รายงานการวิจัย

ชุดสื่อการสอนการส่งสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

Video and Audio Transmission via Fiber Optic Instructional Media Set

ธนัสถ์ นนทพุทธ	Thanat Nonthaputha
ศักดิ์ชัย ตันติวิวัทน์	Sugchai Tantiviwat
กรภัทร เฉลิมวงศ์	Korapat Chalermwong
วรรัฐ ลิ่มศิริวงศ์	Worrarat Limsiriwong

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
งบประมาณรายได้ประจำปี พ.ศ. 2557

ชุดสื่อการสอนการส่งสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์นี้เป็นส่วนหนึ่งโครงการวิจัย (Research project)
ประกอบการเสนอของบประมาณ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 (เงินรายได้)
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ชุดสื่อการสอนการส่งสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

ธนัสถ์ นนทพุทธ[1] ศักดิ์ชัย ตันติวิวัทน์[2] นายกรภัทร เฉลิมวงศ์[1] วรรัฐ ลิ่มศิริวงศ์[3]

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาและสร้างชุดสื่อการสอนการส่งสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งได้นำเอาสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงจากสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องเล่นวีซีดี โดยสัญญาณภาพที่มีขนาดแบนด์วิดท์กว้างมาก สามารถส่งผ่านได้เลย ส่วนสัญญาณเสียงที่มีขนาดแบนด์วิดท์แคบนั้นจะทำการมอดูเลตทางความถี่และผ่านวงจรการขยาย หลังจากนั้นแล้วจะรวมสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงเข้าด้วยกัน ส่งต่อเข้าวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสงเพื่อส่งผ่านเข้าเส้นใยแก้วนำแสงไปยังภาครับ ภาครับเมื่อรับสัญญาณเข้ามาผ่านวงจรแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า หลังจากนั้นเข้าสู่วงจรกรองสัญญาณเพื่อแยกสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงออกจากกัน สัญญาณเสียงจะทำการดีมอดูเลตทางความถี่กลับเช่นเดิม และทำการขยายสัญญาณทั้งสองให้ดีขึ้น เหมือนกับทางด้านส่ง แสดงผลผ่านจอแอลซีดี ผลที่ได้คือคุณภาพของสัญญาณเสียงและสัญญาณภาพอยู่ในระดับดีมาก เหมือนกับสัญญาณทางด้านส่ง

คำสำคัญ: สัญญาณภาพ สัญญาณเสียง เส้นใยแก้วนำแสง

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
[2] สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
[3] สาขาวิชาเทคโนโลยีสื่อสารมวลชน คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

Video and Audio Transmission via Fiber Optic Instructional Media Set

Thanat Nonthaputha[1] Sugchai Tantiviwat[2] Korapat Chalermwong[1] Worrarat Limsiriwong[3]

Abstract

This project is a study and a construct of video and audio transmission via fiber optic instructional media set which has taken the video and audio signal from the VCD. The video signal is a wide bandwidth it can pass but the audio signal whose size will be a narrow bandwidth with frequency modulation it through the amplifier and mixes their together. The signal was forwarding to electrical to optical converter, therefore, the optical transmission via fiber optic to receiver, then it through optical to electrical converter, it will be electrical signal and however, the signal separates by filtering are the video and audio signal. The frequency demodulation will be used for audio signal to amplifier with video signal simultaneously. The signals display on LCD screen, the result is as same as the original from VCD and high quality of video and audio.

Keyword : video, audio, optical fiber

[1] Department of Electronic and Telecommunication Engineering, Faculty of Industrial Education and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya

[2] Department of Mechatronic Engineering, Faculty of Industrial Education and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya

[3] Department of Mass Communication, Faculty of Industrial Education and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยีเป็นอย่างสูง ในการจัดสรรงบประมาณเงินรายได้ ประจำ 2557 สำหรับการจัดทำการวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวก เป็นกำลังใจพร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆในการทำวิจัยในครั้งนี้ ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัย

กันยายน 2557

คำนำ

รายงานผลการวิจัย เรื่อง ชุดสื่อการสอนการส่งสัญญาณภาพและเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง เพื่อศึกษาเทคโนโลยีการส่งข้อมูลทางแสง โดยคณะผู้วิจัยสร้างชุดสื่อการสอนการส่งและรับสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงจากเครื่องเล่นวีซีดี แสดงผลผ่านจอแสดงผลหรือทีวี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหลักการส่งสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง หลักการการมอดูเลตและดีมอดูเลต ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติอุปกรณ์กำเนิดแสงและอุปกรณ์รับแสง ออกแบบและสร้างเครื่องส่งสัญญาณภาพและเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง สร้างชุดสื่อการสอนการส่งสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

คณะผู้วิจัยโครงการใคร่ขอขอบพระคุณ อาจารย์ขจรศักดิ์ พงศ์ธนา คณบดีคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี อาจารย์วิชาญ เพชรมณี รองคณบดีฝ่ายวิชาการและหัวหน้าสาขาไฟฟ้า นางสาวฤทัยรัตน์ สุวรรณเรืองศรี ที่ได้ช่วยให้คำชี้แนะ อนุเคราะห์ข้อมูล และช่วยในการประสานงาน ทำให้การวิจัยเป็นไปอย่างราบรื่น ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ได้มาให้ความคิดเห็นที่มีคุณค่าแก่งานวิจัยนี้มาโดยตลอด คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า รายงานผลการวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจที่จะนำไปพัฒนาการเรียนการสอนให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ในอนาคต

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญ (ต่อ)	จ
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญรูป (ต่อ)	ช
สารบัญตาราง	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	2
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
2.2 ฟิสิกส์ของแสง	5
2.3 เส้นใยแก้วนำแสง	10
2.4 การผิดรูปของสัญญาณแสงของเส้นใยแก้ว	13
2.5 รูปแบบพื้นฐานการสื่อสารข้อมูลทางแสง	16
2.6 ภาคส่งสัญญาณแสง	17
2.7 ภาครับสัญญาณแสง	20
2.8 วงจรกำเนิดความถี่อ้าง (Phase Locked loop)	23
2.9 การมอดูเลต (Modulation)	24
2.10 การดีมอดูเลต (Demodulation)	26
2.11 วงจรรวมสัญญาณแบบพาสซีฟ (Passive Summing)	27
2.12 วงจรขับสัญญาณแสง	28
2.13 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)	32
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	34
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	34
3.2 การออกแบบวงจรภาคส่ง (Transmitter Circuits Design)	35
3.3 การออกแบบวงจรภาครับ (Receiver Circuits Design)	39
3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	42

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	47
4.1 ผลการทดสอบสัญญาณทางภาคส่ง	47
4.2 ผลการทดสอบสัญญาณทางภาครับ	51
4.3 ผลการทดสอบการส่งสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแก้ว	55
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	57
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	57
5.2 ข้อเสนอแนะ	57
5.3 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข	58
บรรณานุกรม	59

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	วงจรมอดูเลเตอร์ (ไอซีเบอร์ NE654)	2
2.2	วงจรขยายสัญญาณภาพ	3
2.3	วงจรรวมสัญญาณแบบพาสซีฟ	3
2.4	วงจรเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสง	4
2.5	วงจรเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า	4
2.6	วงจรขยายสัญญาณแคสเคด 3 สเตจ	5
2.7	วงจรเอฟเอ็มดีมอดูเลตเตอร์	6
2.8	สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารวมทั้งคลื่นแสง	6
2.9	สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของคลื่นแสงโดยแสดงโพลาไรเซชันของแสง	7
2.10	การเกิดรังสีสะท้อนและรังสีหักเหจากรังสีตกกระทบ	8
2.11	การเกิดมุมวิกฤตระหว่างสองตัวกลางเมื่อ ($n_1 > n_2$)	9
2.12	โครงสร้างของเส้นใยแก้ว	10
2.13	โครงสร้างและรูปแบบโหมดการเดินทางของเส้นใยแก้ว	12
2.14	การส่งข้อมูลแสงแบบ (ก) แอนะลอก และ (ข) แบบดิจิตอล	14
2.15	กำลังงานของแสงหรือความเข้มแสงในระบบเส้นใยแก้ว	14
2.16	การบานออกของสัญญาณพัลส์ในระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแก้ว	15
2.17	สัญญาณแสงอิมพัลส์จะบานออกเมื่อเดินทางในเส้นใยแก้วชนิด SI-MM	16
2.18	ระบบพื้นฐานการสื่อสารด้วยเส้นใยแก้ว	17
2.19	ตัวอย่างโครงสร้างของแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นแอลอีดี	18
2.20	โครงสร้างและระดับพลังงานของไดโอดเปล่งแสง	19
2.21	วงจรขับสัญญาณแอลอีดีแบบแอนะลอก	20
2.22	ความยาวคลื่นในการรับแสงของอุปกรณ์รับแสงแต่ละชนิด	21
2.23	หลักการทำงานของพินโฟโตไดโอด	22
2.24	บล็อกไดอะแกรมของเฟสล็อกลูป	23
2.25	การมอดูเลตทางความถี่	24
2.26	การต่อวงจรที่ใช้ในการออกแบบของวงจร FM Modulator	26
2.27	การต่อวงจรที่ใช้ในการออกแบบวงจร FM Demodulator	27
2.28	วงจรรวมสัญญาณแบบพาสซีฟ	28
2.29	วงจรขับสัญญาณแอลอีดีแบบแอนะลอก	29
2.30	วงจรการทำงานของโฟโตไดโอด	30
2.31	วงจรโฟโตดีเทกเตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์	31
2.32	การตอบสนองความถี่ต่ำผ่าน	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.33	กราฟผลการตอบสนองความถี่ต่ำผ่าน	33
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน	34
3.2	บล็อกไดอะแกรมทางด้านภาคส่ง	35
3.3	วงจรมอดูเลตทางความถี่	36
3.4	วงจรรวมสัญญาณแบบพาสซีฟ	37
3.5	วงจรเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสง	37
3.6	บล็อกไดอะแกรมทางด้านภาครับ	39
3.7	วงจรเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า (O/E Convertor)	39
3.8	วงจรขยายสัญญาณ	40
3.9	วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	40
3.10	วงจรขยายความถี่วิทยุ	41
3.11	วงจรเอฟเอ็มดีมอดูเลเตอร์	42
3.12	ชุดส่งสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง	42
3.13	ชุดรับสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง	43
3.14	เส้นใยแก้วนำแสงชนิด Graded –Index ยาวประมาณ 5 เมตร	43
3.15	เครื่องเล่นดีวีดีหรือวีซีดี	43
3.16	ออสซิลโลสโคป	44
3.17	จอแสดงผล (เครื่องรับโทรทัศน์)	44
3.18	การต่ออุปกรณ์ต่างๆ	44
3.19	วงจรรวมภาคส่ง (Transmitter Circuits)	45
3.20	วงจรรวมภาครับ (Receiver Circuits)	46
4.1	บล็อกไดอะแกรมจุดวัดสัญญาณต่างๆ ทางด้านภาคส่ง	47
4.2	อุปกรณ์ต่างๆ ภายในเครื่องส่ง	48
4.3	สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเครื่องเล่นดีวีดี ณ จุด TP 1	48
4.4	อุปกรณ์ต่างๆของวงจรเอฟเอ็มมอดูเลเตอร์	49
4.5	สัญญาณเสียงจากเครื่องเล่นดีวีดี ณ จุด TP 2	49
4.6	สัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตทางความถี่ ณ จุด TP 3	49
4.7	อุปกรณ์ต่างๆ ของวงจรรวมสัญญาณ	50
4.8	สัญญาณที่วัดได้ ณ จุด TP 4	50
4.9	อุปกรณ์ต่างๆ ของวงจรเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสง	51
4.10	สัญญาณที่ได้จากวงจรเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสง ณ จุด TP 5	51
4.11	บล็อกไดอะแกรมจุดวัดสัญญาณต่างๆ ทางด้านภาครับ	51
4.12	อุปกรณ์ต่างๆ ภายในเครื่องเครื่องรับ	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.13	อุปกรณ์ต่างๆ ของวงจรเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า	52
4.14	สัญญาณที่ได้จากวงจรเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า ณ จุด TP 6	53
4.15	อุปกรณ์ต่างๆ ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	53
4.16	สัญญาณที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ณ จุด TP 7	54
4.17	อุปกรณ์ต่างๆ ของวงจรขยายความถี่วิทยุ	54
4.18	สัญญาณของวงจรวงจรขยายความถี่วิทยุ ณ จุดทดสอบ TP 8	54
4.19	อุปกรณ์ต่างๆ ของวงจรดีมอดูเลตทางความถี่	55
4.20	การวัดสัญญาณที่ได้จากวงจรดีมอดูเลตทางความถี่ ณ จุด TP 9	55
4.21	สัญญาณภาพจากเครื่องเล่นดีวีดี	56
4.22	สัญญาณภาพเมื่อส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสง	56
4.23	สัญญาณภาพและสัญญาณเสียงเมื่อส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสง	56

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การแบ่งชนิดเส้นใยแก้วนำแสง	11
2.2	คุณสมบัติต่างๆ ของอุปกรณ์ปล่อยแสงแบบไดโอดเปล่งแสง	19
2.3	การเปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง	23

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การติดต่อสื่อสารนับว่าเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ในยุคปัจจุบัน ซึ่งเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารมีด้วยกันหลายวิธี ซึ่งการสื่อสารได้มีการพัฒนาอยู่ตลอดเวลา เช่น การสื่อสารผ่านโทรศัพท์ การสื่อสารผ่านอินเตอร์เน็ต การสื่อสารผ่านดาวเทียม เป็นต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าการส่งสัญญาณเป็นส่วนสำคัญ มีด้วยกัน 2 วิธี คือ การสื่อสารผ่านสายและการสื่อสารไร้สาย เทคโนโลยีการสื่อสารแบบผ่านสายนั้น ทองแดงถือว่าเป็นตัวนำที่ได้รับความนิยม แต่ด้วยข้อด้อยและขีดจำกัดของทองแดง ได้มีการพัฒนาสายส่งที่มีความก้าวหน้าที่สุดในปัจจุบันคือ การสื่อสารผ่านสายใยแก้วนำแสง (Fiber Optic) ซึ่งเป็นนวัตกรรมการสื่อสารทางแสงที่มีประสิทธิภาพสูงในการสื่อสารระยะไกล และได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแก้วนำแสงได้เป็นจำนวนมาก มีสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าน้อยมาก มีขนาดเล็กและเบา มีความปลอดภัยของข้อมูลสูง และมีค่าลดทอนต่ำ

ทางคณะผู้วิจัยจึงได้เห็นความสำคัญของเทคโนโลยีการสื่อสารทางแสง ได้จัดทำชุดสื่อการสอนการส่งสัญญาณภาพและเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง เพื่อศึกษาเทคโนโลยีการส่งข้อมูลทางแสงโดยคณะผู้วิจัยสร้างชุดสื่อการสอนการส่งและรับสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงจากเครื่องเล่นวีซีดีแสดงผลผ่านจอแสดงผลหรือทีวี

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการส่งสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

1.2.2 เพื่อศึกษาหลักการการมอดูเลตและดีมอดูเลต

1.2.3 เพื่อศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติอุปกรณ์กำเนิดแสงและอุปกรณ์รับแสง

1.2.4 เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องส่งสัญญาณภาพและเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

1.2.5 เพื่อสร้างชุดสื่อการสอนการส่งสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 สามารถส่งสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

1.3.2 สามารถรับสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถนำผลงานวิจัยไปตีพิมพ์เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ วารสารวิชาการในระดับชาติและระดับนานาชาติ เพื่อเผยแพร่และส่งเสริมให้นักวิจัยและผู้ที่สนใจนำผลการวิจัยไปใช้ในการพัฒนาหรือใช้ประโยชน์ต่อไป

1.4.2 สามารถใช้เป็นสื่อการเรียนสำหรับนักศึกษาในการวิเคราะห์ ออกแบบ ทดลอง และยังสามารถนำไปพัฒนาเป็นงานวิจัยต่อไปในอนาคต

บทที่ 2
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการออกแบบและสร้างชุดสื่อการสอนการส่งสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแก้ว ทางคณะผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องโดยจัดแบ่งข้อหัวตามลำดับต่อไปนี้

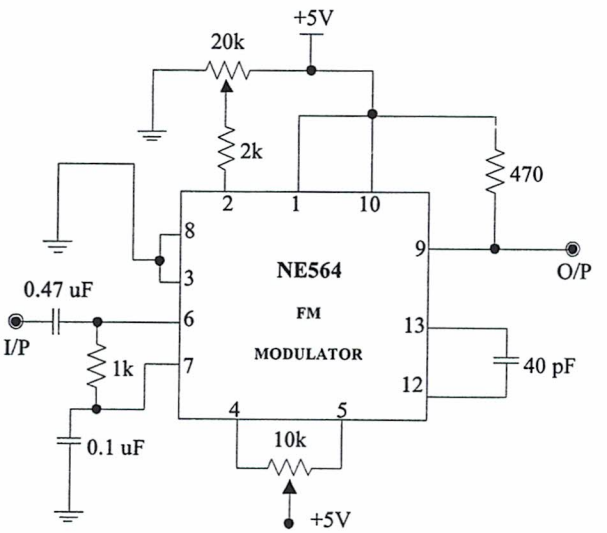
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การส่งสัญญาณภาพและเสียงผ่านเส้นใยแก้ว [1]

1) การสร้างวงจรมอดูเลตทางความถี่แบบเอฟเอ็มมอดูเลตเตอร์ที่ออกแบบจะใช้ไอซีเบอร์ NE564 ซึ่งเป็นไอซีเฟสล็อกลูป ซึ่งสามารถใช้ทำเป็นวงจรเอฟเอ็มมอดูเลเตอร์และใช้ขา 12 และ 13 เป็นตัวกำหนดค่าความถี่ฟรีรันนิ่งซึ่งจะใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวกำหนดความถี่ที่ต้องการและสามารถหาค่าของตัวเก็บประจุได้จากสูตรดังนี้

$$C_o \approx \frac{1}{C \cdot f_c} \quad \text{pF} \tag{1}$$

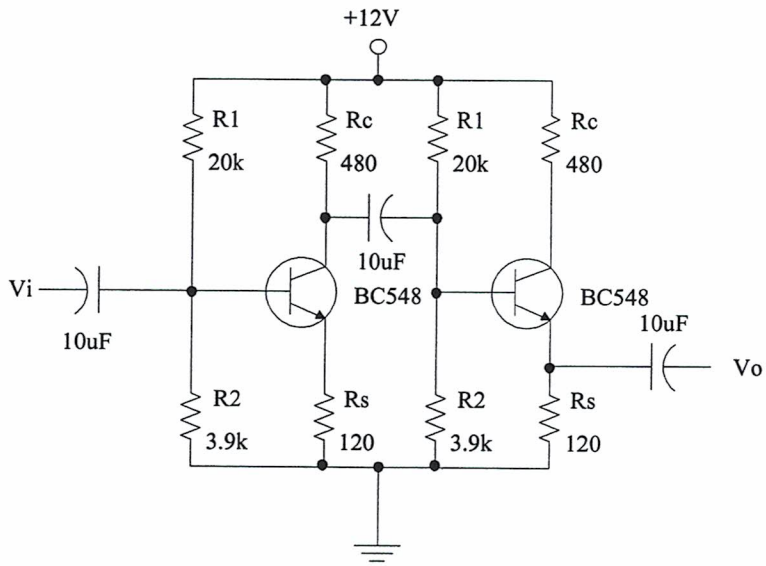
ส่วนที่ขา 4 และ 5 ใช้ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ขนาด 10 กิโลโอห์ม โดยที่ให้ขากลางของตัวต้านทานต่อไฟ DC +5V เพื่อใช้ในการปรับค่าความถี่ให้ได้ตามต้องการ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรมอดูเลเตอร์ (ไอซีเบอร์ NE654)

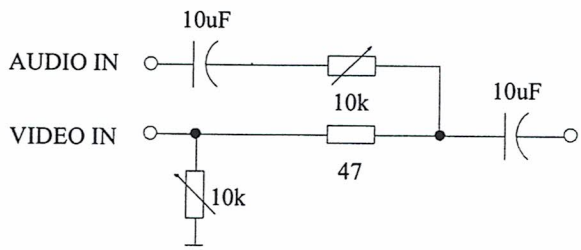
และที่ขา 2 ของไอซีป้อนกระแสไบอัสให้วงจรซึ่งจะมีค่าไม่ต่ำกว่า 200 ไมโครแอมป์ โดยใช้ความต้านทานปรับค่าได้ ขนาด 20 กิโลโอห์ม เป็นตัวจำกัดการไหลของกระแส ที่ขา 6 ป้อนสัญญาณอินพุตเข้ามาและที่ขา 9 เป็นสัญญาณเอาต์พุตมอดูเลเตอร์

2) การออกแบบภาคขยายสัญญาณภาพใช้วงจรคอมมอนคอลเล็คเตอร์หรืออิมิตเตอร์ฟอลโลเวอร์เป็นทางออกของวงจรภาคขยายสัญญาณภาพแบบวงจรแคสแคด 2 ภาค



รูปที่ 2.2 วงจรขยายสัญญาณภาพ

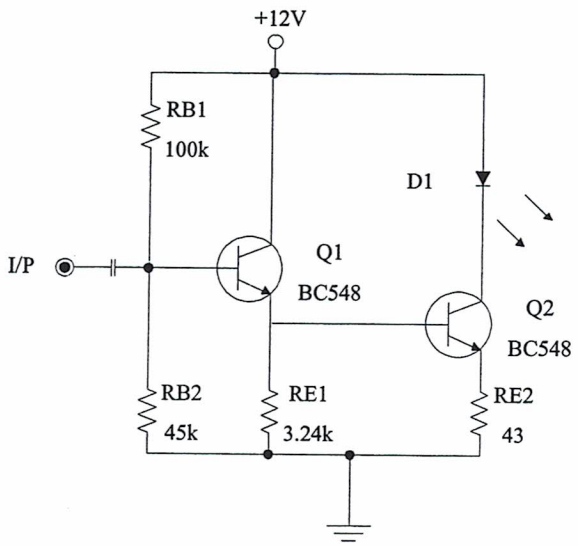
กำหนดใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ BC548 ซึ่งมีความกว้างของความถี่ (Bandwidth Frequency) มีค่าเท่ากับ 300 MHz, hfe = 333, V_{CE} = 40V, I_{Cmax} = 600 มิลลิแอมป์ ใช้แรงดัน (Voltage) V_{CC} = 12 โวลท์



