่ใช้ในวงจรขยายสัญญาณแบบบวกร หรือวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส ควรเลือกใช้ตัวต้านทานแบบมากรอบเพราะจะทำให้สามารถปรับค่าได้อย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละเอียด เนื่องจากตัวต้านทานแบบปรับค่าที่ใช้เป็นการปรับอัตราขยายของวงจรมีสัญญาณแบบบวก หรือวงจรมีสัญญาณแบบกลับเฟส ซึ่งการปรับค่าต้องการความละเอียดเพราะถ้าหากปรับไม่ถูกต้อง สัญญาณภาพที่ต้องการจะเพี้ยนได้

การออกแบบวงจรจ่ายแรงดันกระแสตรงจะต้องให้อาชีพุทของวงจรมีแรงดันที่เรียบจริง เพราะถ้าหากว่าไม่เรียบก็จะมีผลต่อการทำงานในส่วนต่างๆ โดยตรง ซึ่งมีผลทำให้วงจรไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้นเราจะต้องใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าที่เหมาะสมต่อที่อาชีพุทของวงจรแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง

สัญญาณรูปคลื่นไซน์ 94-kHz สำหรับวงจรถอดรหัสก็เช่นเดียวกันกับวงจรเข้ารหัส คือ จะต้องมีความเสถียรภาพที่ดี ดังนั้นในการดึงสัญญาณรูปคลื่น ไซน์กลับคืนมาจึงต้องใช้วงจรเฟสล็อกคู่มาช่วยเพื่อให้สัญญาณที่ได้เกิดเสถียรภาพที่ดี

ในการส่งผ่านสัญญาณภาพที่ผ่านการเข้ารหัสแล้ว ผ่านเข้าไปในเส้นใยแสงนั้น เนื่องจากการสูญเสียและความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดจากการส่งผ่านเส้นใยแสง จะเห็นได้ว่ามีผลอย่างมากต่อการถอดรหัสของสัญญาณภาพ เนื่องจากเส้นใยแสงทำตัวเสมือนเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำ ดังนั้นสัญญาณภาพสุดท้ายที่ได้ออกมาจึงเป็นภาพขาวดำ และเสมือนกับการผ่านเส้นใยแสงเป็นการทำให้การเข้ารหัสสัญญาณภาพมีความซับซ้อนขึ้นกว่าเดิม การถอดรหัสสัญญาณภาพเพื่อให้ได้ภาพเหมือนเดิมกลับคืนมานั้น จึงเป็นเรื่องที่ยากมากขึ้นกว่าเดิม ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองแล้วว่า สัญญาณภาพที่ผ่านการถอดรหัสโดยไม่ผ่านเส้นใยแสง กับสัญญาณภาพที่ผ่านการถอดรหัสโดยผ่านเส้นใยแสง มีความแตกต่างกัน จึงต้องนำไปเป็นข้อแก้ไขเพื่อการพัฒนาที่ดียิ่งขึ้นต่อไป

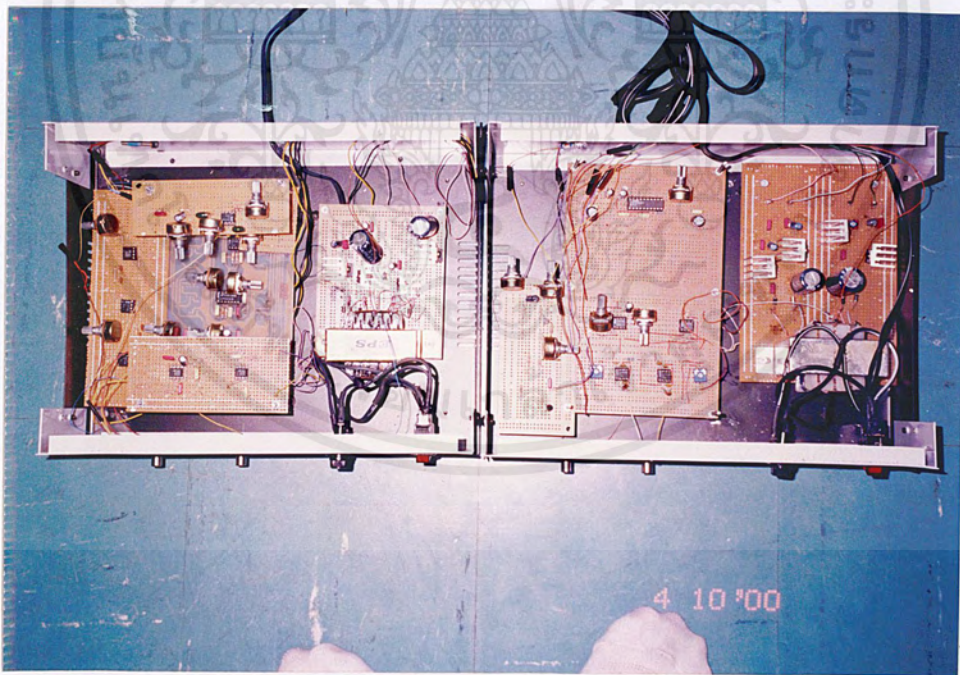
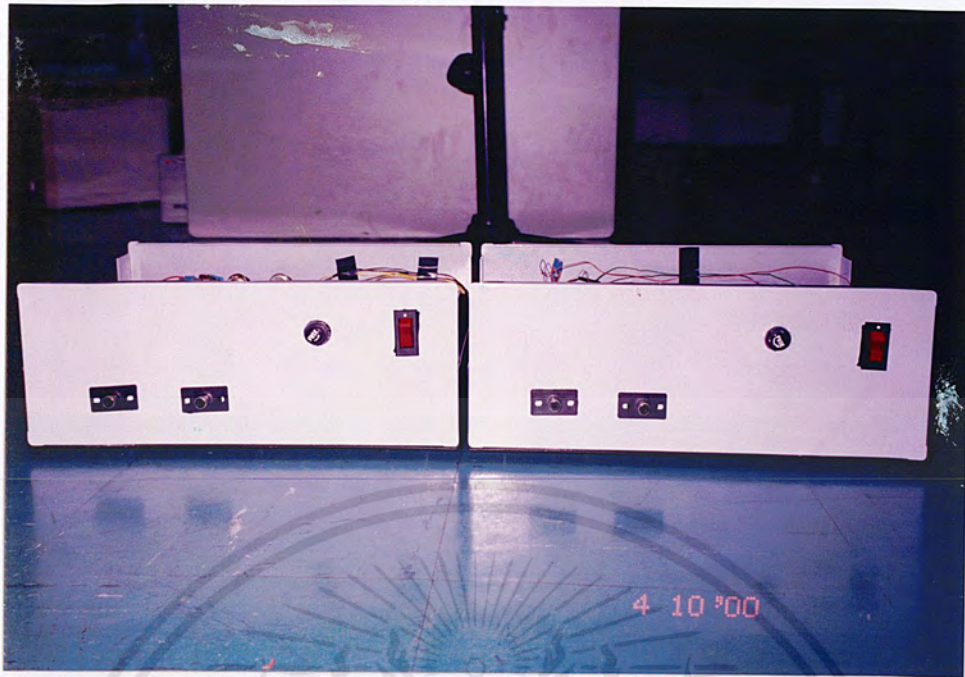
5.3 แนวทางในการพัฒนา

ในทางปฏิบัติจริงบริษัทที่ให้บริการทางด้านเคเบิลทีวี จำเป็นที่จะต้องมีการพัฒนาระบบการเข้ารหัสและถอดรหัสสัญญาณภาพเป็นระยะๆ อยู่เสมอๆ เพราะเมื่อมีการใช้งานการเข้ารหัสและถอดรหัสสัญญาณภาพไปสักระยะ ก็จะถูกรบกวนแก้ไขได้โดยผู้ถูกลอบ ดังนั้นจึงต้องมีการเปลี่ยนแปลงระบบการเข้ารหัสใหม่ แต่ในการเปลี่ยนแปลงนั้นจะต้องมีผลต่อผู้ใช้บริการน้อยที่สุด

สำหรับในปริญญาวิทยุนี้สามารถปรับปรุงได้โดยการปรับเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณคลื่น ไซน์ที่ใช้ในการเข้ารหัสสัญญาณภาพ โดยการเลือกใช้ความถี่ ซึ่งจะใช้ความถี่ที่เป็นจำนวนเท่าของความถี่ของความถี่ของสัญญาณซิงค์ทางแนวนอนของสัญญาณภาพ หรือการใช้ความถี่ของสัญญาณคลื่น ไซน์หลายๆ ความถี่โดยการใช้ความถี่หนึ่งในช่วงระยะเวลาหนึ่งแล้วค่อยเปลี่ยนไปใช้อีกความถี่หนึ่งในช่วงระยะเวลาต่อมา

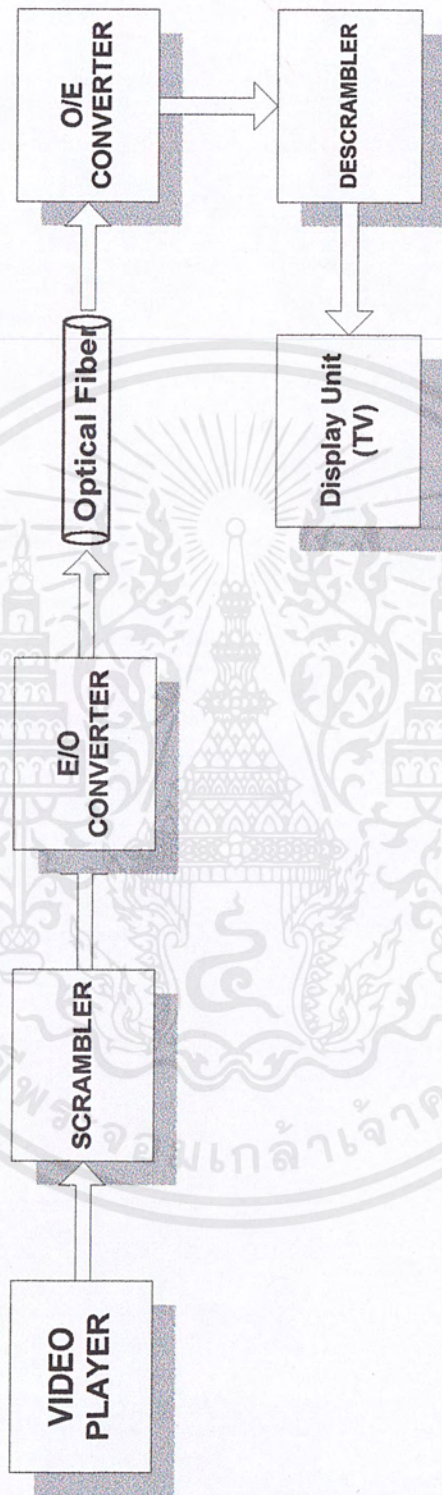


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



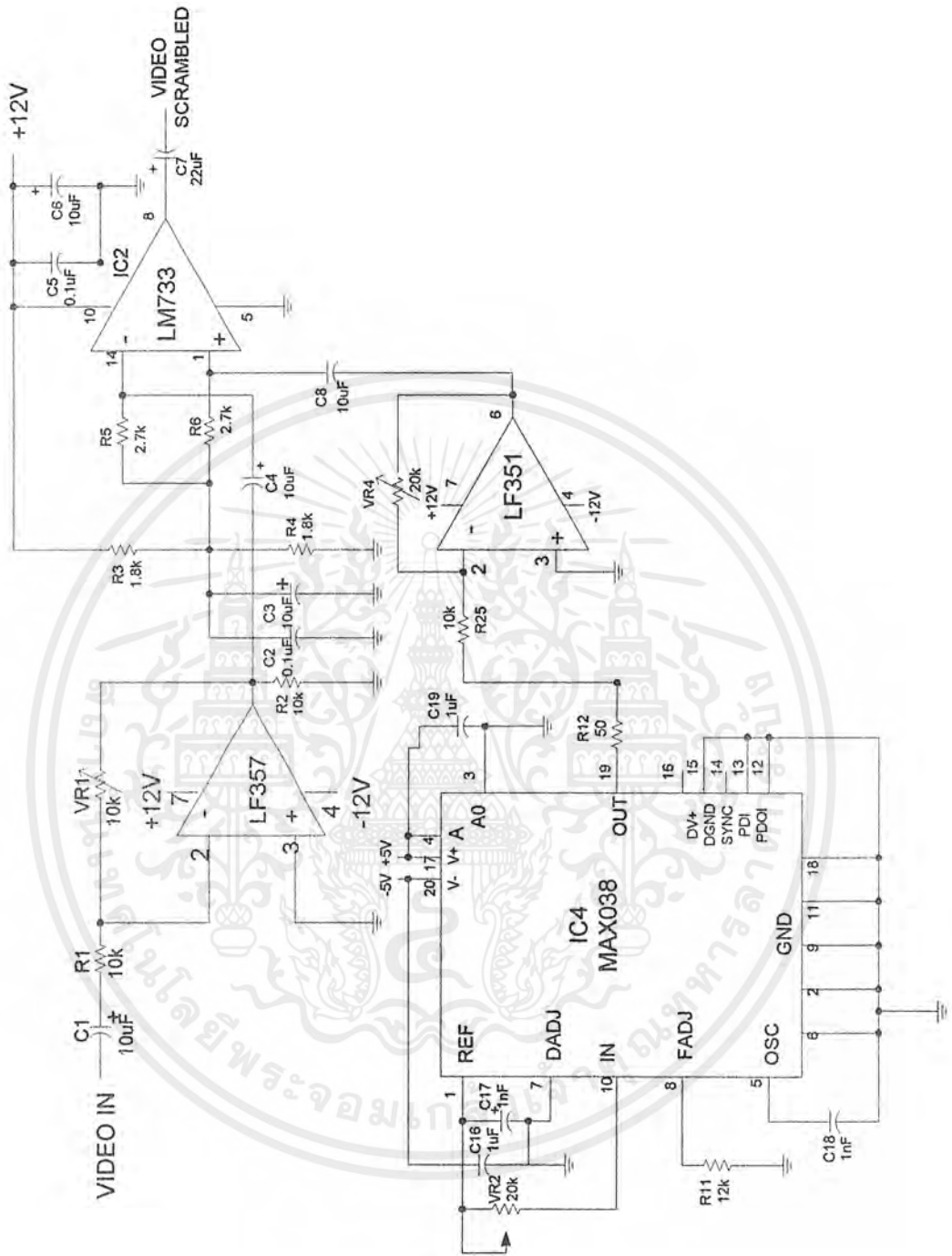
รูปแสดงชิ้นงานและอุปกรณ์ในโครงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