รูปที่ 2.3 วงจรรวมสัญญาณแบบพาสซีฟ

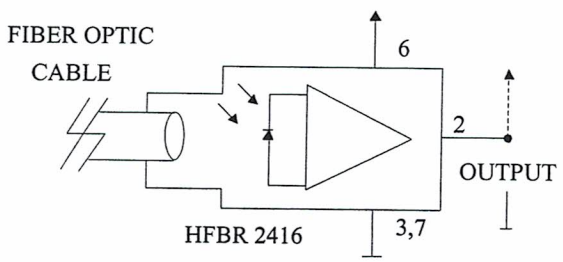
3) การสร้างวงจรรวมสัญญาณแบบพาสซีฟ วงจรนี้เป็นวงจรรวมสัญญาณมอดูเลตทางความถี่กับสัญญาณภาพเข้าไว้ด้วยกันโดยที่ใช้อุปกรณ์ประเภทพาสซีฟ คือตัวความต้านทานและตัวเก็บประจุ เพื่อทำให้เกิดเป็นสัญญาณใหม่ที่มีสองสัญญาณเดิมปนอยู่ในสัญญาณใหม่ที่เกิดขึ้นซึ่งสามารถกำหนดค่า C1 และ C2 ให้เหมาะสมกับวงจรและก็เหมือนกับค่าของความต้านทานนั้น เดยใช้ตัวต้านทานที่เป็นแบบปรับค่าได้เพื่อปรับค่าทั้งสองให้เหมาะสมกัน

4) การสร้างวงจรเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นแสง จากรูปที่ 2.4 เป็นวงจรเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสง ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ 2 ตัว ซึ่งทำหน้าที่ต่างๆดังนี้ ทรานซิสเตอร์ Q1 ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายคอลเลคเตอร์ร่วมที่มีการไบอัสแบบแบ่งแรงดัน และอัตราขยายแรงดันทางเอาต์พุตที่ขาอีมิตเตอร์ของ Q1 จะประมาณเท่ากับ 1 เอาต์พุตนี้จะถูกส่งไปเป็นอินพุตของ Q2 ทำการไบอัสให้ Q2 ทำงานส่วนการทำงานของ Q2 นั้นจะมีแอลอีดีต่อที่ขาคอลเลคเตอร์แบบไบอัสตรง และที่ขาอีมิตเตอร์ จะมีค่าความต้านทานเพื่อกำหนดค่าของกระแสที่จะไบอัสให้แก่ แอลอีดี จากแอลอีดี D1 เบอร์ HFBR 1414 จะให้ความยาวคลื่นที่นิยมใช้ในงานสื่อสารของเส้นใยแสง (Fiber Optic Communication) ซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 820 นาโนเมตร และทนกระแส สูงสุดได้ 100 มิลลิแอมป์ เพื่อความปลอดภัย ได้ออกแบบให้ทำงานเพียง 50% ของกระแสสูงสุด คือ ไม่เกิน 50 มิลลิแอมป์ ทรานซิสเตอร์ Q1 ใช้เบอร์ BC 548 เป็นตัวขับทรานซิสเตอร์ Q2 เบอร์เดียวกัน คิดอัตราขยาย (β) อยู่ที่ 150



รูปที่ 2.4 วงจรเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสง

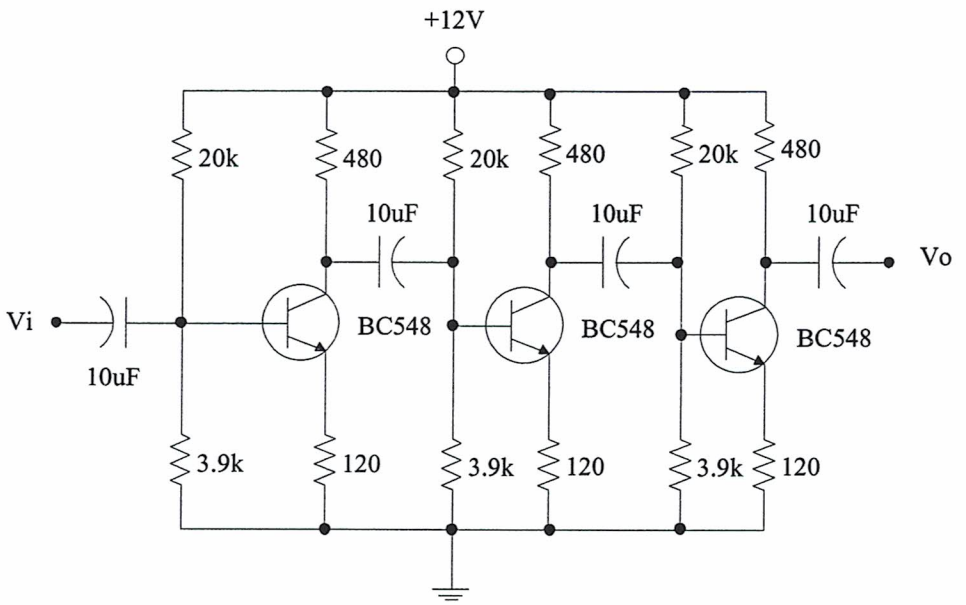
5) การสร้างวงจรเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า



รูปที่ 2.5 วงจรเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า

จากวงจรในรูปที่ 2.5 เป็นวงจรที่เปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นไฟฟ้า เมื่อส่งสัญญาณแสงเข้ามาใน เส้นใยแก้วนำแสง โดยแอลอีดีทางด้านรับจะรับสัญญาณแสงที่ส่งเข้ามาโดยใช้พินโฟโต้ไดโอด เบอร์ HFBR 2416 ซึ่งเป็นโฟโต้ไดโอดที่ สามารถรับคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 820 นาโนเมตร ได้เมื่อมีแสงเข้ามายังพินโฟโต้ไดโอดก็จะทำให้ ค่าความต้านทานภายในของพินโฟโต้ไดโอดลดลง ซึ่งสามารถทำให้กระแสไหลผ่านตัวพินโฟโต้ไดโอดได้ และทำการขยาย โดยวงจรขยายภายในตัวของพินโฟโต้ไดโอด

6) วงจรขยายสัญญาณแบบแคสเคด 3 สเตจ กำหนดใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ BC548 ซึ่งจะมีความกว้างของความถี่มีค่าเท่ากับ 300 MHz, hfe = 200, V_{CE} = 40 V , I_{Cmax} = 600 mA



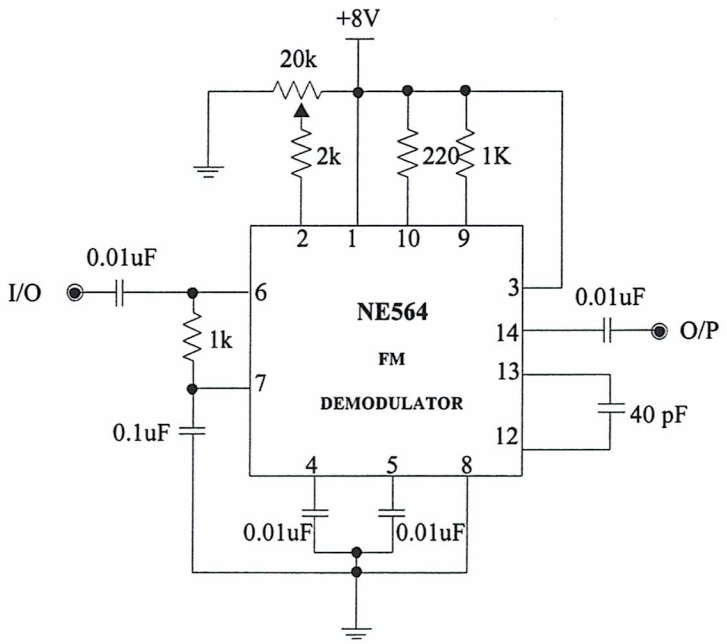
รูปที่ 2.6 วงจรขยายสัญญาณแคสเคด 3 สเตจ

7) วงจรเอฟเอ็มดีมอดูเลต ใช้ไอซีเบอร์ NE564 เช่นเดียวกับวงจรเอฟเอ็มมอดูเลเตอร์ทางด้านภาคส่ง ซึ่งวงจรนี้จะทำหน้าที่ ดีมอดูเลตสัญญาณที่ผ่านวงจรกรองความถี่สูงที่มีความถี่ประมาณ 10 MHz โดยที่มันจะแยกเอาสัญญาณเสียงที่รวมกับสัญญาณพาห์ออกมา แสดงดังรูปที่ 2.7

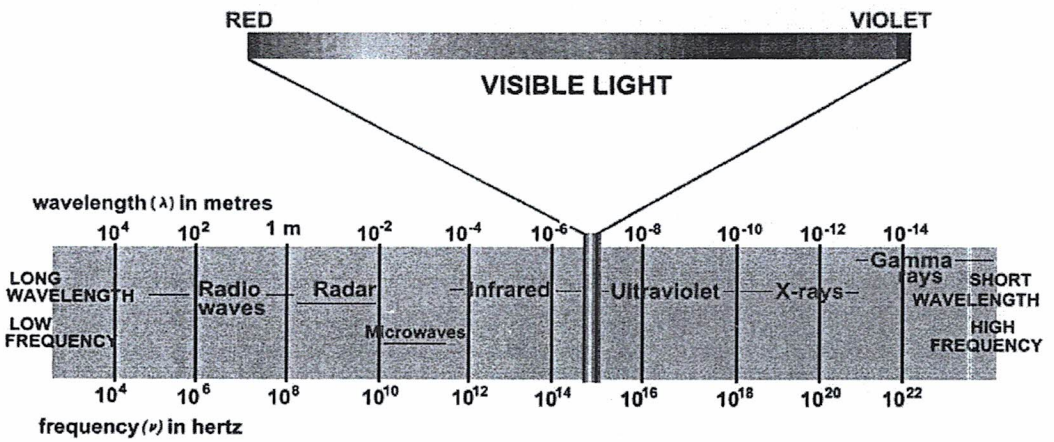
2.2 ฟิสิกส์ของแสง [2]

แสงสามารถแสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ได้ 2 ลักษณะ คือในลักษณะของอนุภาค (Particle) และ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ในการอธิบายปรากฏการณ์ทางแสงบางอย่างจำเป็นต้องอาศัยคุณสมบัติทั้งสองของแสงมาอธิบายร่วมกัน เช่น การเกิดการกระเจิง (Scattering) ของแสง และการสูญเสียสัญญาณแสง (Attenuation หรือ Loss) ในตัวกลาง เป็นต้น อนุภาคของแสงมีชื่อเรียกว่า โฟตอน (Photon) ในอะตอมของสารหรือวัสดุที่สามารถเปล่งแสงได้ อิเล็กตรอนของมันจะเรียงตัวกันเป็นวงรอบนิวเคลียสตามระดับพลังงานที่แตกต่างกัน เมื่ออะตอม

ได้รับการกระตุ้นจากพลังงานภายนอก อิเล็กตรอนของมันจะได้รับการถ่ายทอดพลังงานเข้ามาสู่ จนสามารถเปลี่ยนตำแหน่งไปอยู่ในระดับชั้นพลังงานอื่นได้ แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนไม่สามารถคงอยู่ในระดับชั้นพลังงานที่แตกต่างไปจากที่เคยอยู่ได้ จึงต้องคายพลังงานส่วนเกินออกเพื่อทำให้ตัวเองกลับมาอยู่ที่ระดับชั้นพลังงานเดิม พลังงานที่คายออกจะอยู่ในรูปของโฟตอนซึ่งสามารถเปล่งเป็นแสงออกมา



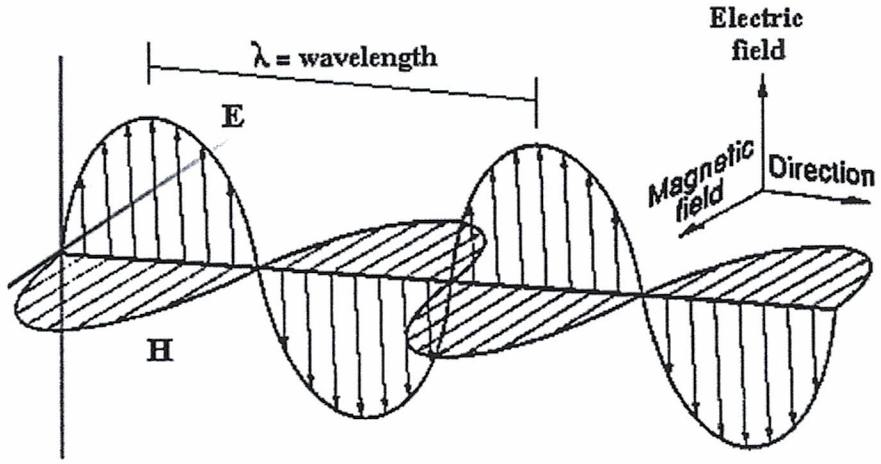
รูปที่ 2.7 วงจรเอฟเอ็มดีมอดูเลตเตอร์



รูปที่ 2.8 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารวมทั้งคลื่นแสง

2.2.1 โพลาไรเซชันของแสง

คุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของแสงที่เกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกว่า โพลาไรเซชัน (Polarization) ซึ่งถูกกำหนดโดยระนาบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของคลื่นแสงเอง การที่แสงมีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ก็เพราะเมื่อแสงเดินทางเคลื่อนที่จะเกิดการออสซิลเลต (Oscillate) หรือการสั่นของสนามไฟฟ้า (Electric field) และสนามแม่เหล็ก (Magnetic field) ในทิศทางที่ตั้งฉากซึ่งกันและกันเสมอ อีกทั้งแนวการสั่นของสนามไฟฟ้าหรือเวกเตอร์ E และแนวการสั่นของสนามแม่เหล็กหรือเวกเตอร์ H



รูปที่ 2.9 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของคลื่นแสงโดยแสดงโพลาไรเซชันของแสง

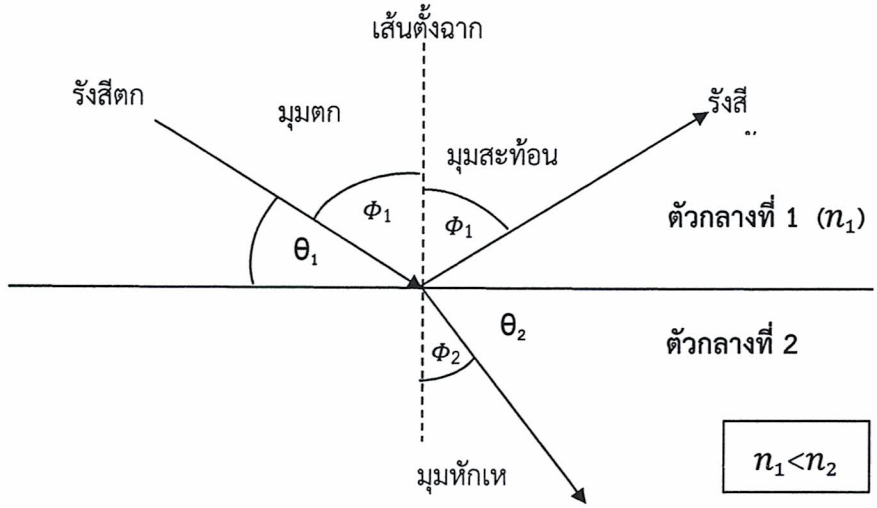
2.2.2 กฎพื้นฐานและคุณสมบัติของแสง

เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางที่เป็นอากาศหรือสุญญากาศ ความเร็วของแสงจะมีค่าที่ประมาณ $3x10^8$ เมตรต่อวินาที (m/s) แต่ถ้าตัวกลางแสงเปลี่ยนไป แสงที่เดินทางผ่านไปในตัวกลางอื่นจะมีค่าความเร็วลดลง เนื่องมาจากคุณสมบัติของตัวกลางนั้น ที่ทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวต่อต้านความเร็ว โดยที่อัตราส่วนระหว่างความเร็วปกติของแสงในอากาศกับความเร็วของแสงในตัวกลางอื่นเป็นค่าพารามิเตอร์ที่บอกให้ทราบถึงความสามารถของตัวกลางนั้น ที่ทำให้แสงมีขนาดความเร็วลดลง พารามิเตอร์นี้ เรียกว่า ดรรชนีหักเหของแสง (Refractive index of light) ในตัวกลาง ซึ่งมักแทนด้วยสัญญาลักษณ์ n ตามสมการ

$$n = \frac{c}{v} \tag{2}$$

เมื่อ v เป็นขนาดความเร็วของแสงในตัวกลางใดๆ และ c เป็นความเร็วแสงในอากาศ

เมื่อจากแสงเดินในตัวกลางอากาศได้เร็วที่สุด ขนาดของความเร็วแสงในตัวกลางอื่น จึงมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับความเร็วแสงในอากาศเสมอ ($v \leq c$) ดังนั้น ดรรชนีหักเหของแสงในตัวกลางใดๆ (n) จึงต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 เสมอ ตัวกลางที่มีค่าดรรชนีหักเหมากๆ แสดงว่า ความเร็วของแสงในตัวกลางนั้น จะมีค่าน้อยกว่าความเร็วแสงในสุญญากาศมาก



รูปที่ 2.10 การเกิดรังสีสะท้อนและรังสีหักเหจากรังสีตกกระทบ

เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งที่มีค่าดรรชนีหักเหแตกต่างกัน แสงส่วนหนึ่งจะสะท้อน (Reflect) จากผิวรอยต่อระหว่างตัวกลางทั้งสองกลับมายังตัวกลางเดิมในขณะที่แสงอีกส่วนหนึ่งจะพุ่งผ่านเข้าไปในตัวกลางที่สองและเกิดการหักเห ทำให้ทิศทางหรือแนวการเดินทางเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมลำแสงส่วนแรกที่กล่าวถึงเรียกว่า ลำแสงสะท้อนหรือรังสีสะท้อนและแสงส่วนหลังเรียกว่า รังสีหักเห หากเราจินตนาการลากเส้นสมมติเชื่อมต่อตัวกลางทั้งสอง โดยกำหนดให้ทำมุมตั้งฉากกับเส้น หรือระนาบรอยต่อระหว่างตัวกลาง และลากผ่านตำแหน่งที่แสงตกกระทบตรงบริเวณรอยต่อระหว่างตัวกลาง เส้นสมมตินี้จะใช้ในการอ้างอิงเพื่อการคำนวณ มีชื่อเรียกว่า เส้นตั้งฉาก โดยมุมที่เกิดจากเส้นตั้งฉากกระทำกับรังสีตกกระทบเรียกว่า มุมตกกระทบ (Incident angle) ในทำนองเดียวกันมุมที่เกิดจากเส้นตั้งฉากกระทำกับรังสีสะท้อนและรังสีหักเหเรียกว่า มุมสะท้อน (Reflected angle)และมุมหักเห (Refracted angle) ตามลำดับ

จากกฎการสะท้อนของแสง มุมตกกระทบต้องเท่ากับมุมสะท้อน นั่นคือ จากรูปที่ 2.10 จะได้ $\Phi_1 = \Phi_1$ ในขณะที่มุมหักเหมีความสัมพันธ์กับมุมตกกระทบตาม กฎของสเนลล์ (Snell 's law) ดังนี้

$$n_1 \sin\Phi_1 = n_2 \sin\Phi_2 \tag{3}$$

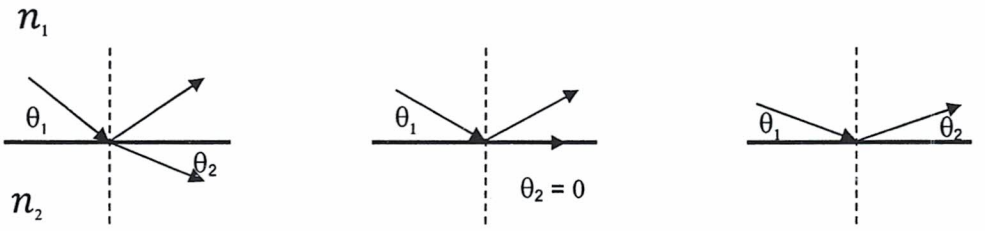
เมื่อ n_1 เป็นค่าดรรชนีหักเหของตัวกลางที่ 1 และ n_2 เป็นค่าดรรชนีหักเหของตัวกลางที่ 2 สมการที่ 3 สามารถแสดงในรูปตรีโกณมิติของโคซายน์ได้ โดยที่ยังคงคุณสมบัติตามกฎของ สเนลล์ไว้ทุกประการคือ

$$n_1 \cos\theta_1 = n_2 \cos\theta_2 \tag{4}$$

เมื่อ θ_1 และ θ_2 เป็นค่าของมุมตกกระทบและมุมหักเห ที่เกิดจากรังสีตกกระทบและรังสีหักเหกระทำกับแนวรอยต่อระหว่างสองตัวกลางตามลำดับ

2.2.4 ปรากฏการณ์การสะท้อนกลับหมด

จากกฎของสเนลล์ หากดรรชนีหักเหของตัวกลางที่ 1 มีค่ามากกว่าดรรชนีหักเหของตัวที่ 2 ($n_1 > n_2$) มุมหักเหจะกว้างว่ามุมตกกระทบ นั่นคือ รังสีหักเหจะเปลี่ยนแปลงแนวการเดินทางออกจากแนวของรังสีตกกระทบ ในลักษณะที่เบนห่างออกจากเส้นตั้งฉาก ดังรูปที่ 2.11 (ก) ในทางทำนองกลับกัน หากดรรชนีหักเหของตัวกลางที่ 1 มีค่าน้อยกว่าดรรชนีของตัวกลางที่ 2 ($n_1 > n_2$) รังสีหักเหจะเบนห่างเข้าหาเส้นตั้งฉากดังรูปที่ 2.11(ข)



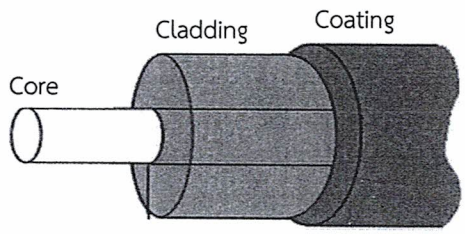
(ก) $\theta_1 > \theta_C$ (ข) $\theta_1 = \theta_C$ (ค) $\theta_1 < \theta_C$

รูปที่ 2.11 การเกิดมุมวิกฤตระหว่างสองตัวกลางเมื่อ ($n_1 > n_2$)

ในการเดินทางของแสงจากตัวกลางที่มีค่าดรรชนีหักเหมากกว่า ไปยังตัวกลางที่มีค่าดรรชนีหักเหน้อยกว่า ($n_1 > n_2$) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ทิศทางของรังสีหักเหจะถูกกำหนดโดยค่าของมุมตกกระทบตามกฎของสเนลล์ จากรูปที่ 2.11(ก) จะเห็นว่า หากมีค่าของมุมตกกระทบ θ_1 มีค่าลดลงเรื่อยๆ รังสีหักเหเบี่ยงเบนออกจากแนวทางเดิมเข้าหาแนวระนาบหรือเส้นรอยต่อระหว่างตัวกลางมากขึ้น เมื่อ θ_1 มีค่าลดลงถึงคาหนึ่งซึ่งเท่ากับ θ_C รังสีหักเหจะเคลื่อนที่ไปในแนวของระนาบรอยต่อระหว่างตัวกลางดังรูปที่ 2.11(ข) เหตุการณ์เช่นนี้ ถือเป็นจุดเริ่มต้นของปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมด หรือ TIR (Total Internal Reflection) คือถือว่าไม่มีแสงเดินทางผ่านเข้าไปในตัวกลางที่สองเลย โดยที่มุม θ_C กำหนดนิยามว่าเป็นมุมวิกฤต (Critical angle) ดังนั้น หากค่าของมุม θ_1 มีค่าน้อยกว่าค่าของมุมวิกฤต $\theta_1 < \theta_C$ แสงจะเกิดการสะท้อนกลับเข้าไปในตัวกลางเดิมแต่เพียงอย่างเดียว โดยจะไม่เกิดการหักเหเลย