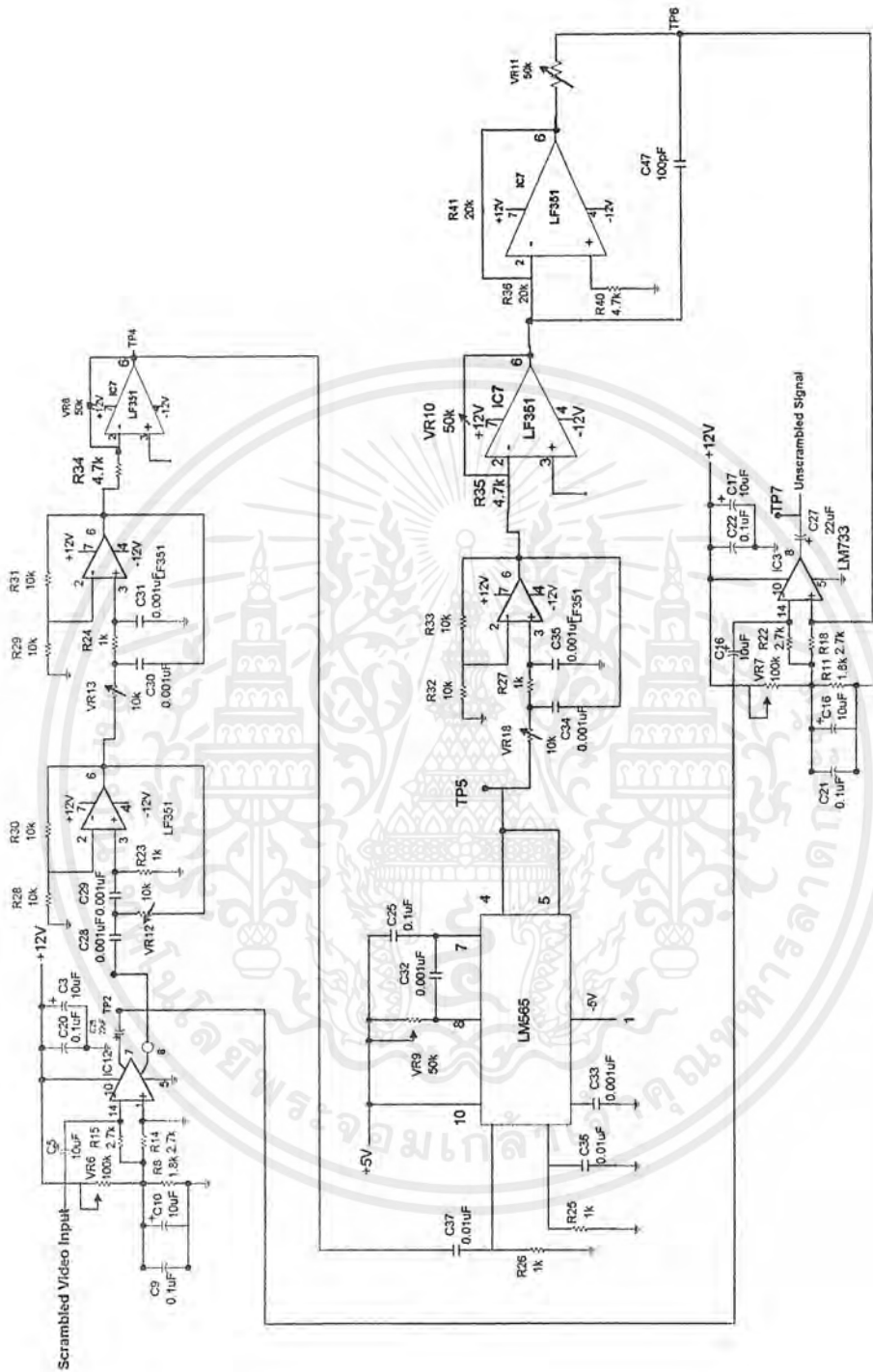
บล็อกไดอะแกรมแสดงหลักการเครื่องเข้ารหัสและถอดรหัสสัญญาณภาพผ่านเส้นใยแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



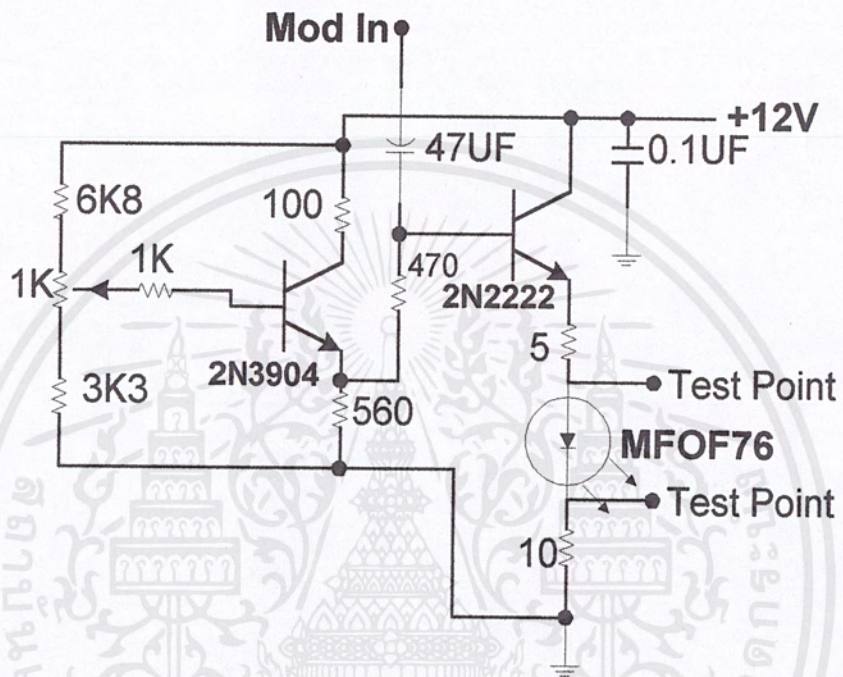
วงจรเข้ารหัสสัญญาณภาพด้วยวิธีเทเลสแมสท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



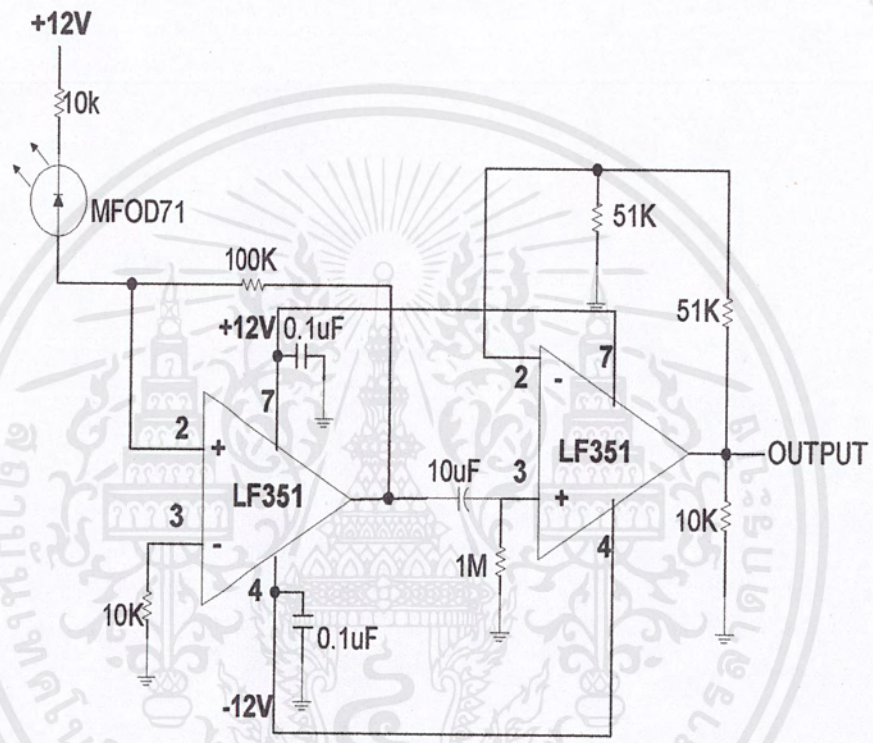
วงจรถอดรหัสสัญญาณภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Light Driver (E/O CONVERTER)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



OPTICAL RECEIVER (O/E CONVERTER)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM733/LM733C Differential Amplifier

General Description

The LM733/LM733C is a two-stage, differential input, differential output, wide-band video amplifier. The use of internal series-shunt feedback gives wide bandwidth with low phase distortion and high gain stability. Emitter-follower outputs provide a high current drive, low impedance capability. Its 120 MHz bandwidth and selectable gains of 10, 100 and 400, without need for frequency compensation, make it a very useful circuit for memory element drivers, pulse amplifiers, and wide band linear gain stages.

The LM733 is specified for operation over the -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$ military temperature range. The LM733C is specified for operation over the 0°C to $+70^{\circ}\text{C}$ temperature range.