2.3 เส้นใยแก้วนำแสง [3, 4]

เส้นใยแก้ว หมายถึงเส้นใยโปร่งแสงทรงกระบอกตันขนาดเล็ก มีเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยทั้งเส้นประมาณ 125 ไมครอน (ไมโครเมตร) หรือ 0.125 มิลลิเมตร (ขนาดเล็กกว่าเส้นผมเล็กน้อย) โดยทั่วไปวัสดุที่ใช้ทำเส้นใยมักเป็นสารประกอบประเภท ซิลิกา หรือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO2) ซึ่งก็คือแก้วบริสุทธิ์ เนื้อแก้วนี้อาจถูกเจือ (Doped) ด้วยสารหรือวัสดุบางอย่าง ที่สามารถควบคุมอัตราการเจือได้ เพื่อทำให้แก้วมีค่าดรรชนีหักเหของแสง (Refractive index) ตามต้องการ โครงสร้างพื้นฐานของเส้นใยแก้วประกอบด้วยวัสดุโปร่งแสงสองชั้น โดยในแนวแกนกลางของเส้นใยแก้วเรียกทับศัพท์ว่า คอร์ (Core) จะมีค่าดรรชนีหักเหสูงกว่าส่วนที่อยู่โดยรอบที่ห่างจากแกนกลางออกไป ซึ่งส่วนหลังนี้เรียกว่า แคลดดิ้ง (Cladding) ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของเส้นใยแก้ว

2.3.1 ข้อดีของเส้นใยแก้ว

การกล่าวถึงข้อดีของเส้นใยแก้ว มักจะเป็นไปในทำนองของการเปรียบเทียบกับสายเคเบิลทองแดงที่ใช้ส่งสัญญาณไฟฟ้า โดยข้อดีที่สำคัญของเส้นใยแก้วสามารถสรุปได้ดังนี้

1) มีค่าการลดทอนสัญญาณต่ำ (Low attenuation) เส้นใยแก้วธรรมดาที่ประกอบด้วยเนื้อแก้วบริสุทธิ์ จะมีค่าการลดทอนสัญญาณต่ำที่ค่าความยาวคลื่นแสงในช่วง 1.3 และ 1.55 ไมครอน (น้อยกว่า 0.2 dB/km) ทำให้ในระบบการสื่อสารใช้สถานีทวนสัญญาณ (Repeater) เป็นจำนวนน้อย

2) บรรจุข้อมูลได้เป็นจำนวนมหาศาล เส้นใยแก้วมีค่าแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ในการส่งข้อมูลสูงมาก เนื่องจากใช้แสงที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีความถี่ในเทอมของ 10^{15} เฮิร์ต เป็นสัญญาณพาห์ซึ่งมีค่าสูงกว่าคลื่นไมโครเวฟ(10^{9} เฮิร์ต) กว่าล้านเท่า

3) โครงสร้างของสายเคเบิลมีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบา เมื่อพิจารณาขนาดของเส้นใยแก้วเปลือย จะเห็นว่ามีน้ำหนักเบาและขนาดเล็ก อีกทั้งเส้นใยแก้วเพียงเส้นเดียวยังสามารถใช่ส่งข้อมูลจำนวนมากๆ ได้

4) ราคาถูก เนื่องจากเส้นใยแก้วทำมาจากวัตถุดิบที่เป็นทราย ซึ่งหาได้ง่ายกว่าทองแดงในธรรมชาติ

5) เป็นอิสระทางไฟฟ้า เนื่องจากเส้นใยแก้วมีคุณสมบัติเป็นฉนวน จึงไม่นำไฟฟ้าแม้ว่าจะมีสายเปลือยมาสัมผัส

6) ปราศจากสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า ในระบบสื่อสัญญาณด้วยไฟฟ้าผ่านตัวนำมักมีการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) ที่ไม่ต้องการหรืออาจการครอสทอร์ค (Crosstalk)

7) ข้อมูลมีความปลอดภัย ในระบบสื่อสารทางไฟฟ้า สัญญาณข้อมูลจะถูกส่งผ่านสายตัวนำทองแดง ซึ่งหากมีการนำสายตัวนำมาสัมผัส ก็จะสามารถรับรู้สัญญาณทำได้โดยง่าย แต่ถ้าเป็นการส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแก้ว การรับข้อมูลไม่สามารถทำได้โดยง่าย

8) มีความทนทานสูง เส้นใยแก้วแต่ละเส้นจะมีอายุการทำงานที่ยาวนานมาก หากไม่มีแรงมากระทำจากภายนอกมาสร้างความแตกหักเสียหาย ไม่ต้องคำนึงถึงความเสื่อมจากสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติมากนัก

2.3.2 ชนิดของเส้นใยแก้ว

การจำแนกเส้นใยแก้วเป็นประเภทต่างๆ โดยทั่วไปที่นิยมพิจารณาถึงสองสิ่งคือโครงสร้างของเส้นใยแก้วและโหมดการเดินทางของแสงในเส้นใยแก้ว

ตาราง 2.1 การแบ่งชนิดเส้นใยแก้วนำแสง

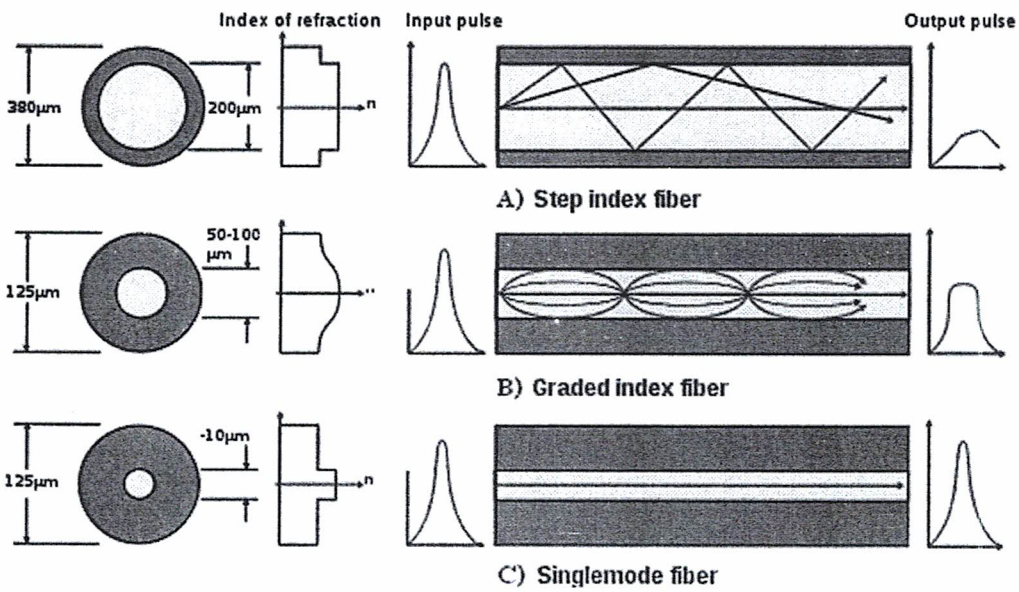
แบ่งตามชนิดของสารฉนวนที่ใช้	1. Silica Glass Optical Fiber
	2. Multi Component Glass Optical Fiber
	3. Plastic Optical Fiber
แบ่งตามโหมดการเดินทาง	1. Single Mode Optical Fiber
	2. Multi Mode Optical Fiber
แบ่งตามลักษณะของดรรชนีหักเหของแกน	1. Step Index Optical Fiber
	2. Graded Index Optical Fiber

1) แบ่งตามชนิดสารฉนวนที่ใช้ (Dielectric)

- เส้นใยแก้วชนิดแก้ว (Silica Glass Optical Fiber) ทำมาจากแก้วใสโปร่งแสงที่ประกอบด้วยวัสดุประเภทซิลิกา (SiO_2) เป็นสำคัญ ค่าดรรชนีหักเหมีค่าประมาณ 1.458 ที่ความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร การเปลี่ยนแปลงค่าดรรชนีหักเหของแก้ว โดยการเจือปนสารอื่นหรือโด๊ป (Doping) สารอื่นเพิ่ม
- เส้นใยแก้วทำจากแก้วหลายชนิด (Multi Component Glass Optical Fiber) ซึ่งจะใช้ฉนวนที่เป็นแก้วหลายๆ ชนิดปนกันส่วนมากจะใช้โซดาแคลเซียม (Soda Calcium) แก้วที่มีสารโบรอนและซิลิกอนผสมและอื่นๆ เป็นสารหลัก
- เส้นใยแก้วชนิดพลาสติก (Plastic Optical Fiber) ซึ่งใช้ฉนวนที่เป็นพลาสติกจะใช้สารจำพวกซิลิกอนเรซิน (Silicon Resin) อะคิริกเรซิน (Acrylic Resin)

2) แบ่งตามโหมดการเดินทาง (Propagation mode)

- เส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยว (Single Mode Optical Fiber : SM) เป็นเส้นใยแก้วที่ยอมให้มีโหมดการเดินทางของแสงได้เพียงโหมดเดียวคือโหมดพื้นฐานเท่านั้น ข้อดีของเส้นใยแก้วประเภทนี้คือ มีค่าการขยายตัวของสัญญาณหรือดิสเพอร์ชั่น (Dispersion) ต่ำ ทำให้สามารถส่งข้อมูลที่มีปริมาณมากๆ หรือ ค่าแบนด์วิดท์สูงๆ ไปได้เป็นระยะทางไกล จึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วที่มีประสิทธิภาพสูงดังรูปที่ 2.13(C)
- เส้นใยแก้วชนิดโหมดร่วม (Multi Mode Optical Fiber : MM) หมายถึงเส้นใยแก้วที่อนุญาตให้มีโหมดการเดินทางของแสงเกิดขึ้นได้หลายโหมดตามลักษณะของแสงที่ส่งเข้าไป แสงที่เปล่งออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงทั่วไปจะมีทิศทางสะเปะสะปะและสามารถเดินทางเข้าสู่เส้นใยแก้วในมุมที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดโหมดการเดินทางหลายโหมดดังรูปที่ 2.13(A) และ(B)



รูปที่ 2.13 โครงสร้างและรูปแบบโหมดการเดินทางของเส้นใยแก้ว [5]

3) แบ่งตามลักษณะของดรรชนีหักเหของแกน

- เส้นใยแก้วชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ (Step Index Optical Fiber : SI) หมายถึงเส้นใยแก้วที่ค่าดรรชนีหักเหของคอร์และของแคลดดิ้งมีค่าคงที่ ในการแสดงค่าดรรชนีหักเหของเส้นใยแก้ว มักแสดงด้วยลักษณะของกราฟที่แสดงค่าดรรชนีหักเห ในภาคตัดขวางหรือแนวหน้าตัดของเส้นใยแก้ว เรียกว่า Refractive Index Profile เส้นใยแก้วชนิดสเต็ปอินเด็กซ์นี้ จะมีกราฟเป็นลักษณะของ

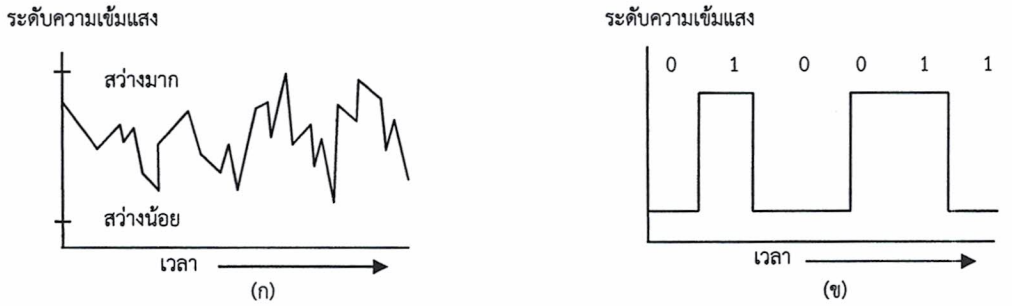
ขั้นบันได ซึ่งแสดงให้เห็นถึงค่าดรรชนีหักเหที่มีค่าคงที่แน่นอนในช่วงระยะหนึ่งของแนวรัศมีดังรูปที่ 2.13(A)

- เส้นใยแก้วชนิดเกรดเด้ดอินเด็กซ์ (Graded Index Optical Fiber : GI) หมายถึง เส้นใยแก้วที่มีค่าดรรชนีหักเหของคอร์เปลี่ยนแปลงไปตามแนวรัศมีที่พุ่งออกจากแกนกลางของเส้นใยแก้ว โดยทั่วไปตำแหน่งในแนวศูนย์กลางเส้นใยแก้วมักมีค่าดรรชนีหักเหสูงสุด จากนั้นค่าดรรชนีหักเหจะค่อยๆ ลดลงไปตามระยะทางที่ห่างออกจากแนวศูนย์กลางตามลำดับ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าดรรชนีหักเหของเส้นใยแก้วชนิดเกรดเด้ดอินเด็กซ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าดรรชนีหักเหของคอร์อย่างต่อเนื่องดังรูปที่ 2.13(B)

2.4 การผิดรูปของสัญญาณแสงในเส้นใยแก้ว [4]

การส่งสัญญาณข้อมูลในเส้นใยแก้วมีสองลักษณะ ขึ้นอยู่กับชนิดของข้อมูลว่าเป็นแบบแอนะลอกหรือดิจิตอล หากข้อมูลเป็นแอนะลอกขนาดความเข้มแสงของสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแก้วจะขึ้นอยู่กับขนาดหรือแอมปริจูดของสัญญาณไฟฟ้าที่เป็นแอนะลอกด้วย เช่น หากเราต้องการส่งเสียงผ่านในเส้นใยแก้ว ช่วงจังหวะที่เราพูดเสียงดัง ความเข้มแสงอาจมีค่าความสว่างมาก ในขณะที่ช่วงที่พูดเสียงเบา ความเข้มแสงก็จะมีค่าต่ำ เป็นต้น การส่งสัญญาณแบบนี้ คล้ายกับการมอดูเลตข้อมูลเชิงแอมปริจูด โดยใช้ความเข้มแสงเป็นตัวกำหนดขนาดสัญญาณ จึงมักเรียกการส่งแสงแบบแอนะลอกนี้ว่า Intensity Modulation/Amplifier Modulation หรือ IM/AM สำหรับในกรณีที่ข้อมูลเป็นชนิดดิจิตอล แสงที่ส่งจะถูกกำหนดให้มีระดับความเข้มแสงเพียงสองระดับที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เช่น อาจกำหนดให้มีแสงส่งออกเมื่อสภาวะข้อมูลเป็น “1” และกำหนดให้ไม่มีแสงเมื่อข้อมูลมีสภาวะเป็น “0” หรืออาจกำหนดให้มีสภาวะตรงข้ามกับแบบนี้ก็ได้ เป็นต้น ในบางครั้งระบบ IM/AM อาจหมายรวมถึงระบบดิจิตอลก็ได้ เพราะความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงตามข้อมูลเช่นกัน

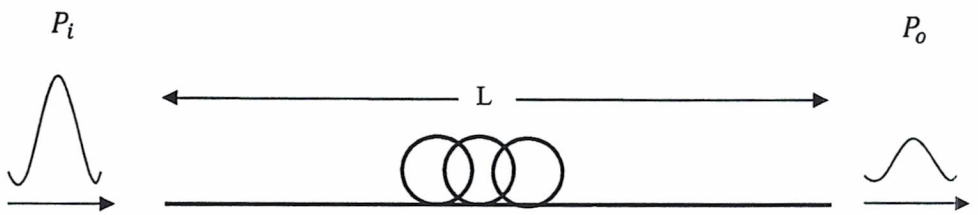
อย่างไรก็ตาม ไม่ว่าข้อมูลจะถูกส่งออกไปในลักษณะใด เมื่อแสงเดินทางไปในเส้นใยแก้ว จะไม่สามารถคงสภาพเดิมได้ตลอด แต่จะเกิดการเพี้ยนหรือผิดรูปไประยะทางที่แสงเดินทาง ลักษณะที่แสงเกิดความผิดเพี้ยน (Distortion) ในเส้นใยแก้วมี 2 ลักษณะใหญ่ๆ ได้แก่ เกิดการสูญเสียสัญญาณ (Attenuation หรือ Loss) และเกิดดิสเพอร์ชั่น (Dispersion) ซึ่งอย่างหลังนี้จะมีผลเห็นได้ชัด เมื่อมีการส่งข้อมูลแบบดิจิตอลโดยจะเป็นกำหนดปริมาณข้อมูลหรืออัตราการส่งข้อมูลสูงสุดของระบบเส้นใยแก้ว



รูปที่ 2.14 การส่งข้อมูลแสงแบบ (ก) แอนะลอก และ (ข) แบบดิจิตอล

พิจารณาการส่งสัญญาณแสงเข้าไปในเส้นใยแก้วในรูปที่ 2.15 เมื่อ P_i หมายถึงค่าความเข้มแสงถูกส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วด้านขาเข้า มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt : W) P_o หมายถึงค่าความเข้มแสงที่ออกจากเส้นใยแก้วที่ปลายทาง มีหน่วยเป็นวัตต์ และ L หมายถึง ความยาวของเส้นใยแก้วที่แสงเดินทาง มีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km) ค่าการสูญเสียสัญญาณ (Loss) หรือการลดทอนสัญญาณ (Attenuation) ในเส้นใยแก้วต่อหน่วยความยาว ซึ่งมักแทนด้วยสัญลักษณ์ α (อัลฟ่า) และมักมีหน่วยเป็นดีบีต่อกิโลเมตร (dB/km) จะสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\alpha = \frac{10}{\mathrm{L}} \log\left(\frac{P_o}{P_i}\right) \ \mathrm{dB/Km} \tag{5}$$



รูปที่ 2.15 กำลังงานของแสงหรือความเข้มแสงในระบบเส้นใยแก้ว

2.4.1 กลไกการสูญเสียสัญญาณแสงในเส้นใยแก้ว

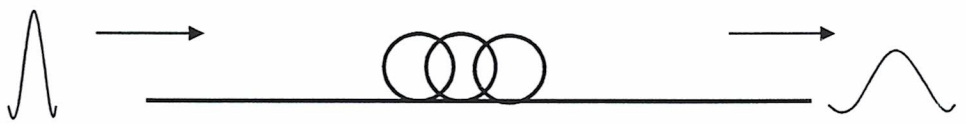
1) การดูดซับพลังงานจากวัสดุตัวกลาง (Absorption) เป็นการลดทอนสัญญาณแสงที่เดินทางในเส้นใยแก้ว เนื่องจากการดูดซับพลังงานแสงจากโมเลกุลของวัสดุที่ใช้ทำเส้นใยแก้ว เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวมัน ค่าการดูดซับพลังงานแสงขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางโมเลกุลและความบริสุทธิ์ของเนื้อสารที่ใช้ทำเส้นใยแก้ว

2) การกระเจิงของแสง (Scattering) เมื่อแสงเดินทางกระทบโมเลกุลของสารที่ใช้ทำเส้นใยแก้ว พลังงานของแสงบางส่วนที่มีค่าน้อยๆ จะเกิดการกระเจิง หรือการกระจายไปทุกทิศทุกทาง ทำให้พลังงานหรือความเข้มของแสงที่เดินทางต่อไปข้างหน้ามีค่าลดลง

3) การกระจายพลังงานออก (Radiation losses) เป็นการสูญเสียสัญญาณแสงเนื่องมาจากโครงสร้างหรือลักษณะการจัดวางของเส้นใยแก้ว ทำให้พลังงานแสงเดินทางในเส้นใยแก้วเล็ดลอดออกมาในส่วนของแคลดดิ้งและไม่สามารถกลับคืนสู่คอร์ได้ การสูญเสียในรูปแบบนี้มักมีลักษณะเป็นการโค้งงอ (Bending) ของเส้นใยแก้ว ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ

- ความโค้งขนาดใหญ่ (Macro-bending) เกิดจากการจัดวางเส้นใยแก้วที่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรง หากเส้นใยแก้วมีรัศมีความโค้งมากๆ แสงหักเหที่จุดนี้อาจไม่เกิดขึ้นและปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดยังคงมีอยู่ ทำให้ไม่เกิดการสูญเสียความเข้มแสง แต่หากรัศมีความโค้งน้อยๆ แสงที่สะท้อนและเดินทางต่อภายในคอร์ จะมีค่าลดลงตามสัดส่วนที่เสียไปกับการหักเห
- ความโค้งขนาดเล็ก (Micro-bending) ลักษณะความโค้งแบบนี้ อาจเกิดจากโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์ตรงบริเวณรอยต่อระหว่างคอร์กับแคลดดิ้ง มีลักษณะไม่เรียบเป็นรอนหรือหยักคล้ายกัยดารเกิดความโค้งที่มีรัศมีน้อยๆ ทำให้แสงที่เดินทางผ่านเกิดการสูญเสีย

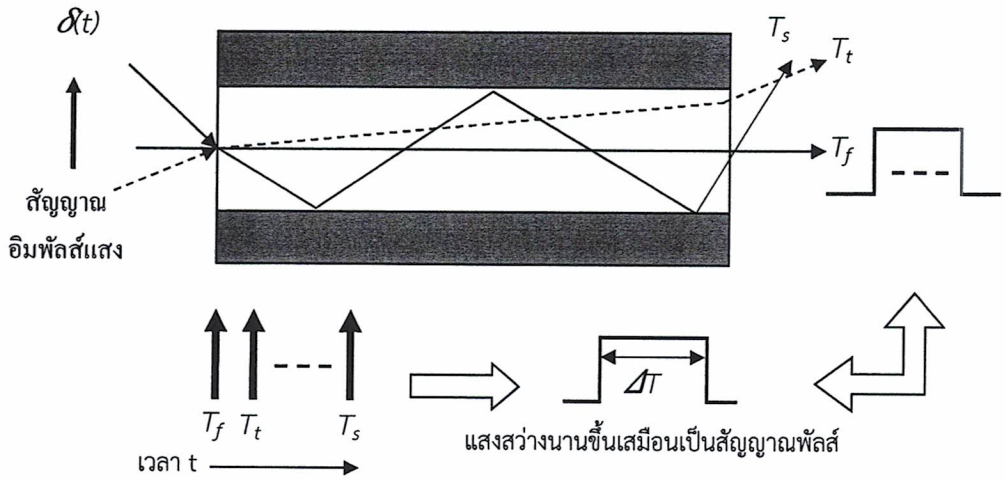
2.4.2 การบานออกของสัญญาณอิมพัลส์



รูปที่ 2.16 การบานออกของสัญญาณพัลส์ในระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแก้ว