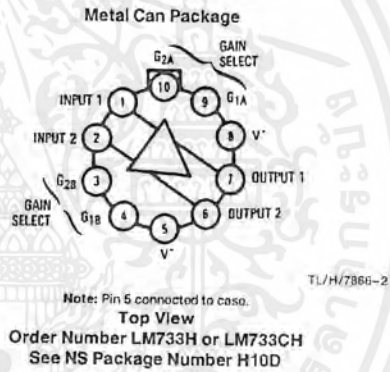
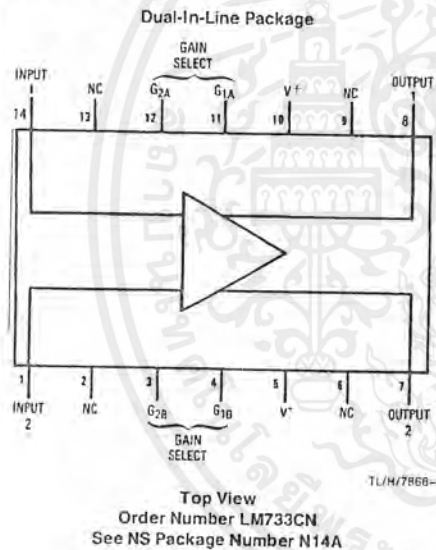
Features

- 120 MHz bandwidth
- 250 k Ω input resistance
- Selectable gains of 10, 100, 400
- No frequency compensation
- High common mode rejection ratio at high frequencies

Applications

- Magnetic tape systems
- Disk file memories
- Thin and thick film memories
- Woven and plated wire memories
- Wide band video amplifiers

Connection Diagrams



Absolute Maximum Ratings

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

Differential Input Voltage	±5V
Common Mode Input Voltage	±6V
V _{CC}	±8V
Output Current	10 mA

Power Dissipation (Note 1)	500 mW
Junction Temperature	+150°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
Operating Temperature Range	
LM733	-55°C to +125°C
LM733C	0°C to +70°C
Lead Temperature (Soldering, 10 sec.)	260°C

Electrical Characteristics (T_A = 25°C, unless otherwise specified, see test circuits, V_S = ±6.0V)

Characteristics	Test Circuit	Test Conditions	LM733			LM733C			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Differential Voltage Gain									
Gain 1 (Note 2)	1	R _L = 2 kΩ V _{OUT} = 3 V _{p-p}	300	400	500	250	400	600	
Gain 2 (Note 3)			90	100	110	80	100	120	
Gain 3 (Note 4)			9.0	10	11	8.0	10	12	
Bandwidth									
Gain 1	2			40			40		MHz
Gain 2				90			90		MHz
Gain 3				120			120		MHz
Rise Time									
Gain 1	2	V _{OUT} = 1 V _{p-p}		10.5			10.5		ns
Gain 2				4.5	10		4.5	12	ns
Gain 3				2.5			2.5		ns
Propagation Delay									
Gain 1	2	V _{OUT} = 1 V _{p-p}		7.5			7.5		ns
Gain 2				6.0	10		6.0	10	ns
Gain 3				3.6			3.6		ns
Input Resistance									
Gain 1				4.0		4.0		kΩ	
Gain 2			20	30		30		kΩ	
Gain 3				250		250		kΩ	
Input Capacitance		Gain 2		2.0		2.0		pF	
Input Offset Current				0.4	3.0		0.4	5.0	μA
Input Bias Current				9.0	20		9.0	30	μA
Input Noise Voltage		BW = 1 kHz to 10 MHz		12			12		μV _{rms}
Input Voltage Range	1		±1.0			±1.0			V
Common Mode Rejection Ratio									
Gain 2	1	V _{CM} = ±1V f ≤ 100 kHz	60	86		60	86		dB
Gain 2		V _{CM} = ±1V f = 5 MHz	60			60			dB
Supply Voltage Rejection Ratio									
Gain 2	1	ΔV _S = ±0.5V	50	70		50	70		dB
Output Offset Voltage									
Gain 1	1	R _L = ∞		0.6	1.5		0.6	1.5	V
Gain 2 and 3				0.35	1.0		0.35	1.5	V
Output Common Mode Voltage	1	R _L = ∞	2.4	2.9	3.4	2.4	2.9	3.4	V
Output Voltage Swing	1	R _L = 2k	3.0	4.0		3.0	4.0		
Output Sink Current			2.5	3.6		2.5	3.6		mA
Output Resistance				20			20		Ω
Power Supply Current	1	R _L = ∞		18	24		18	24	mA

Electrical Characteristics (Continued)

(The following specifications apply for $-55^{\circ}\text{C} < T_A < 125^{\circ}\text{C}$ for the LM733 and $0^{\circ}\text{C} < T_A < 70^{\circ}\text{C}$ for the LM733C, $V_S = \pm 6.0\text{V}$)

Characteristics	Test Circuit	Test Conditions	LM733			LM733C			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Differential Voltage Gain Gain 1 Gain 2 Gain 3	1	$R_L = 2\text{ k}\Omega$, $V_{OUT} = 3\text{ V}_{p-p}$	200 80 8.0		600 120 12.0	250 80 8.0		600 120 12.0	
Input Resistance Gain 2			8			8			$\text{k}\Omega$
Input Offset Current					5			6	μA
Input Bias Current					40			40	μA
Input Voltage Range	1		± 1			± 1			V
Common Mode Rejection Ratio Gain 2	1	$V_{CM} = \pm 1\text{ V}$ $f \leq 100\text{ kHz}$	50			50			dB
Supply Voltage Rejection Ratio Gain 2	1	$\Delta V_S = \pm 0.5\text{ V}$	50			50			dB
Output Offset Voltage Gain 1 Gain 2 and 3	1	$R_L = \infty$			1.5 1.2			1.5 1.5	V V
Output Voltage Swing	1	$R_L = 2\text{ k}\Omega$	2.5			2.8			V_{pp}
Output Sink Current			2.2			2.5			mA
Power Supply Current	1	$R_L = \infty$			27			27	mA

Note 1: The maximum junction temperature of the LM733 is 150°C , while that of the LM733C is 100°C . For operation at elevated temperatures devices in the TO-100 package must be derated based on a thermal resistance of $150^{\circ}\text{C}/\text{W}$ junction to ambient or $45^{\circ}\text{C}/\text{W}$ junction to case. Thermal resistance of the dual-in-line package is $90^{\circ}\text{C}/\text{W}$.

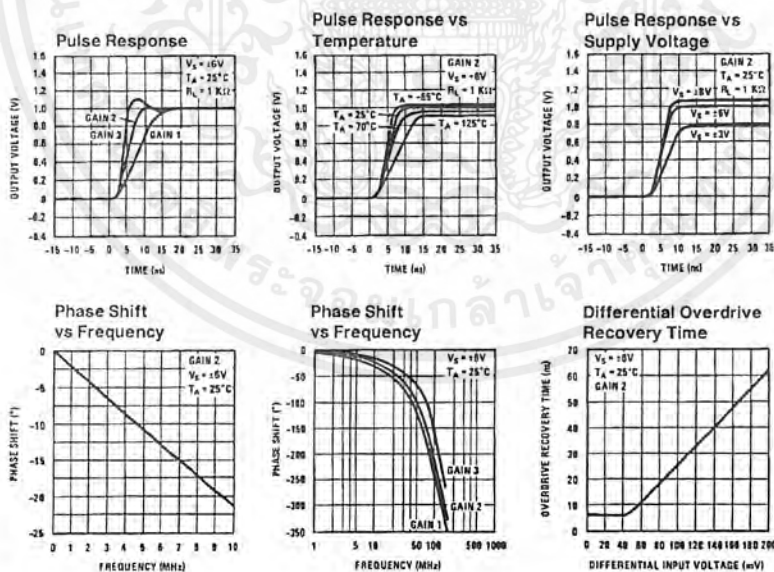
Note 2: Pins G1A and G1B connected together.

Note 3: Pins G2A and G2B connected together.

Note 4: Gain select pins open.

Note 5: Refer to RETS733X drawing for specifications of LM733H version.