ในการสื่อสารข้อมูลแบบดิจิตอล สัญญาณพัลส์ของแสงที่เดินทางไปในเส้นใยแก้วนอกจากจะถูกลดทอนค่าความเข้มแสงลงแล้ว ลักษณะของสัญญาณพัลส์ยังเกิดการผิดรูปไปด้วย โดยทั่วไปมักเกิดการบานออกในโดเมนเวลาหรือที่เรียกว่า ดิสเพอร์ชั่น (Dispersion) ปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชั่นถือเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญในเส้นใยแก้วเพราะส่งผลโดยตรงกับขนาดของปริมาณข้อมูลที่ใช้สื่อสารกัน ซึ่งกระบวนการการบานออกของสัญญาณแสงอย่างง่าย เมื่อพิจารณาสัญญาณแสงที่มีลักษณะเป็นอิมพัลส์ (Impulse) $\delta(t)$ ซึ่งถูกส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วโหมดชนิดโหมดร่วมแบบสเต็ปอินเด็กซ์ (SI-MM)

สัญญาณอิมพัลส์แสงในที่นี้ หมายถึงสัญญาณแสงที่มีความกว้างของสัญญาณน้อย-มาก กล่าวคือ สัญญาณมีความแคบมากจนเหมือนกับไม่มีความกว้างเลย ตัวอย่างเช่น แสงจากฟ้าแลบ หรือ แสงสว่างจากแฟล็ชถ่ายรูป ที่มีค่าความสว่างหรือความเข้มแสงสูงมากแต่ปรากฏให้เห็นในช่วงเวลาสั้นๆ แวบเดียวเท่านั้น แสงแวบนี้สามารถเดินทางเข้าสู่เส้นใยแก้วได้หลายแนวหรือหลายมุมตราบใดที่แนวทางของแสงเข้าเส้นใยแก้วนั้น ทำมุมน้อยกว่าค่าของมุม Φ_m ซึ่งถือเป็นขนาดของกรวยเสมือนสำหรับรับแสง เมื่อมุมของแสงที่ทำกับแนวแกนกลางของเส้นใยแก้วมีค่าเป็นศูนย์แสงจะเดินทางอยู่ในแนวแกนของเส้นใยแก้วเรียกว่า Axial ray หรือโหมดพื้นฐานนั่นเอง



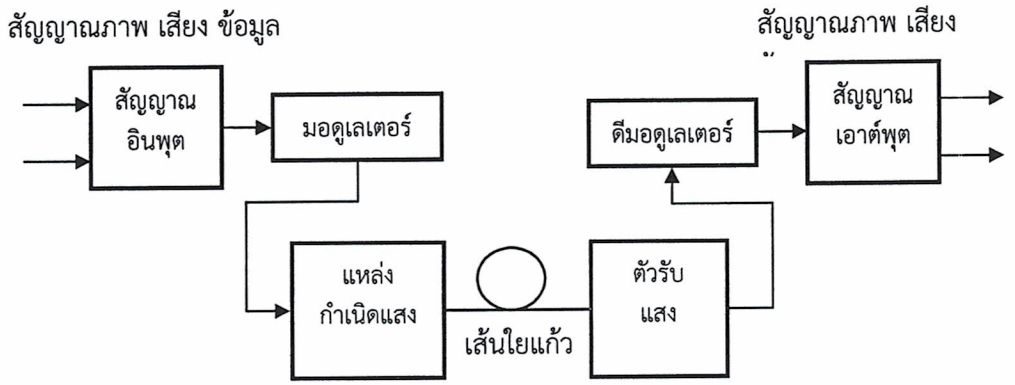
รูปที่ 2.17 สัญญาณแสงอิมพัลส์จะบานออกเมื่อเดินทางในเส้นใยแก้วชนิด SI-MM

แสงในโหมดพื้นฐานที่เดินทางในแนวแกนกลางของเส้นใยแก้ว จะเดินทางเป็นระยะเท่ากับความยาวเส้นใยแก้วคือ L โดยใช้เวลา T_f (Fastest time) ซึ่งถือเป็นช่วงเวลาที่น้อยที่สุดหรือเร็วที่สุด เมื่อแสงถูกส่งออกมาที่ปลายอีกด้านหนึ่งของเส้นใยแก้ว เราควรสังเกตเห็นแสงแวบเช่นเดียวกันกับทางด้านขาเข้าด้วย ตาในความเป็นจริงกลับไม่เป็นเช่นนั้น แต่ยังคงมีแสงแวบหรือสัญญาณอิมพัลส์ที่เดินทางมาในแนวทางอื่นอีก เพียงแต่มิได้คงอยู่ในแนวแกนของเส้นใยแก้ว เนื่องจากเป็นโหมดที่มีอันดับสูงขึ้นไป ดังเช่นเส้นประ ทำให้ต้องเดินทางเป็นระยะทางมากกว่าระยะทาง L เดิม ส่งผลให้มีระยะเวลาในการเดินทางเป็น T_t ซึ่งมากกว่า T_f แสงในโหมดสูงขึ้นไปที่เดินทางในเส้นใยแก้วนี้ จะปรากฏออกมาเป็นแสงแวบอย่างต่อเนื่องที่ปลายด้านขาออกของเส้นใยแก้ว เสมือนกับว่าเกิดมีสัญญาณอิมพัลส์หลายสัญญาณออกมาติดต่อกัน ตั้งแต่เวลาเริ่มต้น T_f จนถึงเวลา T_s (Slowest time) ซึ่งเป็นเวลาที่อิมพัลส์ตัวสุดท้ายเดินทางมาที่ทำมุม Φ_m พอดี แม้ว่าที่ปลายด้านขาเข้าของเส้นใยแก้วจะมีแสงเพียงแวบเดียว แต่ที่ขาออกกลับเห็นแสงที่ออกมามีความสว่างนานขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา ΔT ทำให้สัญญาณอิมพัลส์กลายเป็นสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมที่มีขนาดกว้างเป็นเวลา $\Delta T = |T_s - T_f|$ ซึ่งปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดการบานออกของสัญญาณพัลส์ในทำนองนี้เรียกว่า ดิสเพอร์ชั่น

2.5 รูปแบบพื้นฐานการสื่อสารข้อมูลทางแสง [4]

หลักการทำงานของระบบสื่อสารโดยใช้เส้นใยแก้ว แสดงดังรูปที่ 2.18 ระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนี้มีโครงสร้างคล้ายกับระบบการสื่อสารข้อมูลด้วยสายเคเบิลทั่วไปเพียงแต่ตัวกลางนำข้อมูลที่ต่างกัน กล่าวคือ เมื่อต้องการส่งข้อมูลที่อาจอยู่ในรูปของ สัญญาณเสียง สัญญาณภาพ หรือข้อมูลทางคอมพิวเตอร์ วงจรภาคส่งจะทำหน้าที่จัดรูปสัญญาณให้เหมาะสม ด้วยวิธีการเข้ารหัส

และมอดูเลต โดยลักษณะของข้อมูลที่ใช้ในขั้นตอนนี้ ส่วนใหญ่มักจัดให้อยู่ในรูปของสัญญาณดิจิตอล เพราะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า จากนั้นวงจรในส่วนที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงหรือไดเวอร์ขับสัญญาณ (Driver) จะแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้เป็นสัญญาณแสงไปยังสถานีรับ (เรียกว่า Electrical to Optical Converter หรือ E/O-Converter) โดยมีเส้นใยแก้วทำหน้าที่เป็นท่อนำหรือสายส่งสัญญาณ ที่สถานีรับจะโฟโตดีเทกเตอร์ (PD : Photo Detector) เช่น โฟโตไดโอด (Photodiode) และโฟโตทรานซิสเตอร์ (Phototransistor) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงที่ได้รับให้อยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้า (เรียกว่า Optical to Electrical Converter หรือ O/E-Converter) แล้วส่งไปยังวงจรภาครับเพื่อถอดรหัสและดีมอดดูเลตสัญญาณ ทำให้ได้สัญญาณที่มีลักษณะเดียวกับสัญญาณเดิม และใช้เป็นข้อมูลขาออกเพื่อนำไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 2.18 ระบบพื้นฐานการสื่อสารด้วยเส้นใยแก้ว

2.6 ภาคส่งสัญญาณแสง [4]

อุปกรณ์ที่เป็นหัวใจสำคัญ ที่ทำให้ระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสงแตกต่างจากระบบสื่อสารทั่วไป คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับส่งสัญญาณแสงที่ใช้นำข้อมูลไปในเส้นใยแก้ว โดยมีแหล่งกำเนิดแสงเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสง (E/O - Converter)

2.6.1 คุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานเส้นใยแก้วมีดังต่อไปนี้

1) สามารถให้แสงที่มีพลังงานหรือความเข้มแสงมากพอที่ทำให้สัญญาณแสงสามารถเดินทางไปได้ตลอดระยะทางของการสื่อสาร

2) โครงสร้างของแหล่งกำเนิดแสงต้องสามารถส่งพลังงานแสงส่วนใหญ่หรือทั้งหมดเข้าไปในเส้นใยแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กได้ นั่นคือ มุมของการเปล่งแสงออกจากแหล่งกำเนิดต้องเป็นมุมแคบๆ และมีทิศทางที่แน่นอน

3) ความยาวคลื่นของแสงที่ได้ต้องมีความเหมาะสมกับเส้นใยแก้วที่ใช้ โดยความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับเส้นใยแก้วมากที่สุด มีค่าประมาณ 1.55 ไมครอน หรือรองลงมา 1.3 ไมครอน

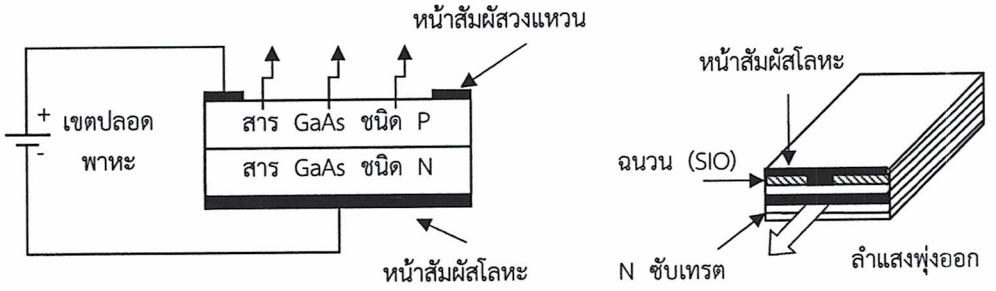
4) ไลน์วิดธ์ (Line width, $\Delta\lambda$) หรือแถบความกว้างสเปกตรัม (Spectral width) ของแสงที่เปล่งออกมาจะต้องมีค่าน้อยๆ เพื่อลดปัญหาการเกิดดิสเพอร์ชั่น

5) ช่วงเวลาตอบสนอง (Response time) ของแหล่งกำเนิด หรือช่วงเวลาที่แหล่งกำเนิดได้รับสัญญาณไฟฟ้า แล้วสร้างสัญญาณแสงออกมา ต้องมีค่าสั้นมากๆ ทำให้สามารถส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงได้ดี

6) กำลังงานแสงต้องมีค่าคงที่ต่อเนื่องตลอดเวลา และไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ อันเนื่องมาจากผลของอุณหภูมิและสภาพแวดล้อมขณะใช้งาน

2.6.2 แหล่งกำเนิดแสง [5]

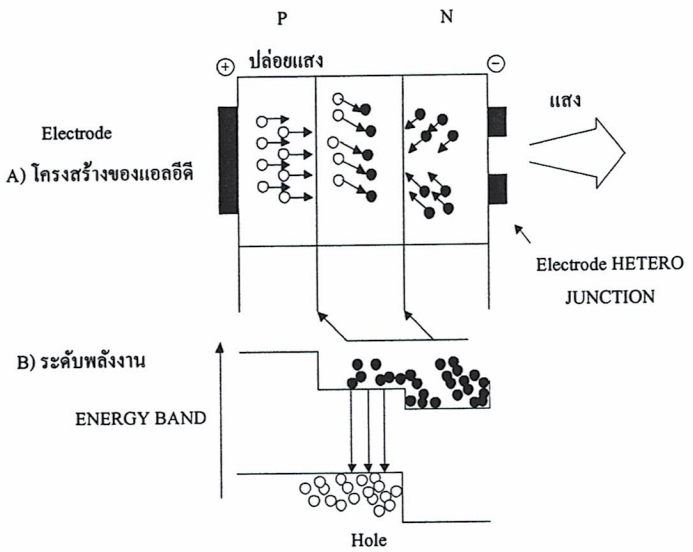
1) แอลอีดี (LED)



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างโครงสร้างของแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นแอลอีดี

แอลอีดี หรือ LED เป็นคำย่อมาจากคำว่า Light Emitting Diode หมายถึงไดโอดที่ถูกออกแบบโครงสร้างให้สามารถทำงานเปล่งแสงออกมาได้ เมื่อมีการไบอัสที่ถูกต้อง โครงสร้างพื้นฐานของแอลอีดีแบบที่ใช้ในระบบเส้นใยแก้วมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.19 ซึ่งประกอบด้วยสารชนิดแกลเลียมอะเซนายด์ (GaAs) (แอลอีดีทั่วไปจะทำจากสารประเภทเยอมันเนียมหรือซิลิคอน) ถูกโดปให้เป็นชนิด P (มีโฮลหรือประจุบวกมากกว่า) และชนิด N (มีอิเล็กตรอนอิสระมากกว่า) วางต่อกัน หลักการทำงานของมันเมื่อมีการไบอัสด้วยค่าที่เหมาะสม จะเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังโฮลในระหว่างช่วงรอยต่อของสาร P-N และมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของชั้นอิเล็กตรอน เกิดการคลายพลังงานออกมาภายนอกในรูปแบบของแสง

โครงสร้างพื้นฐานของไดโอดเปล่งแสง คือ เป็นดับเบิล-ฮีทโร-จังชั่น อิเล็กตรอนที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็นจะไปรวมกับโฮลภายในแอกทีฟเลเยอร์ จะเกิดการปล่อยแสงขึ้นภายในแอกทีฟเลเยอร์ เนื่องจากถูกกักด้วยกำแพงของฮีทโรจังชั่นแต่สำหรับกรณีของไดโอดเปล่งแสงนั้น โครงสร้างมันจะไม่มีการขยายออสซิลเลชั่น ของแสงเหมือนกับเลเซอร์ไดโอด (ไม่มีระนาบสะท้อนแสง) และแสงที่ปล่อยออกมาตรงส่วนที่อยู่ห่างจากด้านข้างนั้นจะออกจากด้านข้างได้ยาก ด้วยเหตุนี้ไดโอดเปล่งแสงทั่วไปจึงให้แสงปล่อยออกมาข้างนอก จากด้านหน้าที่ต่อกับขั้วไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.20 ตัวอย่างโครงสร้างของไดโอดเปล่งแสงแบบที่ใช้ปล่อยแสงออกทางด้านหน้า (Face emission type LED) การทำให้แสงปล่อยออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น ขั้วไฟฟ้าของทางด้าน ขั้วไฟฟ้าของทางด้านที่ปล่อยแสงออกมาจะต้องมีรูปร่างเป็นวงแหวน



รูปที่ 2.20 โครงสร้างและระดับพลังงานของไดโอดเปล่งแสง

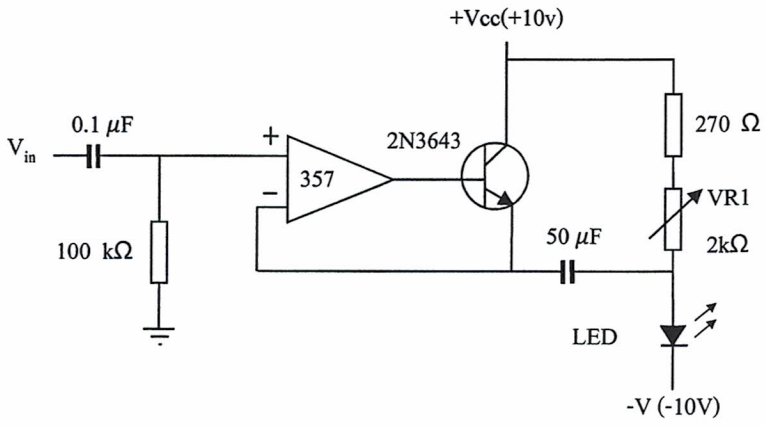
นอกจากนี้ในปัจจุบันได้มีการผลิตไดโอดเปล่งแสงอีกแบบหนึ่งขึ้นมา โดยทำให้ค่าดรรชนีการหักเหของแอกทีฟเลเยอร์มีค่าสูงและปฏิกิริยาการนำแสงขึ้นในแอกทีฟเลเยอร์และจะปล่อยแสงออกมาทางขั้วของแอกทีฟเลเยอร์ซึ่งเหมือนกับเลเซอร์ไดโอด

ไดโอดเปล่งแสงแบบนี้เรียกว่าไดโอดเปล่งแสงแบบปล่อยแสงออกทางด้านข้าง (Side emission type LED) และเมื่อได้เปรียบเทียบกันกับแบบปล่อยแสงออกมาทางด้านหน้าแล้วปรากฏว่า การที่เราจะให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเท่ากัน จะทำให้แสงที่ออกมามีกำลังน้อยกว่าแบบปล่อยแสงออกมาทางด้านหน้า แต่เนื่องจากบริเวณของการปล่อยแสงนั้นขนาดที่แคบมากกว่าจึงมีข้อดีที่ว่ามันจะมีประสิทธิภาพการเชื่อมแสงกับเส้นใยแก้วนำแสงสูงกว่า

ตาราง 2.2 คุณสมบัติต่างๆ ของอุปกรณ์ปล่อยแสงแบบไดโอดเปล่งแสง

คุณสมบัติ	ไดโอดเปล่งแสง
กำลังของแสงทางด้านนอก	2.5 มิลลิวัตต์
กำลังของแสงทางด้านเข้าในเส้นใยแก้ว	≤ 0.05 มิลลิวัตต์
ความกว้างของสเปกตรัมที่จุดกำลังของแสงตกลงครึ่งหนึ่ง (ขณะมอดูเลต)	100 นาโนเมตร
ผลตอบสนองทางความถี่	หลายร้อยเมกะเฮิรตซ์
อายุการใช้งาน	≤ 10^6 ช.ม.

วงจรขับสัญญาณแสง เป็นส่วนสำคัญที่จะช่วยให้แหล่งกำเนิดแสงทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ลักษณะวงจรขับสัญญาณสำหรับแอลอีดีค่อนข้างแตกต่างจากวงจรของเลเซอร์ไดโอด ทั้งนี้เนื่องจากแอลอีดีมีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นในการเปล่งแสงตามค่ากระแสไบอัสตรง ทำให้เหมาะสมสำหรับระบบสื่อสารที่ใช้ข้อมูลแบบแอนะลอก ในขณะที่กำลังงานของแสงที่เปล่งออกมาจากเลเซอร์ไดโอด มักมีการเปลี่ยนแปลงสูงมากอย่างรวดเร็ว จึงนิยมใช้เลเซอร์กับวงจรขับสัญญาณที่มีข้อมูลเป็นแบบดิจิตอล



รูปที่ 2.21 วงจรขับสัญญาณแอลอีดีแบบแอนะลอก

วงจรขับสัญญาณแบบแอนะลอกสำหรับแอลอีดี แสดงดังรูปที่ 2.21 เป็นตัวอย่างวงจรที่ถูกออกแบบให้แอลอีดีมีค่ากระแสไบอัสอยู่ระหว่าง 7.5-40 มิลลิแอมป์ ขึ้นอยู่กับค่าของรีซิสเตอร์ R_1 ขนาดของสัญญาณอินพุตในวงจรนี้ ควรมีค่าไม่เกิน 2 โวลท์ ซึ่งจะถูกแปลงให้เป็นกระแสไหลผ่านแอลอีดีที่มีค่าอยู่ระหว่าง ± 10 มิลลิแอมป์

2.7 ภาครับสัญญาณแสง [4, 5]

อุปกรณ์รับสัญญาณแสงหรือที่รู้จักกันดีในนามของโฟโตดีเทกเตอร์ (Photodetector :PD) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้า โฟโตดีเทกเตอร์ที่สำคัญ คือ โฟโตไดโอด (Photodiode) และโฟโตทรานซิสเตอร์ (Phototransistor)

2.7.1 คุณสมบัติที่สำคัญของโฟโตดีเทกเตอร์ในระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแก้ว ได้แก่

1) ต้องมีความไวในการรับแสงได้ดี (High Sensitivity) เฉพาะในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ เนื่องจากการส่งสัญญาณแสงจะใช้ความยาวคลื่นแสงในช่วงเฉพาะ

2) เวลาในการตอบสนองสัญญาณ (Response time) ต้องสั้นมาก กล่าวคือเมื่อมีแสงตกกระทบโฟโตดีเทกเตอร์ต้องเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยเวลาสั้นที่สุด

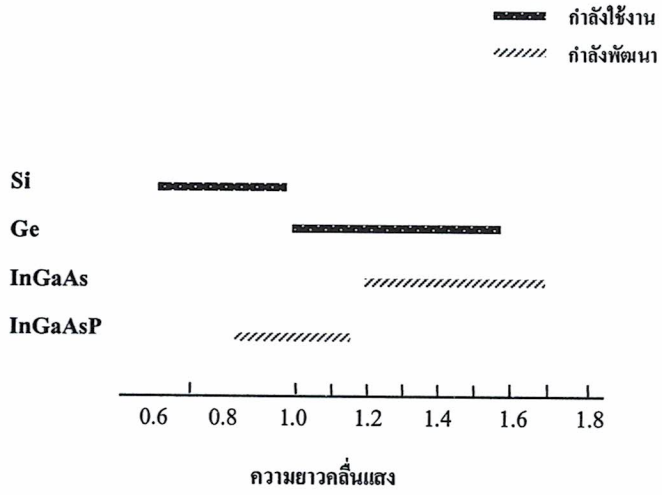
3) ในระบบสื่อสารแบบแอนะลอกต้องใช้โฟโตดีเทกเตอร์ชนิดลิเนียร์ (Linear) หรือตอบสนองต่อสัญญาณที่ได้รับในลักษณะเชิงเส้น เพื่อลดการเพี้ยนของสัญญาณลงให้น้อยที่สุด

4) สัญญาณรบกวนภายในอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมต้องมีค่าน้อยที่สุด

2.7.2 สารและโครงสร้าง

1) สารของอุปกรณ์รับแสง

สำหรับอุปกรณ์รับแสงก็เช่นเดียวกันกับอุปกรณ์กำเนิดแสง นั่นคือ มีสารหลายชนิด และนอกจากนั้นผลต่างของพลังงานของแถบคอนดัคชั่นและแถบวาเลนซ์ของอุปกรณ์รับแสงค่าแตกต่างกัน ทำให้มีย่านความยาวคลื่นต่างกันที่ดูดสัญญาณแสงที่เข้ามาง่าย (ความไวในรับแสงดี) คุณสมบัติความไวในการรับแสงของสารแต่ละชนิดแสดง ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ความยาวคลื่นในการรับแสงของอุปกรณ์รับแสงแต่ละชนิด

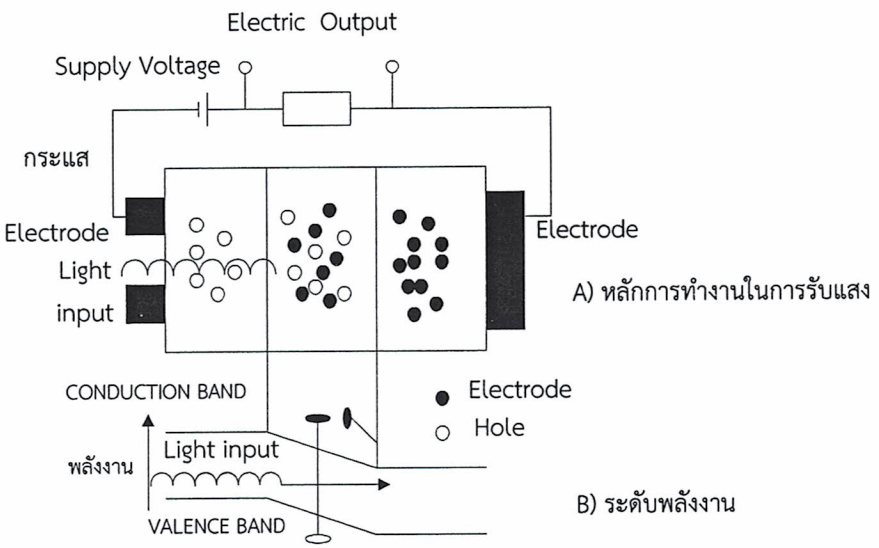
2) โครงสร้างของอุปกรณ์รับแสง

สเปส-อิเล็กทริก-ไฟล์ ตรงรอยต่อของรอยต่อพี-เอ็น ที่ทำให้อิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้าม แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้ากลับทิศทางจากภายนอก คือทางด้านพี ให้ไฟลบ และทางด้านเอ็น ให้ไฟบวก จะทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลตรงส่วนของรอยต่อมีอัตราเร่งเพิ่มขึ้นและอุปกรณ์รับแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำนี้ แบ่งออกเป็น 2 พวกใหญ่ๆ ตามปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้จากภายนอก คือ โฟโตไดโอด กับ อะวาเลนซ์โฟโตไดโอด ในส่วนของพวกโฟโตไดโอดนั้นพวกที่ได้รับการป้อนแรงดันไฟฟ้าปริมาณน้อย และในส่วนพวกอะวาเลนซ์โฟโตไดโอดเป็นพวกที่ได้รับการป้อนแรงดันไฟฟ้าปริมาณมาก

อะวาเลนซ์โฟโตไดโอดใช้ปฏิกิริยาการขยายอะวานเลนซ์ (Avalanche) อิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำ เมื่อเปรียบเทียบกับโฟโตไดโอดแล้ว เป็นอุปกรณ์ที่ให้แสงจำนวนมาก การทำงานของอะวานเลนซ์โฟโตไดโอด จะแสดงดังรูปที่ 2.23 สำหรับโครงสร้างนั้นส่วนใหญ่ ทางด้านพี ของรอยต่อ พี-เอ็น จะมีสารกึ่งตัวนำแบบพี ที่มีความหนาแน่นของโฮลสูงติดอยู่ โดยการทำเช่นนี้จะทำให้สนามไฟฟ้าภายในของบริเวณใกล้ๆ รอยต่อที่มีชั้นพีเป็นศูนย์กลางจะมีค่ามาก อิเล็กตรอนที่

ดูดแสงที่มาตกระทบจากด้านพี บวกและถูกกระตุ้นจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบคอนดัคชั่น ในระหว่างที่ได้รับอัตราเร่งและผ่านชั้นพีนั้น จะได้รับพลังงานจำนวนมากกว่า ผลต่างของพลังงานของแถบคอนดัคชั่นกับแถบวาเลนซ์จากผลนี้จึงทำให้สามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์และทำให้เกิดอิเล็กตรอนกับโฮลใหม่ได้ และอิเล็กตรอนกับโฮลใหม่นี้ยังถูกสนามไฟฟ้าเร่งให้อีก จึงทำให้เกิดอิเล็กตรอนกับโฮลใหม่ออกมาอีก เมื่อขบวนการนี้เกิดอย่างต่อเนื่องกันจำนวนอิเล็กตรอนกับโฮลจะเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก อะวาเลนซ์จะเป็นผลทำให้เกิดการขยายขึ้นเรียกว่า อะวาเลนซ์-มัลติพลิเคสชั่น (Avalanche Multiplication) ผลนี้ทำให้กระแสถูกขยาย

2.7.3 หลักการทำงานของโฟโตไดโอด



รูปที่ 2.23 หลักการทำงานของพินโฟโตไดโอด

เนื่องจากอะวาเลนส์โฟโตไดโอดได้ใช้ปรากฏการณ์การขยายอะวาเลนส์ดังนั้นจึงมีความไวสูงประมาณ 10 - 20 เดซิเบล(dB) (10 - 100 เท่า) เมื่อเทียบกับโฟโตไดโอด สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์รับแสงมีสิ่งที่เรียกว่า ช๊อต-นอยส์ (Shot Noise) ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของโฟโตไดโอดเคอเรนท์ (Photo Current) ที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบทางเวลา หรือทางระยะทาง

โฟโตไดโอดดังรูปที่ 2.23(a) ซึ่งมีหลักการทำงานตรงข้ามกับไดโอดเปล่งแสงหรือแอลอีดีกล่าวคือ เมื่อไดโอดได้รับความเข้มแสงจากภายนอก จะทำให้เกิดโฟตอนขึ้นในบริเวณปลอดพาหะหรือรอยต่อ P-N เกิดเป็นกระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด (Dark Current) ไหล ในช่วงนี้หากมีไบอัสกลับ (Reverse Bias) ให้แก่ไดโอด บริเวณปลอดพาหะจะขยายกว้างขึ้น เป็นผลให้มีกระแสไหลมากขึ้น ทิศทางการไหลของกระแสที่เกิดจากแสงตกกระทบ จะมีทิศทางเดียวกับการไบอัสกลับคือจะไหลจากขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟเข้าสู่ขั้วคาโถดของไดโอด การเพิ่มบริเวณปลอดพาหะให้กว้าง

ขึ้น นอกจากทำได้โดยการเพิ่มค่าแรงดันไบอัสกลับของโฟโตไดโอดแล้ว อาจทำได้โดยตรงกับโครงสร้างภายในของมัน โดยแทรกสารแบบอินทรินซิก (Intrinsic : I) ไว้ระหว่างรอยต่อ P-N ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเป็นโฟโตไดโอดชนิดพินหรือ PIN ซึ่งช่วยให้ได้กระแสไหลมากขึ้นกว่าโฟโตไดโอดแบบธรรมดาเมื่อมีแสงตกกระทบ

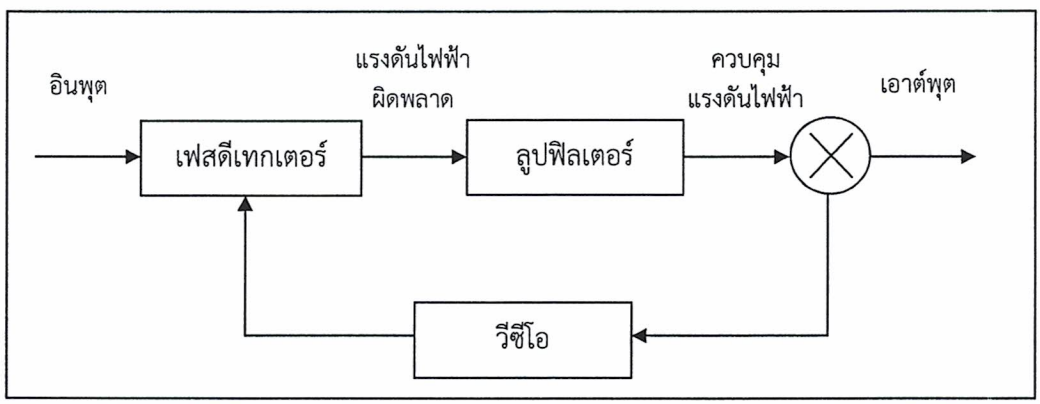
โฟโตไดโอดแบบอะวาลานช์ (Avalanche PhotoDiode : APD) ซึ่งมีหลักการทำงานเช่นเดียวกับอะวาลานช์ไดโอด (Avalanche Diode) โดย APD ถูกออกแบบให้มีกระแสไหลมากขึ้นกว่าโฟโตไดโอดธรรมดาหลายเท่า แต่ก็มีข้อเสียตรงที่ทีความไวต่ออุณหภูมิสูง และเกิดสัญญาณรบกวนมาก การใช้โฟโตไดโอดแบบอะวาลานช์ จำเป็นต้องใช้แรงดันไบอัสกลับค่อนข้างสูง ประมาณ 40-400 โวลต์ แต่ก็เป็นผลดี เพราะทำให้เวลาตอบสนองสัญญาณสั้นมาก

ตาราง 2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง

หัวข้อ	โฟโตไดโอด	อะวาเลนซ์โฟโตไดโอด
ประสิทธิภาพควอนตัม	≈ 80%	≈ 80%
ความไวการรับแสง (1)	(-15) – 20 dBm 0	(-30) – 40 dBm 0
ความเร็วการตอบสนองความถี่	หลาย จิกกะเฮิรตซ์	หลาย จิกกะเฮิรตซ์
ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำงาน	0 – 20 โวลต์	30 – 200 โวลต์
อัตราการขยาย	1	≈ 500

2.8 วงจรกำเนิดความถี่อ้างอิง (Phase Locked Loop : PLL) [6]

เฟสล็อกลูปเป็นระบบป้อนกลับที่บังคับให้วงจรออสซิลเตอร์มีความถี่หรือเฟสเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่หรือเฟสของสัญญาณอ้างอิงภายนอก เฟสล็อกลูปประกอบด้วยส่วนสำคัญคือภาคเทียบเฟสหรือเฟสดีเทกเตอร์ (Phase Detector) ภาคลูปฟิลเตอร์ (Loop Filter) และภาควีซีโอ ดังรูปที่ 2.24 ในที่นี้สมมุติว่าต่อเอาต์พุตจากวงจรวีซีโอ



รูปที่ 2.24 บล็อกไดอะแกรมของเฟสล็อกลูป

สมมุติว่ามีสัญญาณความถี่อ้างอิงภายนอกเป็นสัญญาณรายคาบเข้ามาที่อินพุตภาคเทียบเฟสดีเทกเตอร์จะทำหน้าที่เปรียบเทียบเฟสระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณจากวีซีโอ

เอาต์พุตที่ได้จากภาคเฟสดีเทกเตอร์จะเป็นแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดเป็นสัดส่วนกับผลต่างในเฟสของสัญญาณทั้งสองที่ทำการเปรียบเทียบ แรงดันผลต่างนี้ป้อนให้วงจรลูปฟิลเตอร์ ซึ่งเป็นฟิลเตอร์ชนิดกรองความถี่ต่ำซึ่งกรองเอาแต่เฉพาะความถี่ต่างๆ ที่ต้องการเพื่อส่งไป ควบคุมการออสซิลเลตของวีซีโอ ต่อไปเมื่อลูปอยู่ในสภาวะล็อก (Lock) ความถี่ของวีซีโอจะเท่ากับความถี่ของสัญญาณอินพุตพอดี ซึ่งอาจจะมีเฟสแตกต่างไปแต่ค่าเฟสที่แตกต่างนั้นจะมีค่าคงที่ ในกรณีที่มีเฟสไม่ตรงกันภาคเฟสดีเทกเตอร์ก็จะจ่ายแรงดันไฟฟ้าคลาดเคลื่อน ดังนั้นสภาวะล็อกเอาต์พุตของวีซีโอจึงมีขนาดคงที่เสมอ แต่ความถี่จะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของสัญญาณอินพุต

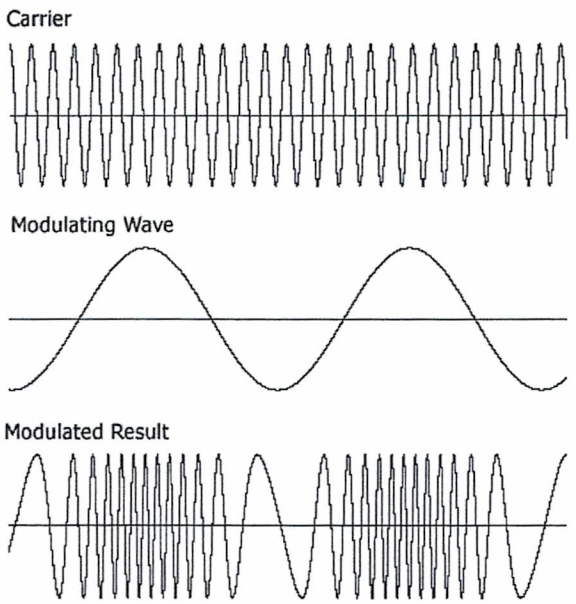
เราสามารถนำเฟสล็อกลูปไปใช้สังเคราะห์ความถี่ที่มีความเที่ยงและเสถียรภาพเทียบเท่ากับสัญญาณอ้างอิงได้วงจรนี้เรียกว่า วงจรสังเคราะห์ความถี่จะช่วยให้สามารถสังเคราะห์สัญญาณเอาต์พุตให้มีความถี่ตามต้องการได้หลายความถี่ โดยมีความเที่ยงตรงและเสถียรภาพสูงเทียบคริสตอลออสซิลเลเตอร์

ความจริงเฟสล็อกลูปยังมีประโยชน์อื่นอีก เช่น ในการดีมอดูเลเตอร์สัญญาณ FM (หรือ PM) เนื่องจากเอาต์พุตของเฟสดีเทกเตอร์มีค่าความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนเฟสของคลื่นพาห์

2.9 การมอดูเลต (Modulation) [6]

ในขบวนการมอดูเลตจะใช้คลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่สูงเป็นคลื่นพาห์แล้วเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบางอย่างของคลื่นพาห์ด้วยสัญญาณข่าวสาร โดยทั่วไปสัญญาณข่าวสารได้แก่ สัญญาณเสียง สัญญาณภาพหรือข่าวสารอื่นๆ การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของคลื่นพาห์นี้เรียกว่าการมอดูเลต

2.9.1 การมอดูเลตทางความถี่



รูปที่ 2.25 การมอดูเลตทางความถี่

รูปคลื่นของสัญญาณ FM เกิดจากสัญญาณมอดูเลตดังรูปที่ 2.25(ก) เช่น สัญญาณเสียงซึ่งเป็นข่าวสารเข้ามอดูเลตกับสัญญาณพาห์ดังรูปที่ 2.25(ข) สัญญาณพาห์หลังจากการมอดูเลตแล้วในรูปที่ 2.25(ค) เป็นสัญญาณ FM ที่เวลา t_0 สัญญาณ FM อยู่ที่ความถี่กลาง เมื่อสัญญาณที่เข้ามาดูเลตมีค่าทางบวกสูงสุด ความถี่ของคลื่นพาห์จะเพิ่มขึ้นสูงสุด นั่นคือสัญญาณมอดูเลต ถึงจุดยอดสุด (สัญญาณมอดูเลตมีขาดสูงสุดนั่นเอง) ที่เวลา t_1

ที่เวลา t_2 สัญญาณมอดูเลตลดลงเป็นศูนย์ความถี่คลื่นพาห์ก็จะลดลงมาที่ความถี่กลางดังเดิมหลังจากสัญญาณมอดูเลตมีค่าต่ำกว่าศูนย์กลายเป็นลบ คลื่นพาห์จะมีความถี่ลดลงต่ำกว่าความถี่กลางและเมื่อเวลาสัญญาณมอดูเลตกลับเป็นศูนย์อีกครั้งหนึ่งความถี่ของคลื่นพาห์ก็กลับมายังความถี่กลางดังเดิมเช่นกัน ในช่วงเวลา t_4 ถึง t_8 ก็จะซ้ำแบบเดิมเรื่อยๆไป สรุปแล้วความถี่ของคลื่นพาห์จะเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของสัญญาณมอดูเลต และความถี่คลื่นพาห์ยังคงอยู่ที่ความถี่กลางเมื่อสัญญาณมอดูเลตเป็นศูนย์

ช่วงความถี่ที่คลื่นพาห์เบี่ยงเบนไปจากความถี่กลางเรียกว่า ความถี่เบี่ยงเบนดีวิเอชั่น (Frequency Deviation) ตัวอย่างเช่น คลื่นพาห์มีความถี่ 100 MHz ลดลงต่ำสุดเป็น 99.9 MHz และเพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 100.1 MHz สลับไปมาเช่นนี้หมายความว่าช่วงความถี่เบี่ยงเบนเท่ากับ ± 0.1 MHz หรือ ± 100 kHz

อัตราการเบี่ยงเบนความถี่ของสัญญาณขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณที่เข้ามอดูเลต ตัวอย่างเช่น ถ้าสัญญาณที่เข้ามามอดูเลตเป็นโทน (สัญญาณเสียง) ความถี่ 1000 Hz

อัตราการเบี่ยงเบนความถี่ของสัญญาณ FM จะเท่ากับ 1000 ครั้งต่อวินาที ถ้าสัญญาณเข้ามอดูเลตเพิ่มความถี่เป็น 10 kHz โดยคงค่าขนาดเท่าเดิมช่วงความถี่เบี่ยงเบนก็ยังเท่าเดิม คือเท่ากับ ± 100 kHz แต่อัตราการเบี่ยงเบนจะเพิ่มเป็น 10,000 ครั้งต่อวินาที นั่นคือความถี่ของสัญญาณที่เข้ามอดูเลตเป็นตัวกำหนดอัตราการเบี่ยงเบนความถี่

สำหรับขนาดของสัญญาณมอดูเลตจะเป็นตัวกำหนดช่วงความถี่เบี่ยงเบน ตัวอย่างเช่น สัญญาณโทนที่มีขนาดสูงจะทำให้ความถี่เบี่ยงเบนไป ± 100 kHz สัญญาณโทนที่มีขนาดน้อยลงจะทำให้ความถี่เบี่ยงเบนไป ± 50 kHz กล่าวโดยสรุป สัญญาณ FM มีคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้

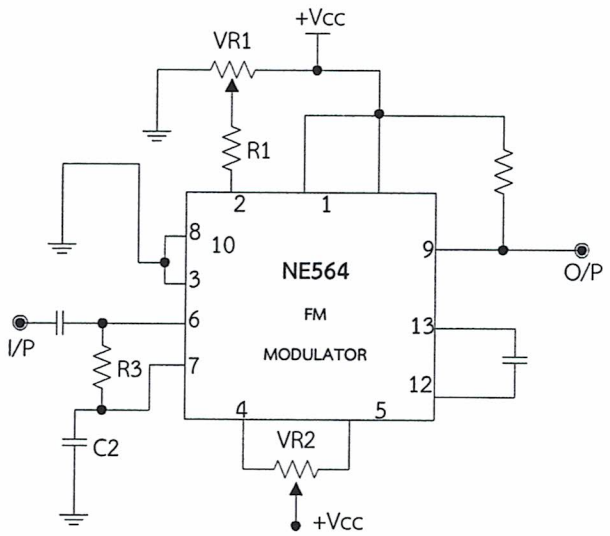
1. มีขนาดคงที่ตลอด แต่ความถี่เปลี่ยนตามสัญญาณที่เข้ามามอดูเลต
2. อัตราการเบี่ยงเบนความถี่ของพาห์มีค่าเท่ากับความถี่ของสัญญาณที่เข้ามอดูเลต
3. ช่วงความถี่เบี่ยงเบน เป็นสัดส่วนกับแอมปริจูดของสัญญาณที่เข้ามอดูเลต

2.9.2 หลักการออกแบบวงจรมอดูเลตทางความถี่

ในการออกแบบวงจรมอดูเลตทางความถี่นั้น วงจรที่ออกแบบจะใช้ไอซีเบอร์ NE564 ซึ่งเป็นไอซีแบบเฟสล็อกลูปมาเป็นตัวสร้างสัญญาณคลื่นพาห์ จะมีค่าของช่วงความถี่ในการทำงานกว้างถึง 50 MHz ซึ่งเราสามารถใช้ไอซีเบอร์นี้ทำเป็นวงมอดูเลตทางความถี่ได้ และมีโครงสร้างของวงจรภายในไอซีตามรูปที่ 2.26 โดยจะใช้ขา 12,13 ที่มีหน้าที่ ฟรีเควนซิ-เซทแคป (Frequency Set Cap) เป็นตัวกำหนดค่าความถี่ฟรีรันนิ่ง (Free Running Frequency) ซึ่งจะใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวกำหนดความถี่และสามารถหาค่าของตัวเก็บประจุได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$C_o \approx \frac{1}{(2500.f_c)} \quad \text{(pF)} \qquad (6)$$

และเมื่อหาค่าของ C_o จากสูตรได้แล้ว จะหาตัวเก็บประจุค่านั้นมาต่อในวงจร และในส่วนของขาที่ 4 และขาที่ 5 นั้น จะทำหน้าที่เป็นลูปฟิลเตอร์ (Loop Filter) และจะใช้เป็นตัวปรับความละเอียดของสัญญาณความถี่ฟรีรันนิ่ง โดยจะใช้ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ขนาด 10 kΩ มาต่อที่ขา 4 และ5 โดยใช้ขากลางของตัวต้านทานต่อไฟ DC + 5 โวลท์ และที่ขา 2 เป็นขาที่จะป้อนกระแสไบอัสให้กับวงจรนี้ ซึ่งจะตั้งค่าไว้ไม่ต่ำกว่า 200 ไมโครแอมป์ และส่วนขา 6 จะเป็นขาที่เราจะใช้ป้อนสัญญาณอินพุตเข้ามา และที่ขา 9 จะเป็นขาที่ใช้วัดสัญญาณเอาต์พุตมอดูเลเตอร์ ซึ่งจะได้ความถี่ประมาณ 10 MHz มีค่าผิดพลาด ± 1 MHz โดยวงจรตัวอย่างดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 การต่อวงจรที่ใช้ในการออกแบบของวงจร FM Modulator

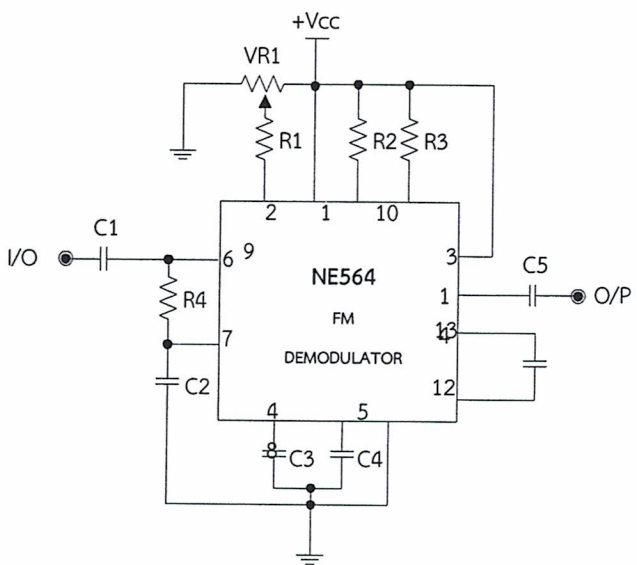
2.10 การดีมอดูเลต (Demodulation) [6]