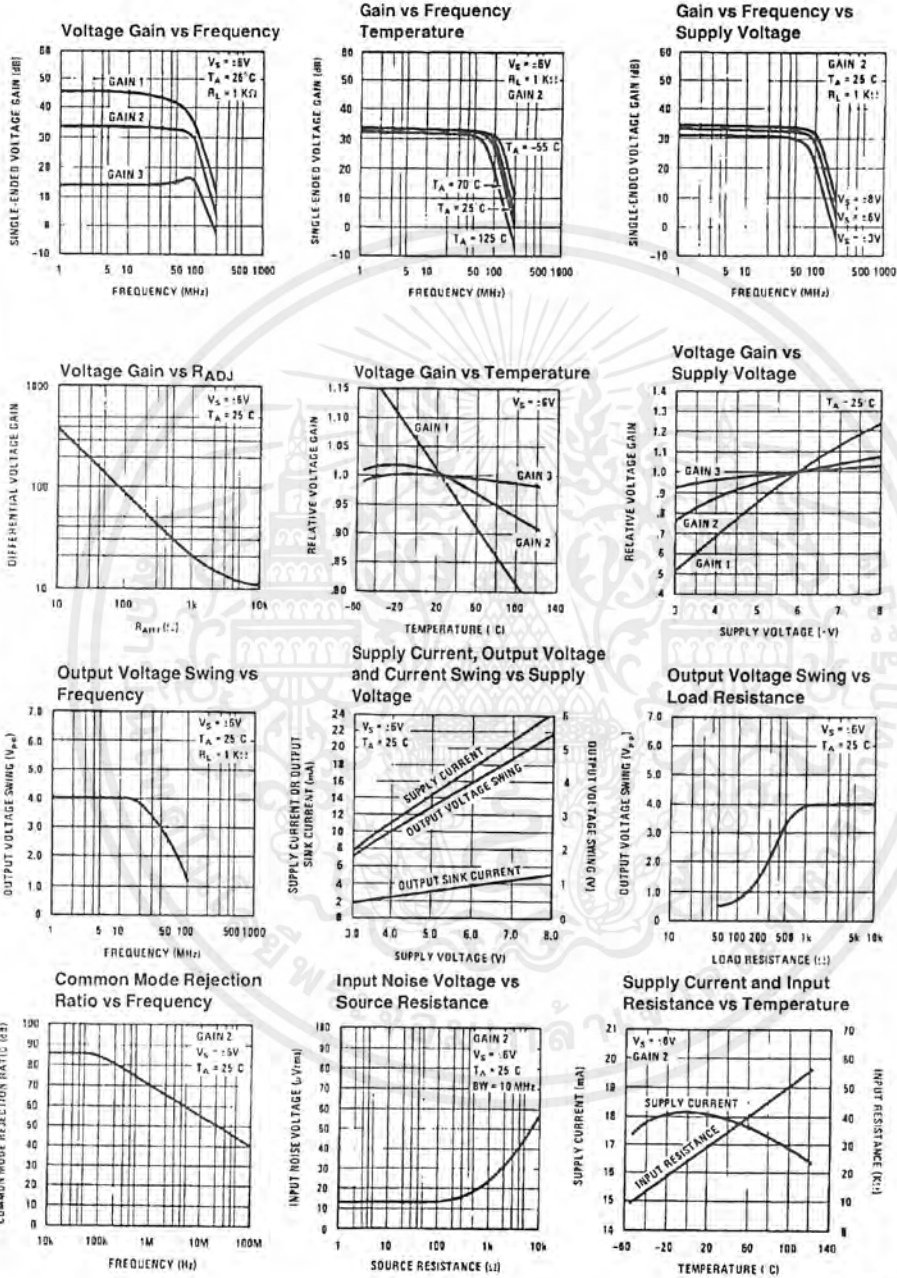
Typical Performance Characteristics



TL/H/7865-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

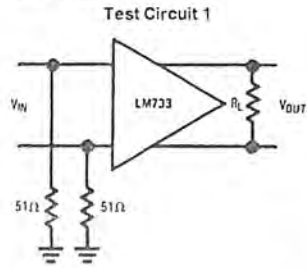
Typical Performance Characteristics (Continued)



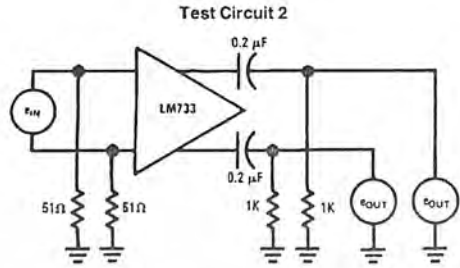
TL/H/7866-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test Circuits

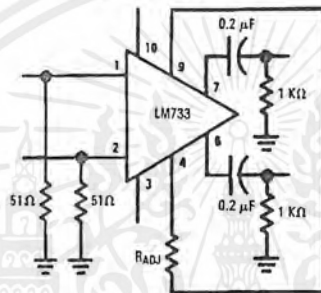


TL/H/7866-3



TL/H/7866-4

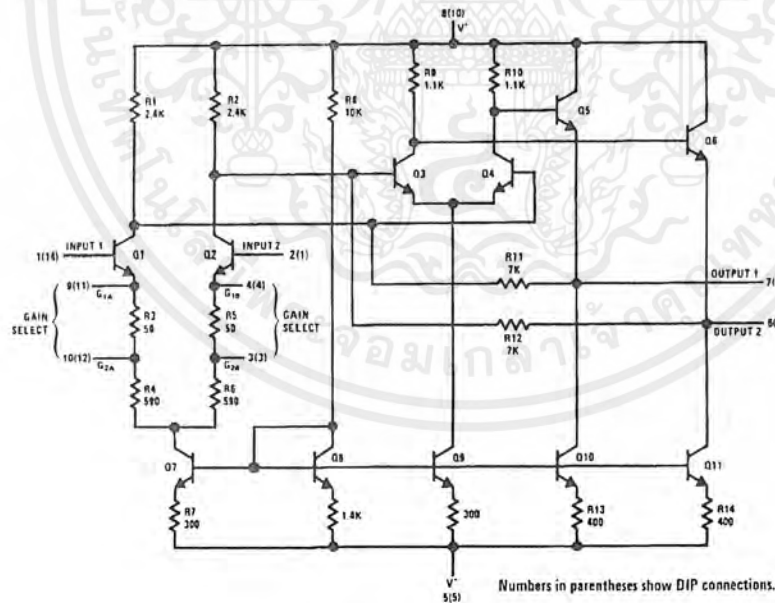
Voltage Gain Adjust Circuit



TL/H/7866-5

$V_S = 6V, T_A = 25^\circ C$
(Pin numbers apply to TO-5 package)

Schematic Diagram



Numbers in parentheses show DIP connections.

TL/H/7866-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LF351 Wide Bandwidth JFET Input Operational Amplifier

General Description

The LF351 is a low cost high speed JFET input operational amplifier with an internally trimmed input offset voltage (BI-FET II™ technology). The device requires a low supply current and yet maintains a large gain bandwidth product and a fast slew rate. In addition, well matched high voltage JFET input devices provide very low input bias and offset currents. The LF351 is pin compatible with the standard LM741 and uses the same offset voltage adjustment circuitry. This feature allows designers to immediately upgrade the overall performance of existing LM741 designs.

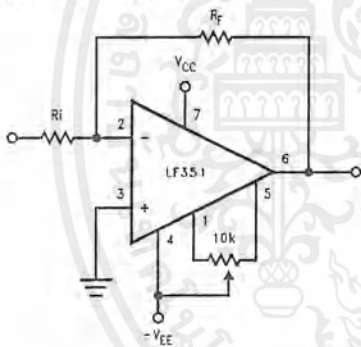
The LF351 may be used in applications such as high speed integrators, fast D/A converters, sample-and-hold circuits and many other circuits requiring low input offset voltage, low input bias current, high input impedance, high slew rate and wide bandwidth. The device has low noise and offset voltage drift, but for applications where these requirements are critical, the LF356 is recommended. If maximum supply

current is important, however, the LF351 is the better choice.

Features

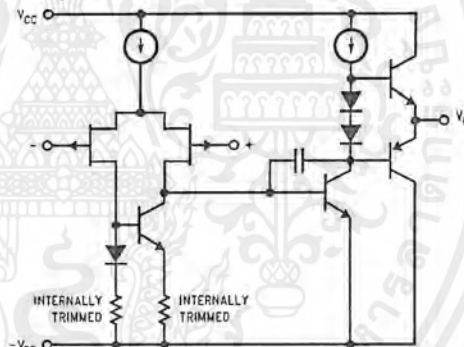
- Internally trimmed offset voltage 10 mV
- Low input bias current 50 pA
- Low input noise voltage 25 nV/√Hz
- Low input noise current 0.01 pA/√Hz
- Wide gain bandwidth 4 MHz
- High slew rate 13 V/μs
- Low supply current 1.8 mA
- High input impedance 10¹²Ω
- Low total harmonic distortion $A_V = 10$, $R_L = 10k$, $V_O = 20$ Vp-p, BW = 20 Hz–20 kHz < 0.02%
- Low 1/f noise corner 50 Hz
- Fast settling time to 0.01% 2 μs

Typical Connection



TL/H/5648-11

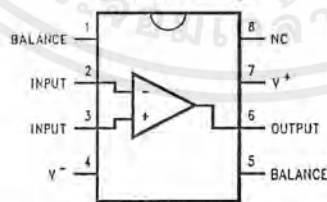
Simplified Schematic



TL/H/5648-12

Connection Diagrams

Dual-In-Line Package



TL/H/5648-13

Order Number LF351M or LF351N
See NS Package Number M08A or N08E

Absolute Maximum Ratings

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

Supply Voltage	± 18V
Power Dissipation (Notes 1 and 6)	670 mW
Operating Temperature Range	0°C to +70°C
T _{J(MAX)}	115°C
Differential Input Voltage	± 30V
Input Voltage Range (Note 2)	± 15V
Output Short Circuit Duration	Continuous
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
Lead Temp. (Soldering, 10 sec.)	
Metal Can	300°C
DIP	260°C

θ _{JA}		
N Package		120°C/W
M Package		TBD

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

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

ESD rating to be determined.