การดีมอดูเลตของสัญญาณ คือ วิธีการแยกเอาความถี่คลื่นของข่าวสาร หรือข้อมูลที่ส่งออกมาจากคลื่นสัญญาณพาห์ การดีมอดูเลตหรือการดีเทกเตอร์ (Detector) ของสัญญาณ FM จะแตกต่างจากของ AM ทั้งนี้ก็เพราะการดีเทกสัญญาณ AM นั้นจะต้องหา วงจรที่ทำหน้าที่เปลี่ยนความถี่ให้เป็นแรงดันที่เกิดขึ้น โดยจะต้องสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลง หรือการเบี่ยงเบนทางความถี่ และสัญญาณรบกวนก็จะเกิดขึ้นพร้อมทั้งเข้ามาปะปนในสัญญาณ AM ได้ด้วย แต่สำหรับสัญญาณ FM นี้คลื่นสัญญาณจะอยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงทางความถี่ ดังนั้นคลื่นสัญญาณรบกวนจึงไม่สามารถสอดแทรกเข้ามาทางด้านความถี่ได้ แต่อาจจะสอดแทรกเข้ามาทางด้านแอมปริจูด ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยสร้างวงจรไฟฟ้าที่เป็นตัวกำจัดแอมปริจูดของสัญญาณ และจะทำให้แอมปริจูดของสัญญาณรบกวนถูกขจัดออกไป

การออกแบบวงจรเอฟเอ็มมอดูเลเตอร์ (Frequency Demodulator) ก็จะใช้ไอซีเบอร์ NE564 เช่นเดียวกันกับการออกแบบวงจรเอฟเอ็มมอดูเลเตอร์ เนื่องจากไอซีเบอร์นี้สามารถเป็นได้ทั้งตัว มอดูเลเตอร์และดีมอดูเลเตอร์ วงจรภายในดังรูปรูปที่ 2.27 เช่นเดียวกัน ซึ่งวงจรนี้จะทำหน้าที่แยกเอาสัญญาณเสียงที่รวมกับสัญญาณพาห์ออกมา โดยจะต้องทำการคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุที่ขา 4 และที่ขา 5 ก่อน จากสูตรดังต่อไปนี้

$$\omega = \frac{1}{R*C_3} \tag{7}$$

โดยที่ค่าของ $= 2\pi f$ นำมาแทนค่าลงในสมการเพื่อหาค่า C_3 , C_4 ที่ขา 4 และขา 5 และในวงจรเอฟเอ็มมอดูเลเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบแสดงดังรูปที่ 2.27

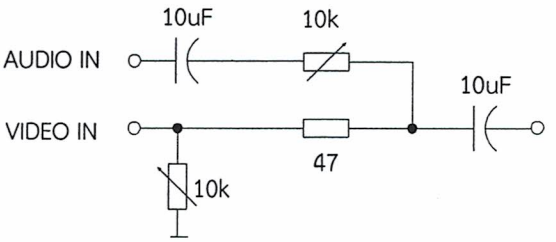


รูปที่ 2.27 การต่อวงจรที่ใช้ในการออกแบบวงจร FM Demodulator

2.11 วงจรรวมสัญญาณแบบพาสซีฟ (Passive Summing) [1]

ในวงจรรวมสัญญาณจะใช้อุปกรณ์พาสซีฟที่เป็นตัวต้านทานและที่เป็นตัวเก็บประจุ เพื่อรวมสัญญาณหลายๆ สัญญาณเข้าด้วยกัน และออกเป็นสัญญาณใหม่ที่ไม่เหมือนสัญญาณเดิม แต่สัญญาณพื้นฐานเดิมนั้นจะรวมอยู่ในสัญญาณใหม่ที่เกิดขึ้น โดยที่วงจรรวมสัญญาณแบบพาสซีฟที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกับในส่วนของอินพุตและสามารถใช้สูตรในการคำนวณหาค่าของตัวเก็บประจุได้ แต่สำหรับค่าความต้านทานนั้น จะใช้ค่าความต้านทานที่ปรับค่าได้ เพื่อที่จะใช้ปรับค่าความแรงของสัญญาณที่เข้ามาและเพื่อให้สัญญาณทั้งสองที่มารวมกันให้มีความสมดุลเหมาะสมกันและส่งไปยังวงจรขับสัญญาณต่อไปหรืออาจจะส่งไปที่วงจรขยายสัญญาณก่อน ถ้าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจร

รวมสัญญาณแบบพาสซีฟนั้นมีความแรงของสัญญาณต่ำเมื่อทำการขยายสัญญาณแล้วก็จะส่งไปยังวงจรขับสัญญาณต่อไป



รูปที่ 2.28 วงจรรวมสัญญาณแบบพาสซีฟ

2.12 วงจรขับสัญญาณแสง (Driver) [1, 4, 5]

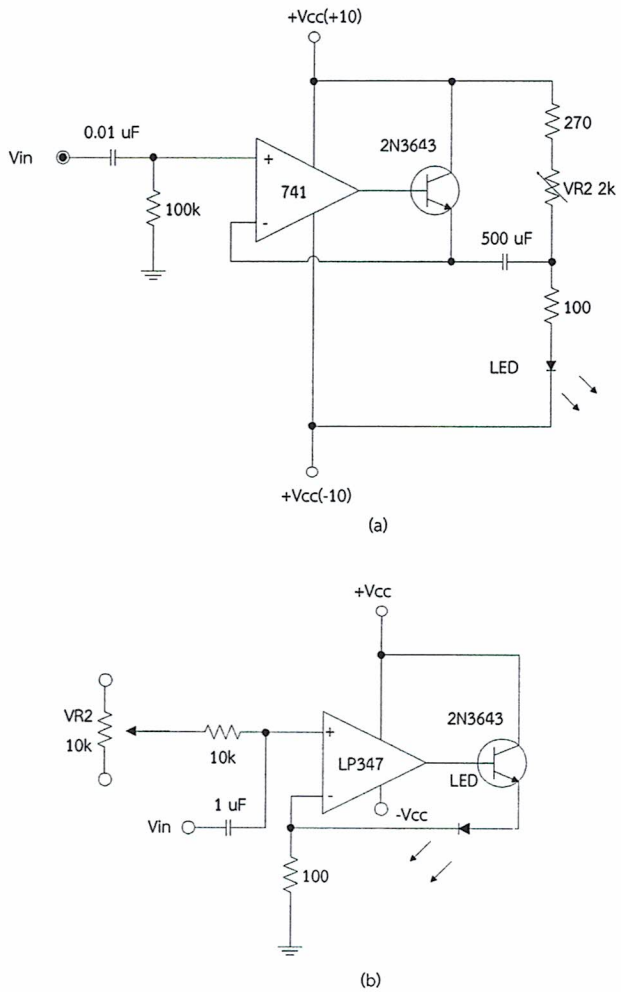
วงจรขับสัญญาณแสงหรือวงจรไดรเวอร์เป็นส่วนสำคัญที่จะช่วยให้แหล่งกำเนิดแสงที่เป็นแอลอีดีหรือเลเซอร์ไดโอดทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลักษณะวงจรไดรเวอร์สำหรับแอลอีดีนั้นค่อนข้างที่จะแตกต่างจากวงจรของเลเซอร์ไดโอด ทั้งนี้เนื่องจากแอลอีดีมีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นในการเปล่งแสงตามค่ากระแสไบอัสโดยตรง ทำให้เหมาะสำหรับระบบการสื่อสารที่ใช้ข้อมูลแบบแอนะลอก ในขณะที่พลังงานแสงเปล่งออกมาจากเลเซอร์ไดโอดนั้น มักมีการเปลี่ยนแปลงสูงมากอย่างรวดเร็ว ทั้งๆ ที่กระแสไบอัสมีมากกว่ากระแสเทรสโฮล (I_{th}) มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จึงนิยมใช้เลเซอร์ไดโอดกับวงจรขับสัญญาณแสงที่มีข้อมูลเป็นแบบดิจิตอล

2.12.1 วงจรสำหรับแอลอีดี (Light Emitting Diode) แม้ว่าแอลอีดีจะเหมาะสมกับการส่งสัญญาณแบบแอนะลอกแต่ในระบบของการสื่อสารระยะใกล้นั้น อาจจะสามารถใช้การส่งข้อมูลที่เป็นดิจิตอลได้ดังวงจรรูปที่ 2.29 ซึ่งเป็นวงจรใช้งานแบบง่าย ใช้สำหรับส่งข้อมูลที่มีค่าเป็น 1 ทางดิจิตอล โดยค่าของกระแสที่ไหลผ่านแอลอีดี ถูกกำหนดโดยกระแสคอลเลเตอร์ (I_C) ของทรานซิสเตอร์ Q_1 และสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$I_F = I_C = \frac{(V_{CC}-V_F)}{R_1} \tag{8}$$

เมื่อ V_F แรงดันตกคร่อมแอลอีดี ขณะไบอัสมีค่าตามสเปคที่กำหนด กระแสเบส I_B เป็นตัวที่ควบคุมกระแส I_C เป็นตัวที่ควบคุมกระแส I_C อีกทีหนึ่งตามสูตรของ $I_B = I_C / \beta$ เมื่อ β คือกำลังขยายของทรานซิสเตอร์และค่า I_B นั้นคำนวณได้จาก

$$I_B = \left(\frac{Vi_{(MAX)}-V_{BE}-V_F}{R_B}\right) \tag{9}$$

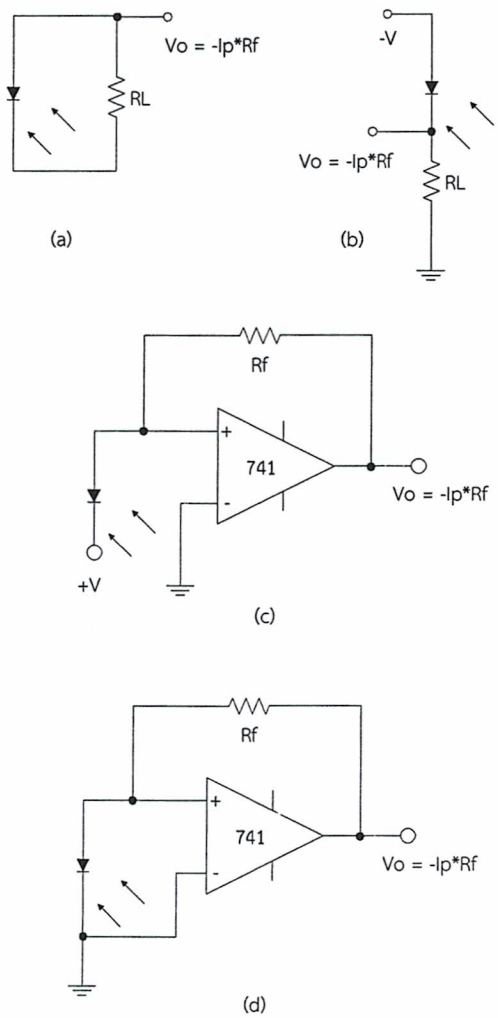


รูปที่ 2.29 วงจรขับสัญญาณแอลอีดีแบบแอนะลอก

เมื่อ Vi_{MAX} คือ ค่าที่แรงดันสูงสุดของสัญญาณเข้าหรือก็คือระดับแรงดันขณะที่ข้อมูลทางดิจิตอลเป็น “1” วงจรที่แสดงดังรูปที่ 2.29(b) นั้นเป็นอีกลักษณะหนึ่งของการส่งข้อมูลดิจิตอลที่มีเสถียรภาพมากกว่า โดยใช้ IC 75451 หรือ IC 75450 ที่ขา 1 ของแอนด์เกตถูกกำหนดสภาวะทางลอจิกเป็น “1” (+5V) ขาที่เหลือใช้สำหรับส่งข้อมูล โดยขณะที่ข้อมูลเป็น “1”แอลอีดีจะไม่ทำงาน และเมื่อข้อมูลเป็น “0” แอลอีดีจะส่งสัญญาณแสงออกมา ส่วนที่ตัวเก็บประจุใช้สำหรับลดผลของการเกิดแรงดันกระชาก ซึ่งปกติจะใช้ค่าประมาณ 1 ไมโครฟารัด และค่าของตัวต้านทาน R_1 สามารถคำนวณได้จากกระแสไบอัสตรง I_F ของแอลอีดีที่กำหนดตามสเปคของมัน โดยใช้สูตรการคำนวณดังนี้

$$R_1 = \left(\frac{V_{CC}-V_F}{I_F}\right) \tag{10}$$

วงจรขับสัญญาณแสงแอลอีดี สำหรับแอนะลอก แสดงดังรูปที่ 2.29 โดยรูปที่ 2.29(a) เป็นตัวอย่างของวงจรที่ถูกออกแบบมาให้มีค่ากระแสไบอัสแอลอีดีอยู่ระหว่าง 7.5-40 มิลลิแอมป์ โดยขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน VR1 ขนาดของสัญญาณอินพุตมีค่าอยู่ระหว่าง +2 โวลท์ ซึ่งจะถูกแปลงเป็นกระแสไหลผ่านแอลอีดีที่มีค่าระหว่าง+10 มิลลิแอมป์ ส่วนวงจรในรูปที่ 2.29(b) ใช้กระแสขับแอลอีดีเป็นสัญญาณป้อนกลับในวงจร ทำให้วงจรมีเถียรภาพขึ้น ตัวต้านปรับค่าได้ VR2 จะใช้เป็นตัวกำหนดขนาดกระแสไบอัสให้กับวงจร



รูปที่ 2.30 วงจรการทำงานของโฟโตไดโอด

2.12.2 วงจรดีเทกเตอร์ (Detector Circuit) ลักษณะการทำงานของโหมดโฟโตวอลตาอิก ดังรูปที่ 2.30(a) โดยการต่อโฟโตไดโอดอนุกรมกับตัวอนุกรมกับตัวต้านทานดโหลด R_L เมื่อมีแสงตกกระทบเกิดกระแสไหล ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมโหลด R_L มีค่าเท่ากับ I_P*R_L เมื่อ I_P คือกระแสที่ไหล

ในวงจรอนุกรมซึ่งจะมีค่าไม่มากหาต้องการให้กระแส I_P มีค่ามากขึ้น จะต้องเพิ่มแรงดันไบอัสให้กับโฟโตไดโอดดังรูปที่ 2.30(b) เพื่อให้เกิดการทำงานในโหมดโฟโตคอนดัคทีฟ (Photo Conductive)

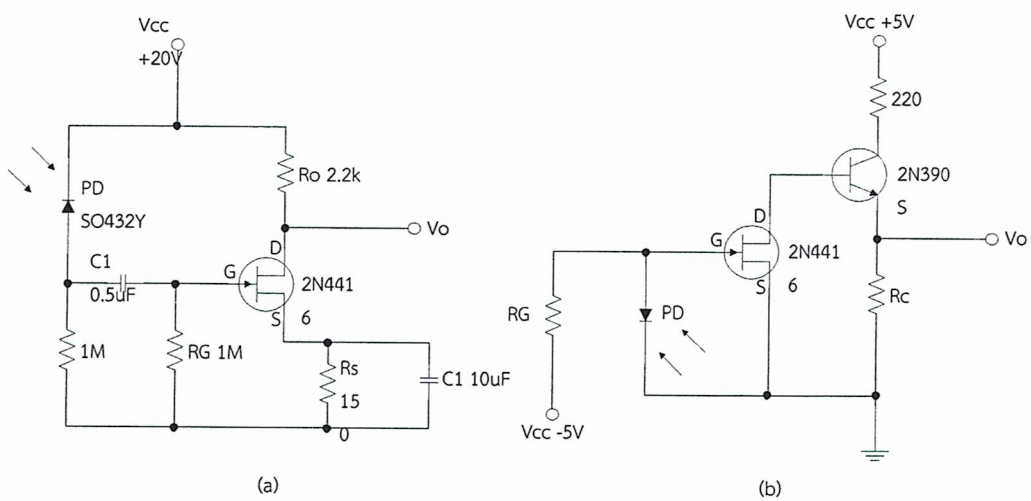
ในทางปฏิบัติมักจะใช้วงจรที่สามารถทำให้ค่าของแรงดันตกคร่อมโฟโตไดโอดมีค่าคงที่ตลอดเวลาเพื่อช่วยให้สร้างกระแส I_P ได้อย่างมีเสถียรภาพ ดังเช่นวงจรในรูปที่ 2.30(c) และรูปที่ 2.30(d) ที่ทำงานในโหมดต่างกัน แต่ค่าของแรงดันเอาท์พุต V_{OUT} ที่ต้องการจะมีค่าเป็นไปตามสมการเดียวกันคือ

$$V_{OUT} = -I_P * R_P \tag{11}$$

วงจรในรูปที่ 2.30(d) มีโหมดการทำงานแบบโฟโตคอนดัคทีฟ จึงสามารถทำงานได้เร็วกว่าวงจรในรูปที่ 2.30(c) ซึ่งเป็นชนิดโหมดโฟโตวอลตาอิก ค่าของกระแส I_P เป็นผลอันเนื่องมาจากผลของแสงตกกระทบและคำนวณได้จาก

$$I_P = R * P_{IN} \tag{12}$$

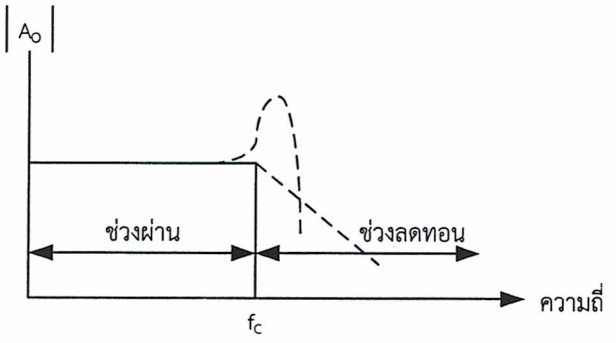
เมื่อ R เป็นค่าของกระแสต่อพลังงาน (แอมป์/วัตต์) กำหนดด้วยสเปกของมันและ P_{IN} เป็นพลังงานแสงหรือขนาดความเข้มของแสงที่ตกกระทบโฟโตไดโอด การออกแบบวงจรจะต้องคำนึงถึงค่าของกระแสที่เกิดจากโฟโตไดโอดขณะมีการไบอัสกลับรวมเข้าไปกับ I_P ด้วยจึงจะได้ค่าจริงออกมา วงจรดังรูปที่ 2.31 เป็นวงจรโฟโตไดโอดที่ใช้ทรานซิสเตอร์เป็นส่วนขยายสัญญาณขั้นต้น โดยรูปที่ 2.31(a) เหมาะสำหรับการใช้งานในระบบแอนะลอกและในรูปที่ 2.31(b) นั้นจะใช้กับระบบดิจิตอล



รูปที่ 2.31 วงจรโฟโตดีเทกเตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์

2.13 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) [7]

วงจรแบบกรองความถี่ต่ำจะยอมให้ความถี่ผ่านได้ในช่วงตั้งแต่สัญญาณที่เป็นแรงดันกระแสตรงไปจนถึงความถี่คัตออฟ (Cut-off Frequency) แทนด้วยเครื่องหมาย f_c ความถี่คัตออฟคือความถี่ ณ ขณะที่อัตราขยายของวงจรมีค่าลดลงเป็น 0.707 เท่าของอัตราขยายปกติ (-3 เดซิเบล) บางครั้งอาจเรียกความถี่นี้ได้ว่า ความถี่มุม (Corner Frequency) ถ้ามีความถี่ที่สูงเกิน f_c ผ่านวงจรจะลดทอนขนาดความถี่นั้นจนมีค่าน้อยมาก ๆ จากในรูปเส้นทึบแสดงถึงผลในทางอุดมคติ ส่วนเส้นประแสดงถึงผลของวงจรในทางความเป็นจริง ในช่วงที่ยอมให้ความถี่ผ่านได้เราเรียกว่า ช่วงผ่าน (Pass Band) และช่วงที่ไม่ยอมให้ความถี่ผ่านเรียกว่า ช่วงลดทอน (Stop Band) แสดงได้ในรูปที่ 2.32



(ก) แบบกรองความถี่ต่ำผ่าน

รูปที่ 2.32 การตอบสนองความถี่ต่ำผ่าน

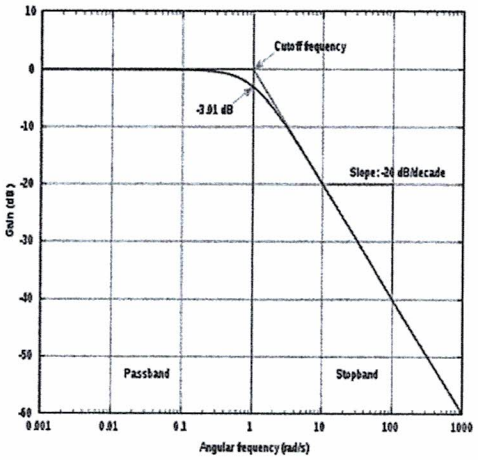
โดยวงจรนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกรองสัญญาณภาพที่มีความถี่ต่ำกว่าสัญญาณเสียงอันเนื่องมาจากมอดูเลตแบบเอฟเอ็ม โดยจะใช้วงจรกรองความถี่ต่ำแบบพาสซีฟ ซึ่งการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน สิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นพิเศษสำหรับการออกแบบวงจรฟิลเตอร์ชนิดกรองความถี่ต่ำผ่านก็คือ ค่าความถี่คัตออฟ ω_c ที่ต้องการใช้งาน ที่ค่าความถี่นี้อัตราขยายจะมีค่าเป็น 0.707 ของอัตราขยายที่ความถี่ต่ำ ความถี่คัตออฟหาได้จากสมการ

$$\omega_C = \frac{1}{RC} = 2\pi f_C \qquad (13)$$

โดยที่ ω_c มีหน่วยเป็น เรเดียนต่อวินาที (rad/s)
f_C มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)
R มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)
C มีหน่วยเป็น ฟารัด (F)

ในทำนองเดียวกัน จากสมการที่ (13) เมื่อกำหนด ω_c ไว้แล้ว ต้องการจะหาค่า R ก็จะได้เป็น

$$R = \frac{1}{\omega_C C} = \frac{1}{2\pi f_C C} \tag{14}$$

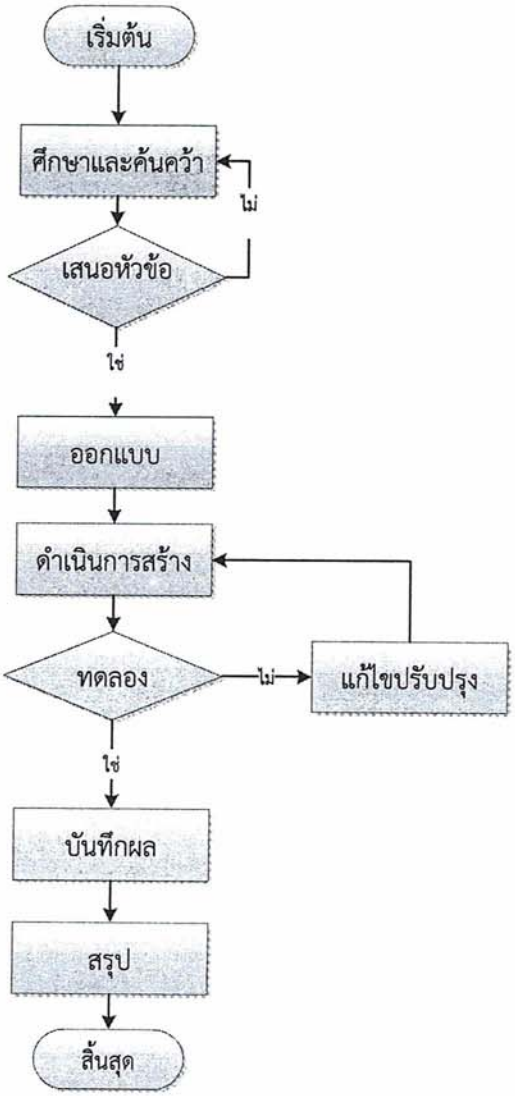


รูปที่ 2.33 กราฟผลการตอบสนองความถี่ต่ำผ่าน

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงาน

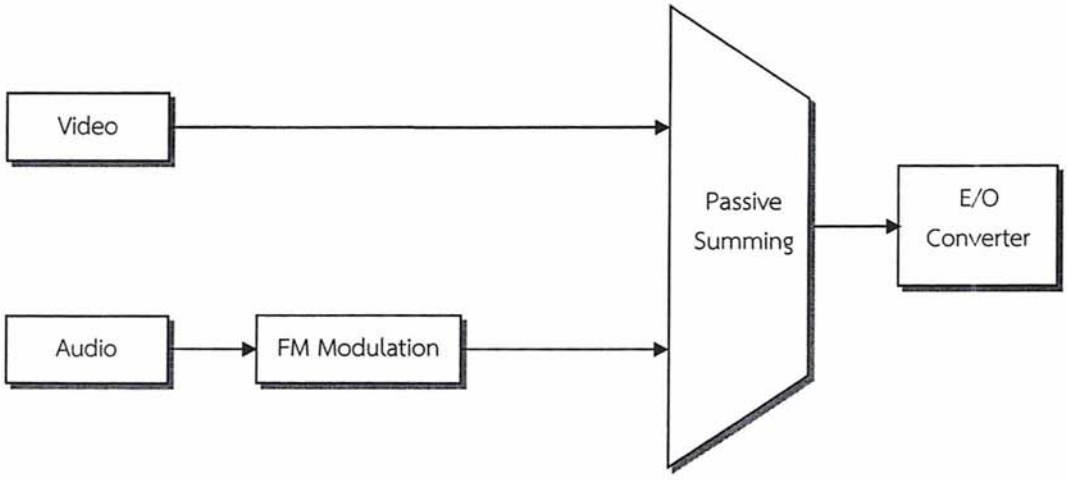
การออกแบบและการสร้างชุดส่งสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสงได้ทำการออกแบบ 2 ส่วนคือ ภาคส่งและภาครับ โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2 การออกแบบวงจรภาคส่ง (Transmitter Circuits Design)



รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมทางด้านภาคส่ง

3.2.1 การออกแบบวงจรมอดูเลตสัญญาณเสียงทางความถี่ (Frequency Modulator)

เนื่องจากสัญญาณเสียงมีความถี่ต่ำ (ประมาณ 20 Hz-20 kHz) ซึ่งมีความถี่อยู่ในช่วงสัญญาณภาพจึงไม่สามารถนำมารวมได้โดยตรง เพราะจะเกิดความผิดเพี้ยน (Distortion) ของสัญญาณ เนื่องจากจะไปทับซ้อนกับสัญญาณภาพ ดังนั้นจึงต้องทำการมอดูเลตสัญญาณเสียงกับคลื่นพาห์ โดยจะทำการมอดูเลตทางความถี่เพราะจะสะดวกในการออกแบบวงจรเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสงซึ่งใช้หลักการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นความเข้มแสง (Intensity Modulation)

ในวงจรเอฟเอ็มมอดูเลเตอร์ที่ออกแบบเราได้เลือกใช้ไอซีเบอร์ NE564 ซึ่งเป็นไอซีแบบที่ใช้เฟสล็อกลูป (Phase Locked Loop) ซึ่งสามารถที่จะใช้ทำเป็นวงจรเอฟเอ็มมอดูเลเตอร์และจะใช้ขาที่ 12,13 เป็นตัวกำหนดค่าความถี่ฟรีรันนิ่งจะใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวกำหนดความถี่ที่ต้องการ และสามารถหาค่าของตัวเก็บประจุได้จากสูตรดังนี้ ซึ่งรายละเอียดของไอซีเบอร์ NE564 จะอยู่ในภาคผนวก

$$c_o \approx \frac{1}{C.f_C} \qquad pF$$

c_o คือ ค่าตัวเก็บประจุที่จะเป็นตัวกำหนดค่าความถี่ในการออกแบบ

f_C คือ ค่าความถี่กลางของความถี่ที่ต้องการ

C คือ ค่าคงที่ (Constant) มีค่าเท่ากับ 2500

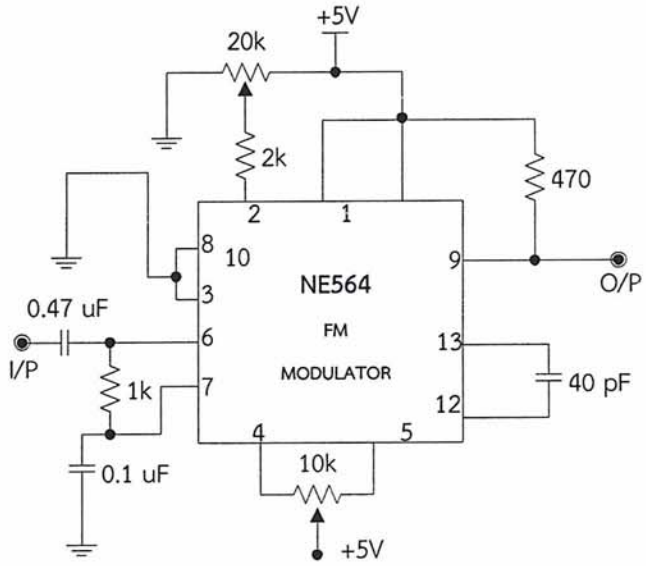
ดังนั้นจากสูตรจะหาค่า c_o ได้เท่ากับ

$$C_O \approx \frac{1}{(2500 * 10\ \text{MHz})}$$

$$\approx 40\ \text{pF}$$

ในการใช้งานจะใช้ตัวเก็บประจุค่าคงที่ต่อรวมกับตัวเก็บประจุปรับค่าได้ (Trimmer) โดยต่อระหว่างขา 12 และขา 13 เพื่อให้ได้ความจุตามต้องการ

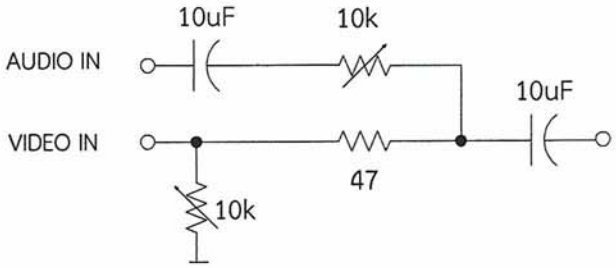
กำหนดความถี่ล็อกโดยใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 10 kΩ ต่อร่วมกับตัวต้านทานค่าคงที่ขนาด 2 kΩ เป็นตัวปรับกระแสไบอัสให้ขา 2 อินพุตสัญญาณเสียงที่จะนำมามอดูเลตเข้าที่ขาที่ 4 และ 5 ซึ่งเป็นลูปฟิลเตอร์ ของวงจรเปรียบเทียบเฟส และต่อตัวประจุค่าคงที่มีขนาดประมาณ 0.01 μF ที่ขา 4 และ 5 ลงกราวด์ เพื่อช่วยตัดสัญญาณรบกวนความถี่สูงทิ้ง และป้อนสัญญาณอินพุตเข้าที่ขา 4 และ ขา 5 ดังวงจรที่ได้ออกแบบดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรมอดูเลตทางความถี่

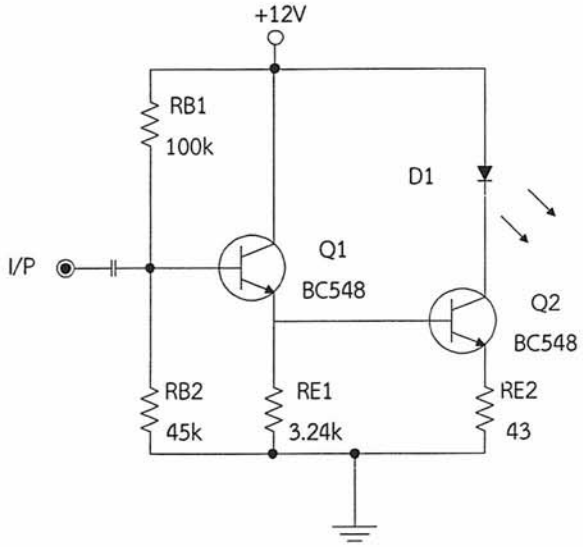
3.2.2 การออกแบบวงจรรวมสัญญาณ (Passive Summing)

วงจรจะทำหน้าที่รวมสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงที่ถูกมอดูเลตความถี่เข้าด้วยกัน เพื่อส่งไปยังภาคขับแอลอีดี (LED Driver) โดยที่เราจะใช้อุปกรณ์ประเภทพาสซีฟ เช่น ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ เพื่อที่จะทำให้เกิดเป็นสัญญาณใหม่ที่มีสองสัญญาณเดิมปนอยู่ในสัญญาณใหม่ที่เกิดขึ้น โดยที่เราสามารถที่จะกำหนดค่า C_1 และ C_2 ให้เหมาะสมกับวงจรและก็เหมือนกับค่าของความต้านทานนั้น เราจะใช้ตัวต้านทานที่เป็นแบบปรับค่าได้เพื่อปรับค่าทั้งสองให้เหมาะสม ดังวงจร รูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรรวมสัญญาณแบบพาสซีฟ

3.2.3 การออกแบบวงจรเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสง (E/O Convertor)



รูปที่ 3.5 วงจรเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสง

จากรูปที่ 3.5 เป็นวงจรเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสง จากวงจรจะประกอบด้วย ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว ซึ่งทำหน้าที่ต่างๆ ดังนี้ จากรูป ทรานซิสเตอร์ Q1 ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายคอลเลคเตอร์ร่วมที่มีการไบอัสแบบแบ่งแรงดัน และอัตราขยายแรงดันทางเอาต์พุตที่ขาอิมิตเตอร์ของ Q1 จะประมาณเท่ากับ 1 และจากเอาต์พุตนี้จะถูกส่งไปเป็นอินพุตของ Q2 ทำการไบอัสให้ Q2 ทำงานส่วนการทำงานของ Q2 นั้นจะมีแอลอีดี ต่อที่ขาคอลเลคเตอร์แบบไบอัสตรง และที่ขาอิมิตเตอร์ จะมีค่าความต้านทานเพื่อที่จะกำหนดค่าของกระแสที่จะไบอัสให้แก่แอลอีดี และการคำนวณหาค่ากระแสที่จะทำการไบอัสให้แก่วงจร โดยการกำหนดค่าต่างๆ ดังนี้

จาก LED เบอร์ HFBR 1414 จะให้ความยาวคลื่นที่นิยมใช้ในงานสื่อสารของเส้นใยแสง (Fiber Optic communication) ซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 820 nm และทนกระแสสูงสุด

ได้ 100 mA เพื่อความปลอดภัย ได้ออกแบบให้ทำงานเพียง 50% ของกระแสสูงสุด คือไม่เกิน 50 mA

กำหนดให้

$$V_{RE2} = 2V$$

$$R_{E2} = \frac{V_{RE2}}{I_{E2}} = \frac{2V}{50mA} = 40\Omega$$

$$V_{RE1} = 2V + 0.7V = 2.7V$$

$$V_{RB1} = V_{BQ1} = 2.7V + 0.7V = 3.4V$$

กำหนดให้ $R_{B1} = 100k$

$$\text{จาก } V_{RB1} = \frac{R_{B2} \cdot V_{CC}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

$$3.4\ V = \frac{R_{B2} \cdot 12V}{100k + R_{B2}}$$

$$3.4\ (100k + R_{B2}) = 12\ R_{B2}$$

$$340k + 3.4\ k\ R_{B2} = 12\ R_{B2}$$

$$12\ R_{B2} - 3.4\ R_{B2} = 340k$$

$$R_{B2} = \frac{340k}{8.6} = 40k$$

เลือกใช้ $R_{B2} = 45k$

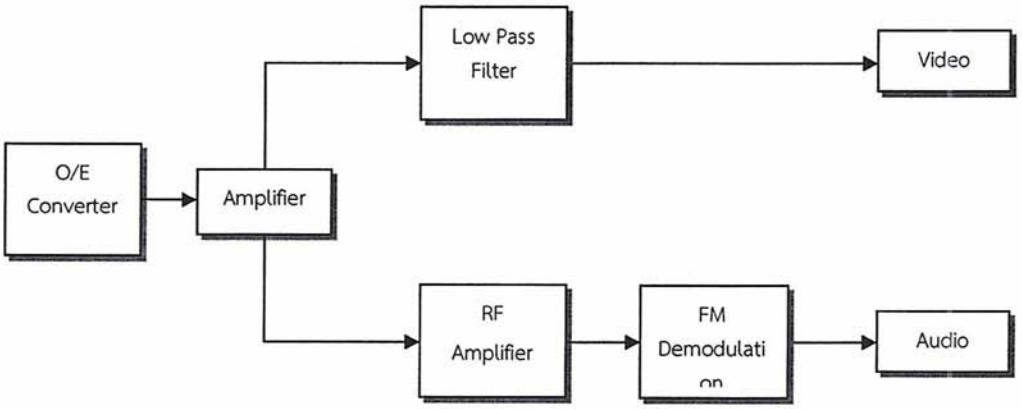
จาก $10\ R_{B2} = \beta\ RE$

เลือกทรานซิสเตอร์ Q1 เป็นเบอร์ BC 548 เป็นตัวขับตัวทรานซิสเตอร์ Q2 เบอร์เดียวกัน คิดอัตราขยาย (β) อยู่ที่ 150

$$\text{ได้ } RE = \frac{10 \cdot 45\ k}{150} = 3\ k$$

เลือกใช้ $RE = 3.2\ k\Omega$

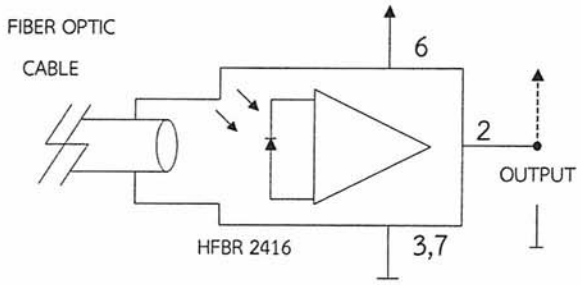
3.3 การออกแบบวงจรภาครับ (Receiver Circuits Design)



รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมทางด้านภาครับ

3.3.1 การสร้างวงจรเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า (O/E Convertor)

จากรูปที่ 3.7 เป็นวงจรที่เปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า เมื่อส่งสัญญาณแสงเข้ามาในเส้นใยแก้วนำแสง โดยแอลอีดี (LED) ทางด้านรับก็จะรับสัญญาณแสงที่ส่งเข้ามาโดยใช้พินโฟนโตไดโอด (Pin Photodiode) ใช้เบอร์ HFBR 2416 ซึ่งเป็นโฟโตไดโอดที่สามารถรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 820 nm ได้ จากภาพเมื่อมีแสงเข้ามายังพินโฟโตไดโอดก็จะทำให้ค่าความต้านทานภายในพินโฟโตไดโอดลดลง ซึ่งสามารถทำให้กระแสไหลผ่านตัวพินโฟโตไดโอดได้และทำการขยายโดยวงจรขยายภายในของพินโฟโตไดโอดแสดงดังรูปที่ 3.7

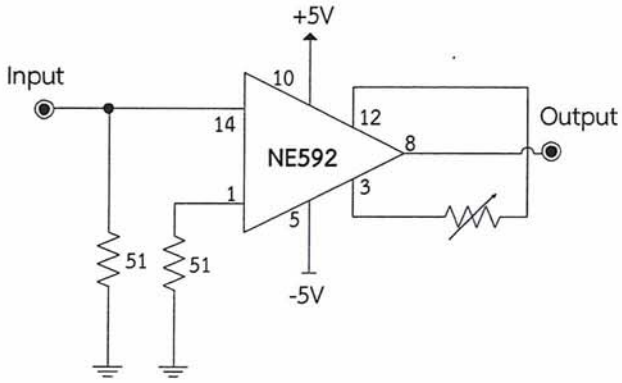


รูปที่ 3.7 วงจรเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า (O/E Convertor)

3.3.2 วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier)

วงจรนี้ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ได้จากวงจรเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าให้มีกำลังแรงขึ้น ในการออกแบบจะใช้ไอซีเบอร์ NE592 ซึ่งเป็นไอซีขยายสัญญาณ ซึ่งมีแบนด์วิดท์กว้าง

ถึง 120 MHz สามารถปรับเกณฑ์ขยายได้ 0 ถึง 400 เท่า โดยปรับค่าความต้านทานที่อยู่ที่ขา Gain Select ที่ต่ออยู่ระหว่างขา 11 (G1A) และขา 4 (G2B) ตามที่ต้องการ ซึ่งการออกแบบนั้นสามารถต่อความต้านทานโดยดูค่าจากกราฟในภาคผนวก



รูปที่ 3.8 วงจรขยายสัญญาณ

3.3.3 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)

สำหรับสัญญาณภาพจะมีความถี่อยู่ในช่วง 0 ถึง 5.5 MHz ดังนั้นจึงต้องใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านโดยมีความถี่คัตออฟอยู่ที่ประมาณ 5.5 MHz ในการออกแบบนั้นจะใช้วงจรกรองความถี่ต่ำแบบ แอคทีฟฟิลเตอร์กำลังสอง (Active Filter)

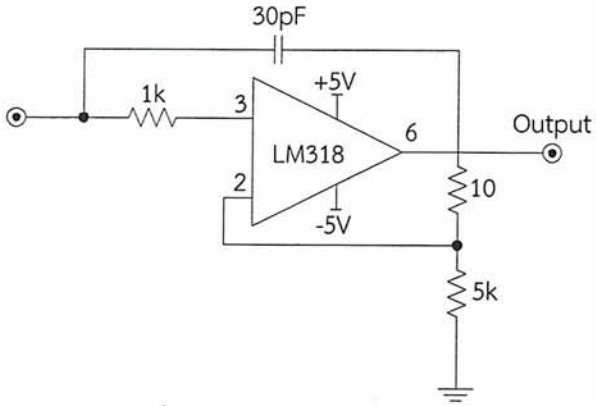
กำหนดให้ f = 5.5 MHz, R = 1 kΩ, R_1 = 10 Ω, R_2 = 5 kΩ

$$\omega = \frac{1}{R_C}$$

$$K = 1+\frac{R_1}{R_2}$$

จะได้

$\therefore$ C = 30 pF



รูปที่ 3.9 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

3.3.4 การออกแบบวงจรขยายความถี่วิทยุ (RF Amplifier)

สัญญาณที่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อให้สัญญาณภาพผ่านเหลือแต่สัญญาณเสียงที่ถูกลดทอนลงไปมาก จึงจำเป็นต้องมีการขยายสัญญาณโดยใช้วงจรขยายความถี่วิทยุ เพื่อให้สัญญาณเพียงพอที่จะมอดูเลตได้ ในการออกแบบใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ BC548 เป็นวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม (Common Emitter)

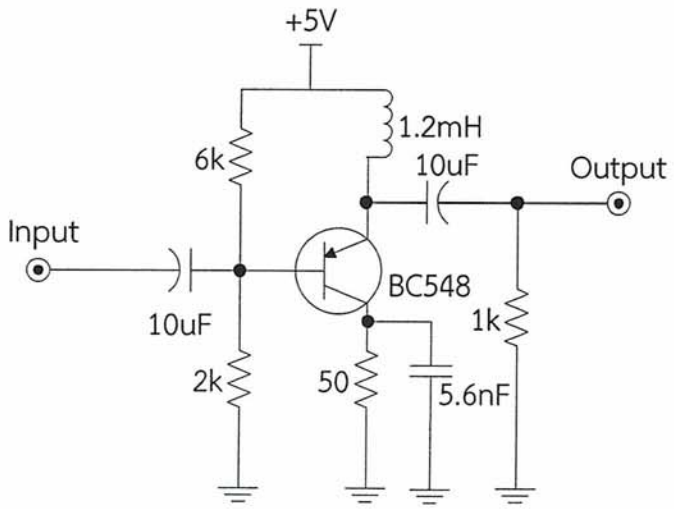
ทำการออกแบบโดยกำหนดให้ V_{CC} = 5V, V_{BEon} = 0.7V, β = 110, R_L = 1 kΩ, R_{FC} = 1.2 mH และ I_C = 8.89 mA จะได้

R_1 = 4.27 kΩ ,R_2 = 1.48 kΩ , R_3 = 10 kΩ , R_4 = 44 kΩ

ในการออกแบบยอมให้มีความผิดพลาดทางแอมพลิจูดได้ ดังนั้นสามารถออกแบบให้วงจรมีอัตราการขยายสูงๆ โดยใช้ทรานซิสเตอร์เพียงตัวเดียว หาค่าอัตราการขยายโดยใช้ **π** – Parameter

$$AV = \frac{[-\beta(R_L // 2\pi fL]}{[r\pi+(\beta+1)R_E]}$$

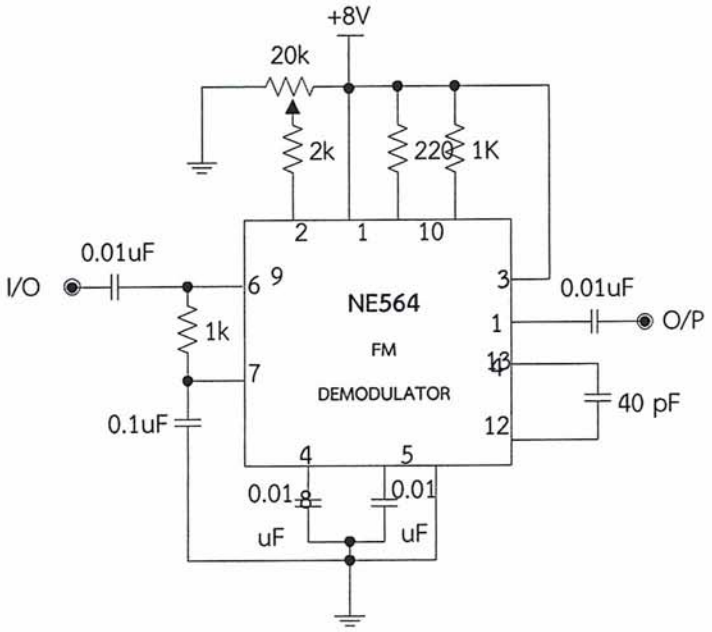
จะได้อัตราการขยายประมาณ 70 เท่า รูปวงจรที่ออกแบบไว้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรขยายความถี่วิทยุ