DC Electrical Characteristics (Note 3)

Symbol	Parameter	Conditions	LF351			Units
			Min	Typ	Max	
V _{OS}	Input Offset Voltage	R _S = 10 kΩ, T _A = 25°C Over Temperature		5	10 13	mV mV
ΔV _{OS} /ΔT	Average TC of Input Offset Voltage	R _S = 10 kΩ		10		μV/°C
I _{OS}	Input Offset Current	T _J = 25°C, (Notes 3, 4) T _J ≤ 70°C		25	100 4	pA nA
I _B	Input Bias Current	T _J = 25°C, (Notes 3, 4) T _J ≤ ±70°C		50	200 8	pA nA
R _{IN}	Input Resistance	T _J = 25°C		10 ¹²		Ω
A _{VOL}	Large Signal Voltage Gain	V _S = ±15V, T _A = 25°C V _O = ±10V, R _L = 2 kΩ Over Temperature	25	100		V/mV V/mV
V _O	Output Voltage Swing	V _S = ±15V, R _L = 10 kΩ	±12	±13.5		V
V _{CM}	Input Common-Mode Voltage Range	V _S = ±15V	±11	+15 -12		V V
CMRR	Common-Mode Rejection Ratio	R _S ≤ 10 kΩ	70	100		dB
PSRR	Supply Voltage Rejection Ratio	(Note 5)	70	100		dB
I _S	Supply Current			1.8	3.4	mA

AC Electrical Characteristics (Note 3)

Symbol	Parameter	Conditions	LF351			Units
			Min	Typ	Max	
SR	Slew Rate	$V_S = \pm 15V, T_A = 25^\circ C$		13		V/ μs
GBW	Gain Bandwidth Product	$V_S = \pm 15V, T_A = 25^\circ C$		4		MHz
e_n	Equivalent Input Noise Voltage	$T_A = 25^\circ C, R_S = 100\Omega, f = 1000 \text{ Hz}$		25		nV/ \sqrt{Hz}
i_n	Equivalent Input Noise Current	$T_J = 25^\circ C, f = 1000 \text{ Hz}$		0.01		pA/ \sqrt{Hz}

Note 1: For operating at elevated temperature, the device must be derated based on the thermal resistance, θ_{JA} .

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

Note 3: These specifications apply for $V_S = \pm 15V$ and $0^\circ C \leq T_A \leq +70^\circ C$. V_{OS} , I_B and I_{OS} are measured at $V_{CM} = 0$.

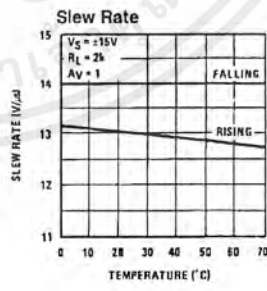
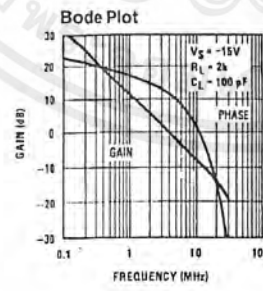
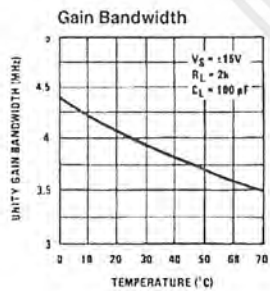
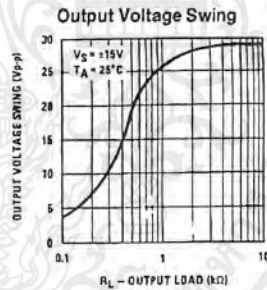
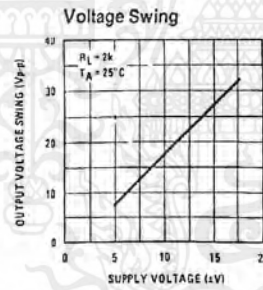
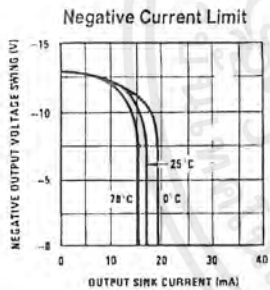
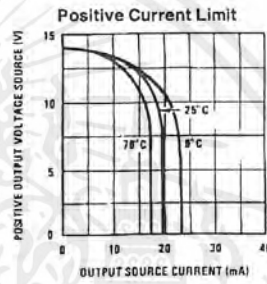
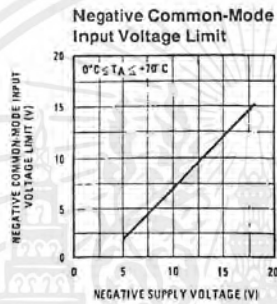
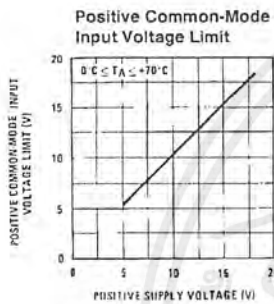
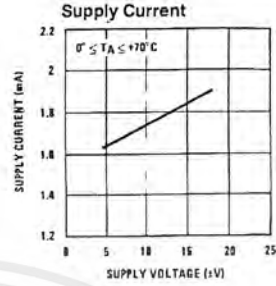
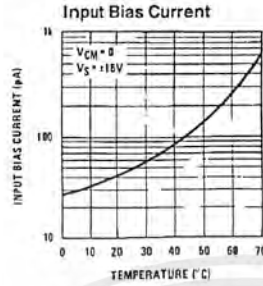
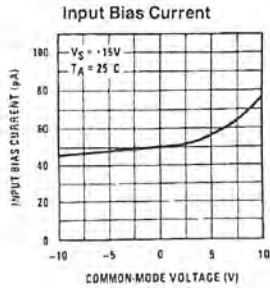
Note 4: The input bias currents are junction leakage currents which approximately double for every $10^\circ C$ increase in the junction temperature, T_J . Due to the limited production test time, the input bias currents measured are correlated to junction temperature. In normal operation the junction temperature rises above the ambient temperature as a result of internal power dissipation, P_D . $T_J = T_A + \theta_{JA} P_D$ where θ_{JA} is the thermal resistance from junction to ambient. Use of a heat sink is recommended if input bias current is to be kept to a minimum.

Note 5: Supply voltage rejection ratio is measured for both supply magnitudes increasing or decreasing simultaneously in accordance with common practice. From $\pm 15V$ to $\pm 5V$.

Note 6: Max. Power Dissipation is defined by the package characteristics. Operating the part near the Max. Power Dissipation may cause the part to operate outside guaranteed limits.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

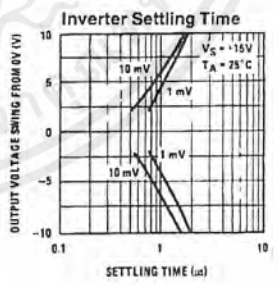
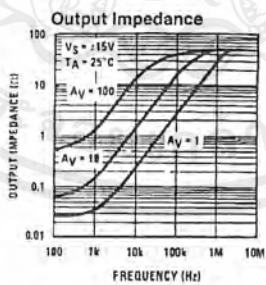
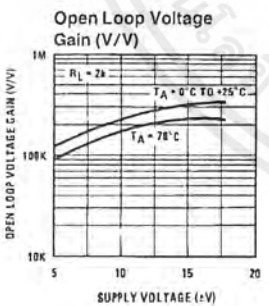
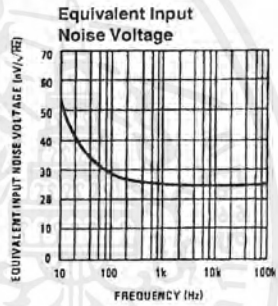
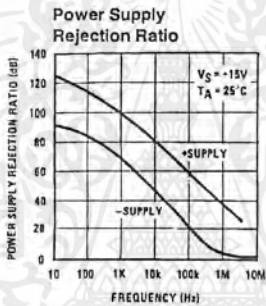
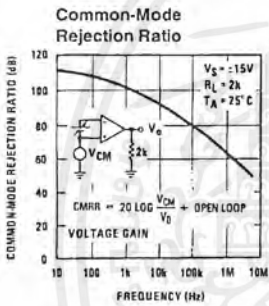
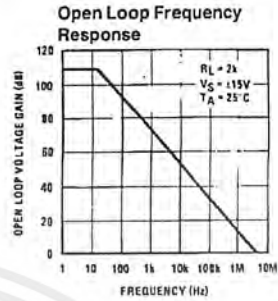
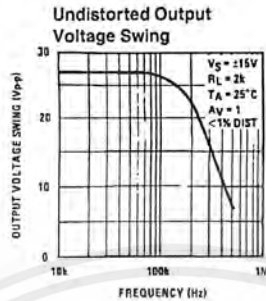
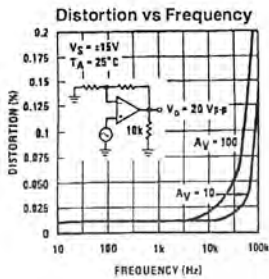
Typical Performance Characteristics



TL/H/5648-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

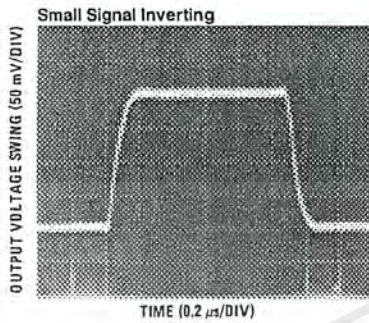
Typical Performance Characteristics (Continued)



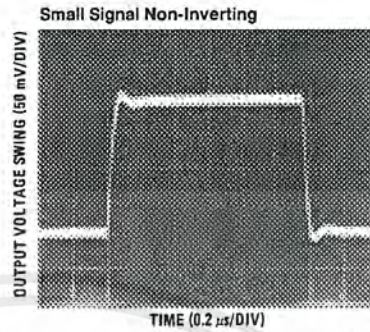
TL/H/5648-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

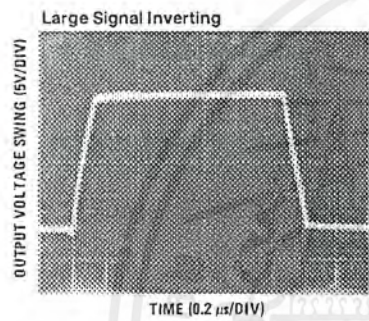
Pulse Response



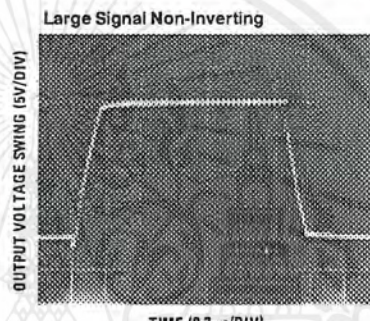
TL/H/5648-4



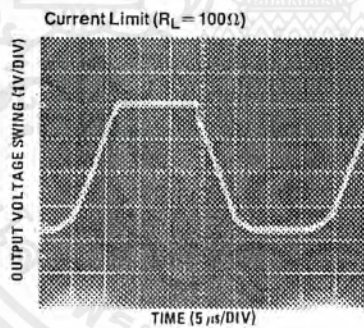
TL/H/5648-5



TL/H/5648-6



TL/H/5648-7



TL/H/5648-8

Application Hints

The LF351 is an op amp with an internally trimmed input offset voltage and JFET input devices (BI-FET II™). These JFET's have large reverse breakdown voltages from gate to source and drain eliminating the need for clamps across the inputs. Therefore, large differential input voltages can easily be accommodated without a large increase in input current. The maximum differential input voltage is independent of the supply voltages. However, neither of the input voltages should be allowed to exceed the negative supply as this will

cause large currents to flow which can result in a destroyed unit.

Exceeding the negative common-mode limit on either input will force the output to a high state, potentially causing a reversal of phase to the output.

Exceeding the negative common-mode limit on both inputs will force the amplifier output to a high state. In neither case does a latch occur since raising the input back within the

Application Hints (Continued)

common-mode range again puts the input stage and thus the amplifier in a normal operating mode.

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

The amplifier will operate with a common-mode input voltage equal to the positive supply; however, the gain bandwidth and slew rate may be decreased in this condition. When the negative common-mode voltage swings to within 3V of the negative supply, an increase in input offset voltage may occur.

The LF351 is biased by a zener reference which allows normal circuit operation on $\pm 4V$ power supplies. Supply voltages less than these may result in lower gain bandwidth and slew rate.

The LF351 will drive a 2 k Ω load resistance to $\pm 10V$ over the full temperature range of 0°C to +70°C. If the amplifier is forced to drive heavier load currents, however, an increase in input offset voltage may occur on the negative voltage swing and finally reach an active current limit on both positive and negative swings.

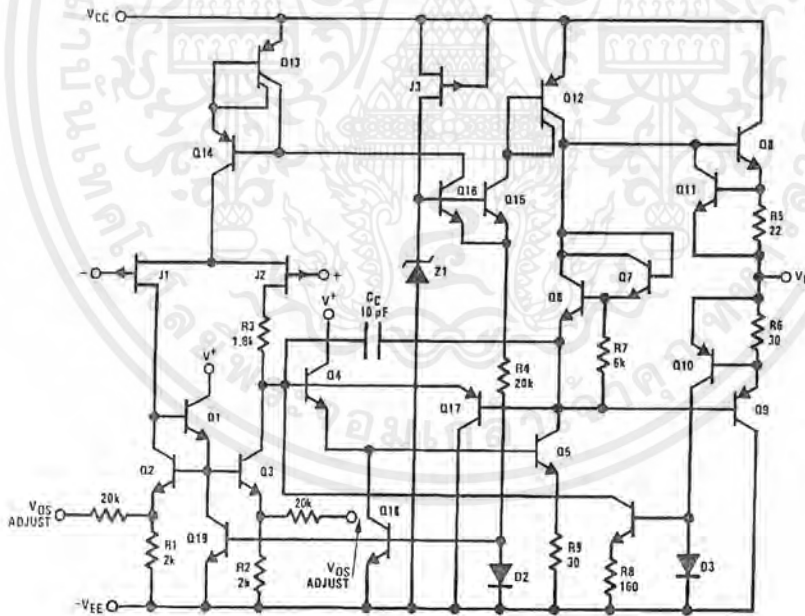
Precautions should be taken to ensure that the power supply for the integrated circuit never becomes reversed in polarity or that the unit is not inadvertently installed back-

wards in a socket as an unlimited current surge through the resulting forward diode within the IC could cause fusing of the internal conductors and result in a destroyed unit.

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

A feedback pole is created when the feedback around any amplifier is resistive. The parallel resistance and capacitance from the input of the device (usually the inverting input) to AC ground set the frequency of the pole. In many instances the frequency of this pole is much greater than the expected 3 dB frequency of the closed loop gain and consequently there is negligible effect on stability margin. However, if the feedback pole is less than approximately 6 times the expected 3 dB frequency a lead capacitor should be placed from the output to the input of the op amp. The value of the added capacitor should be such that the RC time constant of this capacitor and the resistance it parallels is greater than or equal to the original feedback pole time constant.

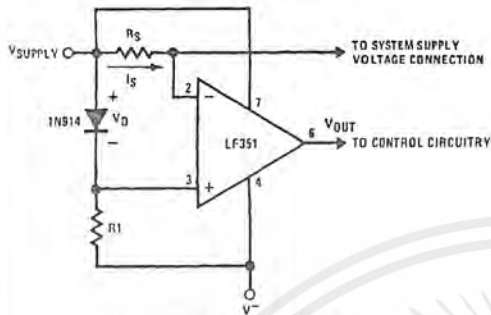
Detailed Schematic



TL/H/564B-9

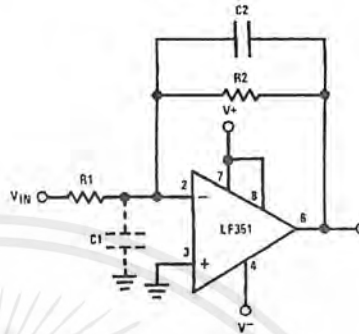
Typical Applications

Supply Current Indicator/Limiter



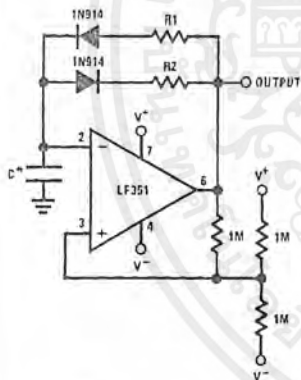
* V_{OUT} switches high when $R_S I_S > V_D$

Hi- Z_{IN} Inverting Amplifier



Parasitic input capacitance $C_1 \approx (3 \text{ pF for LF351 plus any additional layout capacitance})$ interacts with feedback elements and creates undesirable high frequency pole. To compensate, add C_2 such that: $R_2 C_2 = R_1 C_1$.

Ultra-Low (or High) Duty Cycle Pulse Generator



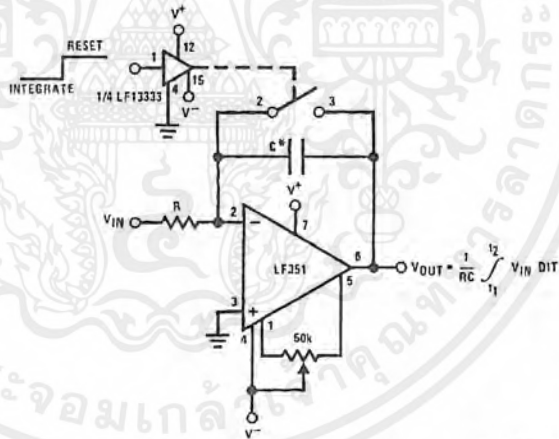
$$* t_{\text{OUTPUT HIGH}} \approx R_1 C_1 \ln \frac{4.8 - 2V_S}{4.8 - V_S}$$

$$* t_{\text{OUTPUT LOW}} \approx R_2 C_1 \ln \frac{2V_S - 7.8}{V_S - 7.8}$$

where $V_S = V^+ + |V^-|$

* low leakage capacitor

Long Time Integrator



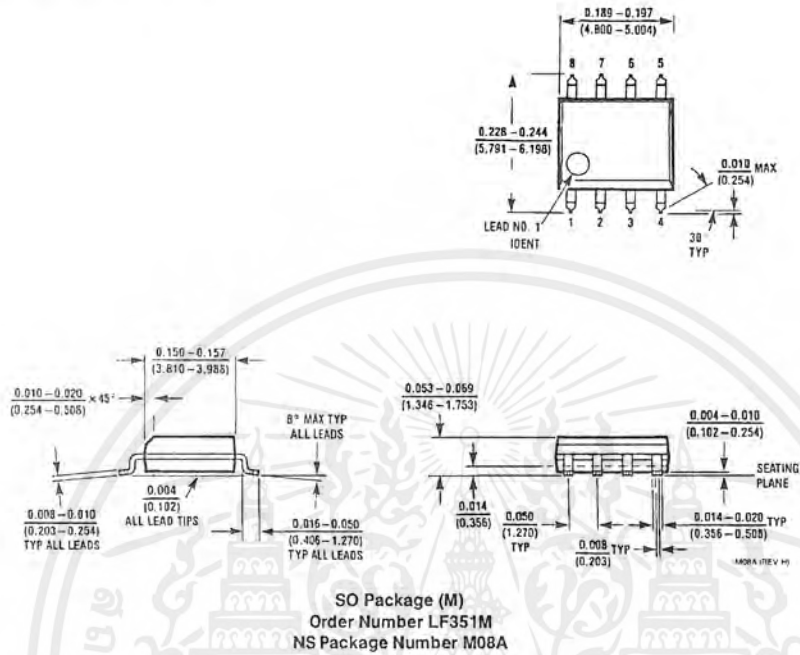
* Low leakage capacitor

* 50k pot used for less sensitive V_{OS} adjust

TL/H/5648-10

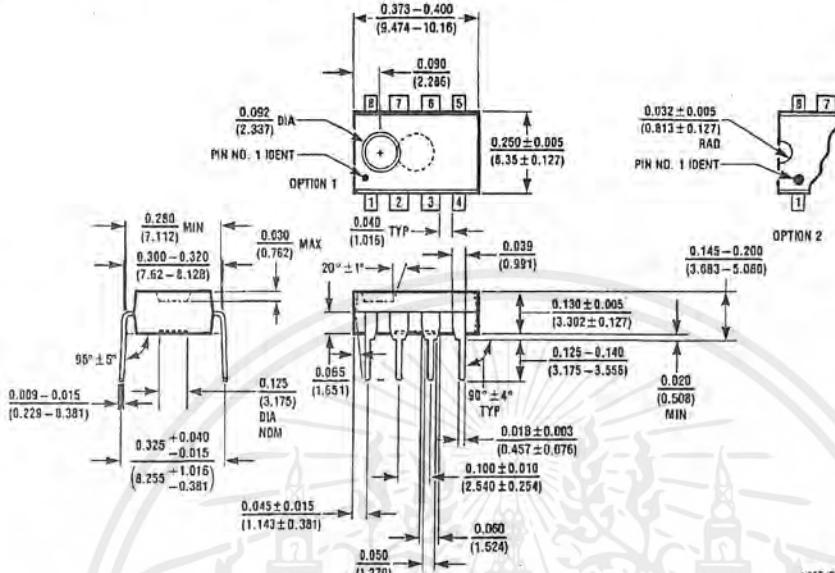
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Physical Dimensions inches (millimeters)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Physical Dimensions inches (millimeters) (Continued)



Molded Dual-In-Line Package (N)
Order Number LF351N
NS Package Number N08E

LIFE SUPPORT POLICY

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform, when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

National Semiconductor Corporation
1111 West Bardin Road
Arlington, TX 76017
Tel: 1(800) 272-9959
Fax: 1(800) 737-7018

National Semiconductor Europe
Fax: (+49) 0-180-530 85 86
Email: crjwge@tevm2.nsc.com
Deutsch Tel: (+49) 0-180-530 85 85
English Tel: (+49) 0-180-532 78 32
Français Tel: (+49) 0-180-532 93 58
Italiano Tel: (+49) 0-180-534 16 80

National Semiconductor Hong Kong Ltd.
13th Floor, Straight Block,
Ocean Centre, 5 Canton Rd,
Tsimshatsui, Kowloon
Hong Kong
Tel: (852) 2737-1600
Fax: (852) 2736-0060

National Semiconductor Japan Ltd.
Tel: 81-043-239-2309
Fax: 81-043-239-2408

National does not assume any responsibility for use of any circuitry described, no circuit patent licenses are implied and National reserves the right at any time without notice to change said circuitry and specifications.

บรรณานุกรม

- (1) Rudolf F. Graf & William Sheets., "Video Scrambling & Descrambling for Satellit & Cable TV" 1st ed., Indiana : HOWARD W. SAMS & COMPANY,1987
- (2) Frank Baylin, Richard Maddox, John McCormac, "World Satellite TV and Scrambling Methods" 2nd ed., Colorado : Baylin Publications,1991
- (3) Ramakant A. Gayakwad., "Op-Amps and Linear Integrated Circuits" 2nd ed., New Jersey : Prentice-Hall International,Inc.,1988
- (4) ศศ.อภิรักษ์ มัณยนาถ, "การสื่อสารเส้นใยแสง" พิมพ์ครั้งที่ 5, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร,2537