ในการออกแบบวงจรเอฟเอ็มดีมอดูเลตเตอร์ เราจะใช้ไอซีเบอร์ NE564 เช่นเดียวกันกับวงจรเอฟเอ็มมอดูเลเตอร์ของทางด้านภาคส่ง ซึ่งวงจรนี้จะทำหน้าที่โดยการดีมอดูเลตสัญญาณที่ผ่านวงจรขยายความถี่วิทยุที่รวมมากับสัญญาณพาห์ออกมา (รายละเอียดและสูตรของไอซีเบอร์ NE564 ดูได้จากภาคผนวก)

3.3.5 การออกแบบวงจรเอฟเอ็มดีมอดูเลเตอร์ (Frequency Demodulator)

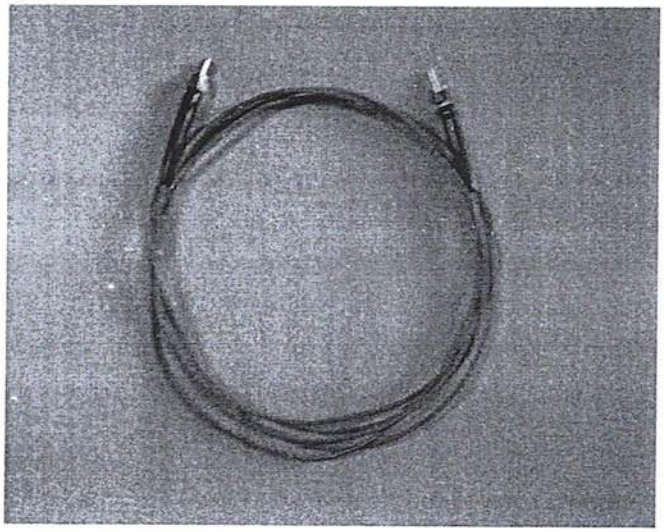


รูปที่ 3.11 วงจรเอฟเอ็มดีมอดูเลเตอร์

3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

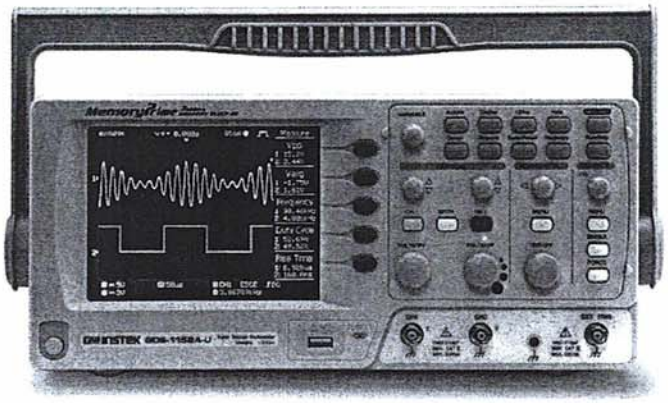
รูปที่ 3.12 ชุดส่งสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

รูปที่ 3.13 ชุดรับสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

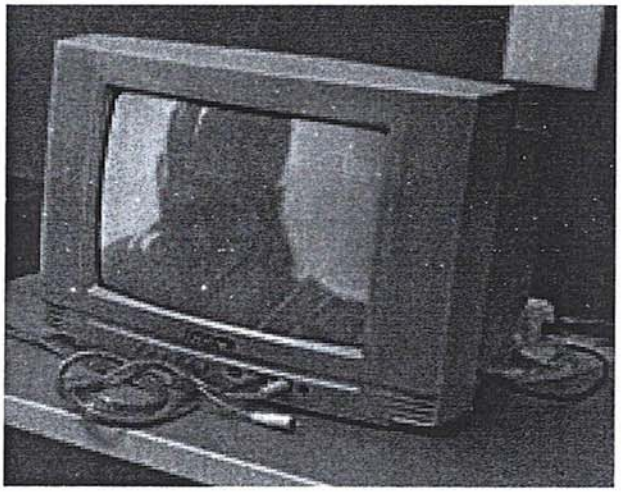


รูปที่ 3.14 เส้นใยแก้วนำแสงชนิด Graded –Index ยาวประมาณ 5 เมตร

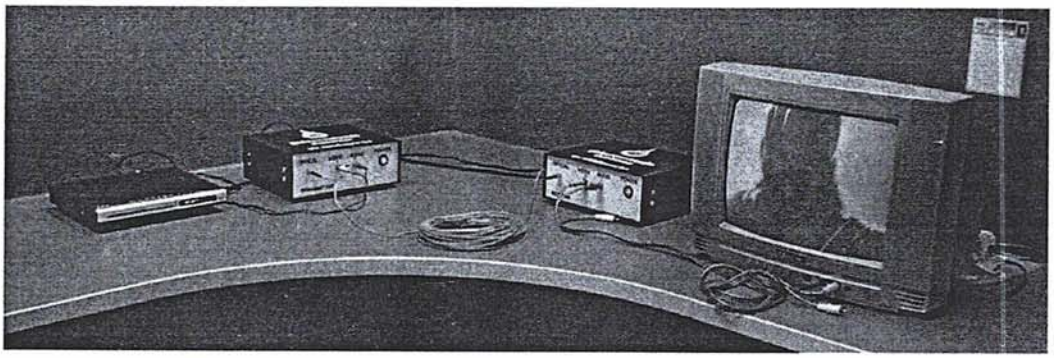
รูปที่ 3.15 เครื่องเล่นดีวีดีหรือวีซีดี



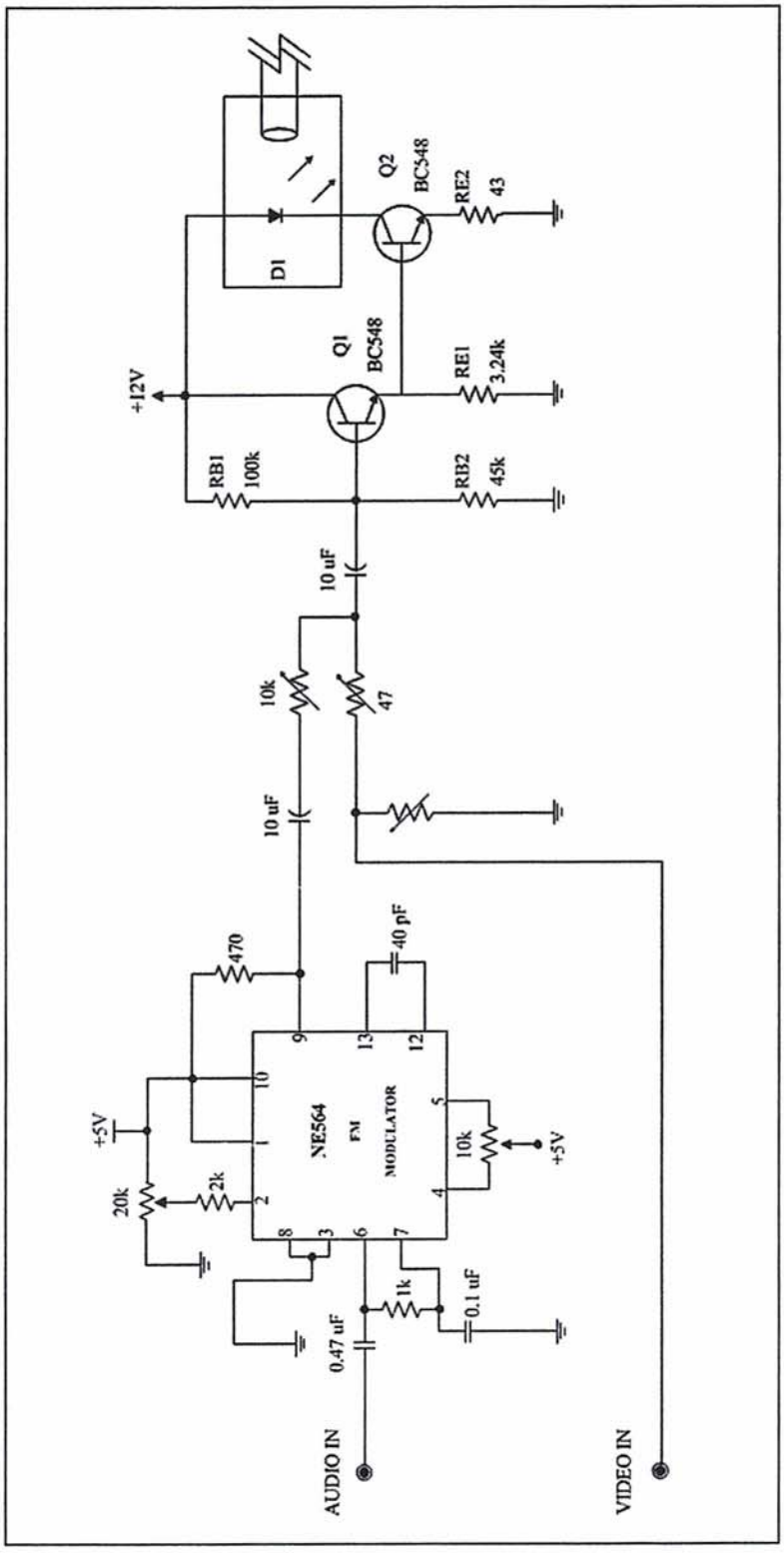
รูปที่ 3.16 ออสซิลโลสโคป



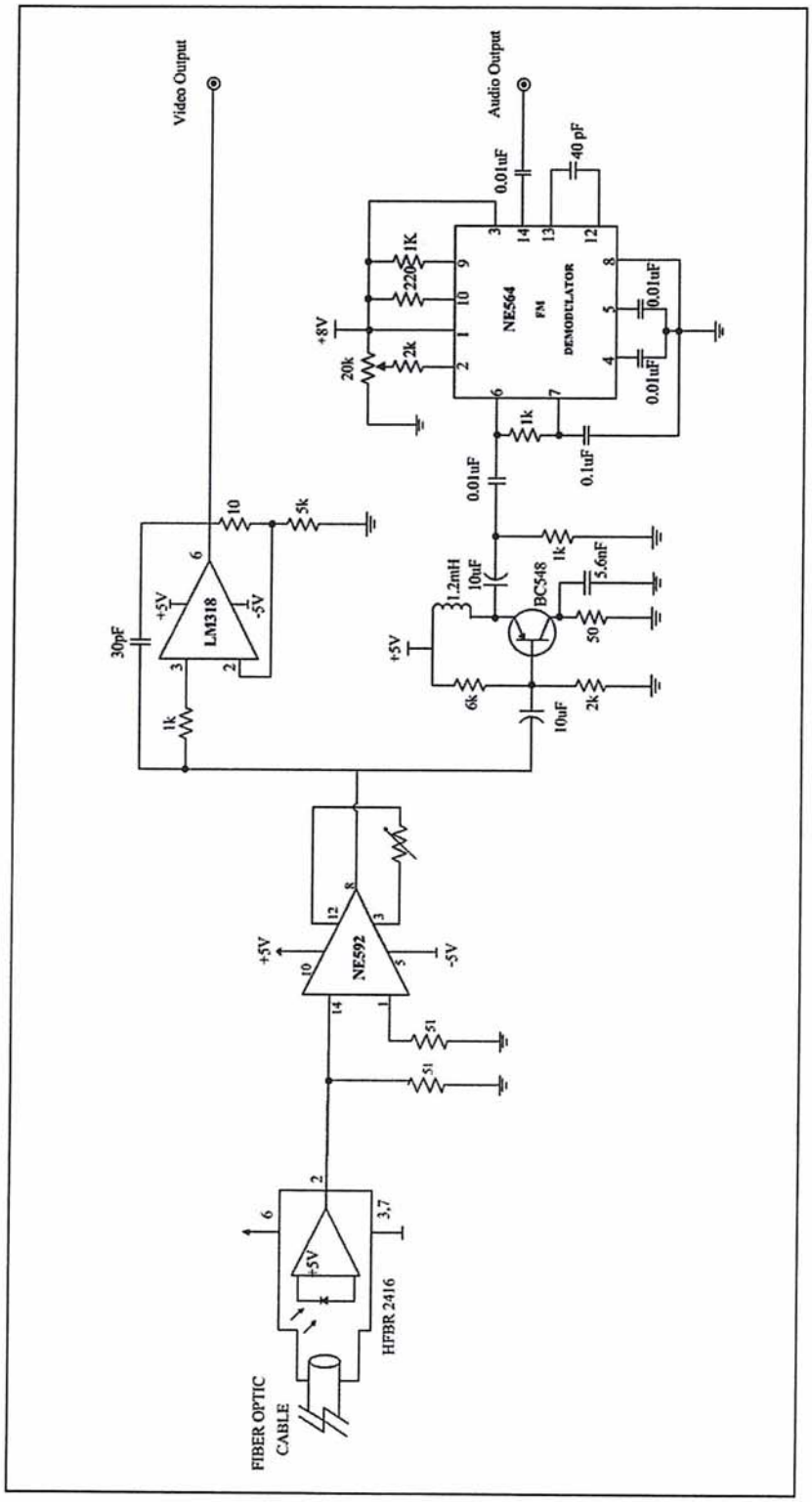
รูปที่ 3.17 จอแสดงผล (เครื่องรับโทรทัศน์)



รูปที่ 3.18 การต่ออุปกรณ์ต่างๆ



รูปที่ 3.19 วงจรรวมภาคส่ง (Transmitter Circuits)



รูปที่ 3.20 วงจรรวมภาครับ (Receiver Circuits)

บทที่ 4
ผลการดำเนินงาน

ในบทนี้จะแสดงผลการทดลองของงานวิจัยที่ออกแบบและสร้างขึ้น โดยการทดลองจะป้อนสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงจากช่อง AV เอาต์พุตของเครื่องเล่นดีวีดีเข้าที่ภาคส่งและทำการปรับที่จุดต่างๆ ให้ได้สัญญาณที่ดีที่สุด เพื่อทำการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วไปยังภาครับเพื่อแยกออกเป็นสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงเข้าเครื่องรับโทรทัศน์ที่ช่อง AV โดยที่สัญญาณเสียงนั้น จะต้องทำการปรับค่าความต้านทานที่วงจรดีมอดูเลตทางความถี่ก่อนเพื่อให้สัญญาณมีความแรงขึ้นพอที่ส่งออกลำโพง

โดยสามารถวัดสัญญาณได้ที่จุดวัดสัญญาณต่างๆ (Test Point) ที่ได้แสดงเป็นแผนภาพให้เห็นถึงจุดวัดต่างๆ ในแต่ละภาคโดยใช้ออสซิลโลสโคปในการตรวจวัดสัญญาณได้

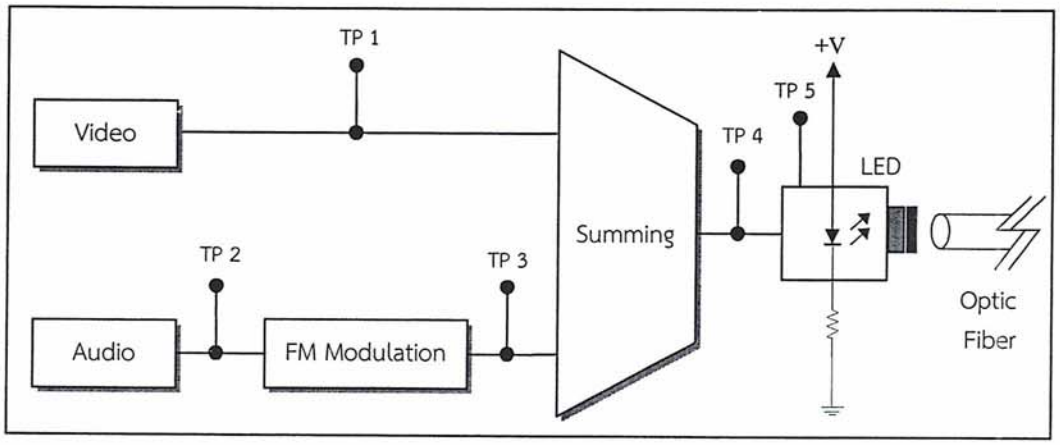
4.1 ผลการทดสอบสัญญาณทางภาคส่ง

4.2 ผลการทดสอบสัญญาณทางภาครับ

4.3 ผลการทดสอบในการส่งสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแก้ว

4.1 ผลการทดสอบสัญญาณทางภาคส่ง

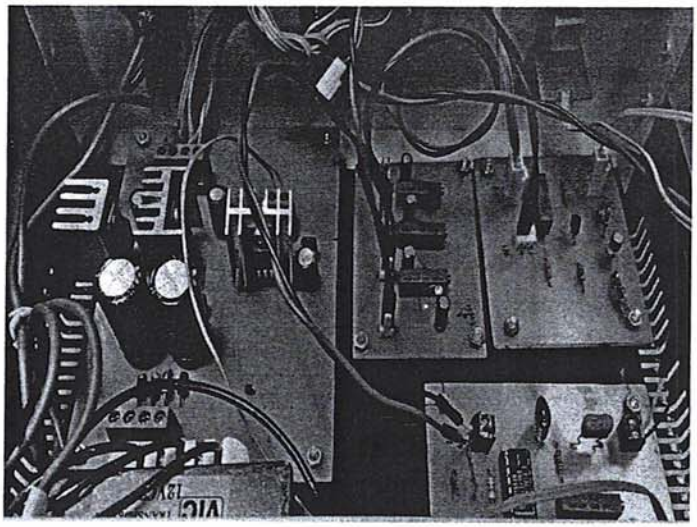
ในการส่งและรับสัญญาณภาพและสัญญาณเสียง ในการทดสอบเราจะทำการจับสัญญาณที่จุด TP (Test Point) ของแต่ละวงจรซึ่งได้แสดงเป็นแผนภาพให้เห็นถึงจุดวัดต่างๆ ดังรูปที่ 4.1



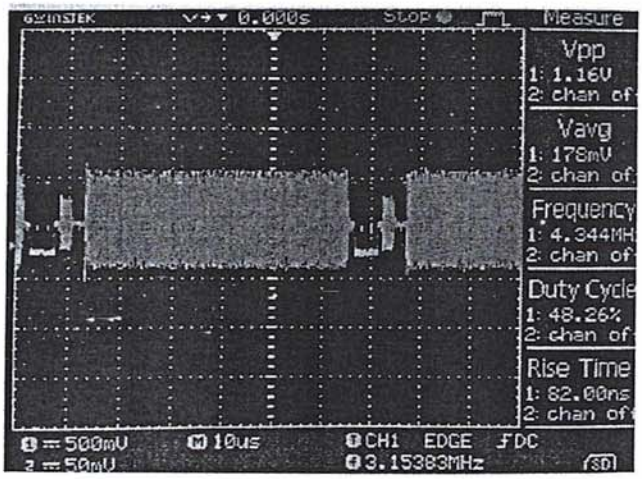
รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมจุดวัดสัญญาณต่างๆ ทางด้านภาคส่ง

4.1.1 การวัดสัญญาณภาพ

จากรูปที่ 4.2 แสดงอุปกรณ์ที่อยู่ในรูปที่ 4.1 ทั้งหมด และทำการวัดสัญญาณที่ได้จากเครื่องเล่นดีวีดี ณ จุด TP 1 ความถี่ที่ได้คือ 3.1538 MHz แสดงดังรูปที่ 4.3



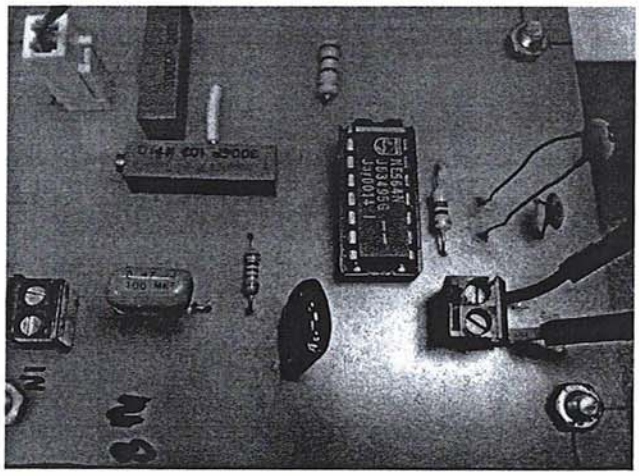
รูปที่ 4.2 อุปกรณ์ต่างๆ ภายในเครื่องส่ง



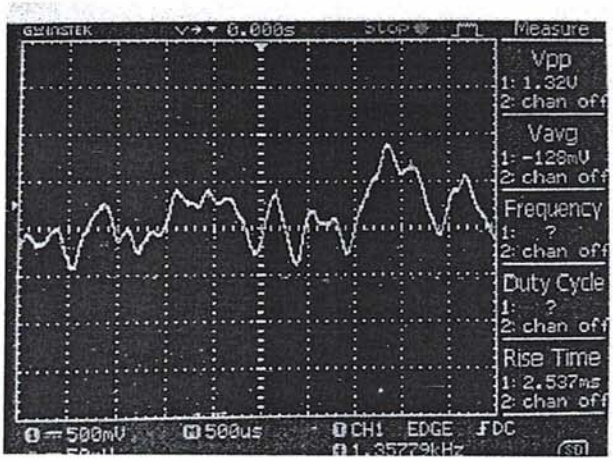
รูปที่ 4.3 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเครื่องเล่นดีวีดี ณ จุด TP 1

4.1.2 วงจรเอฟเอ็มมอดูเลเตอร์

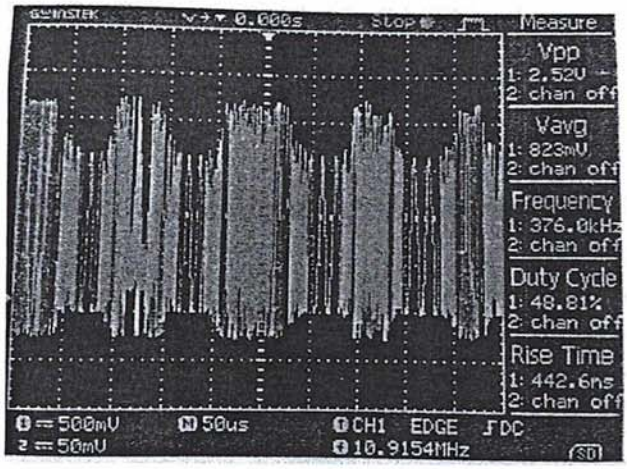
จากรูปที่ 4.4 แสดงอุปกรณ์ต่างๆ ของวงจรเอฟเอ็มมอดูเลเตอร์ โดยทำการวัดสัญญาณเสียงที่ได้จากเครื่องเล่นดีวีดี ณ จุด TP 2 ความถี่ที่ได้คือ 1.3577 KHz ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และจากรูปที่ 4.6 แสดงการวัดสัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตทางความถี่ ณ จุด TP 3 เป็นจุดรวมสัญญาณเสียงกับความถี่พาห์เข้าด้วยกัน ความถี่ที่ได้คือ 10.9154 MHz



รูปที่ 4.4 อุปกรณ์ต่างๆของวงจรเอฟเอ็มมอดูเลเตอร์



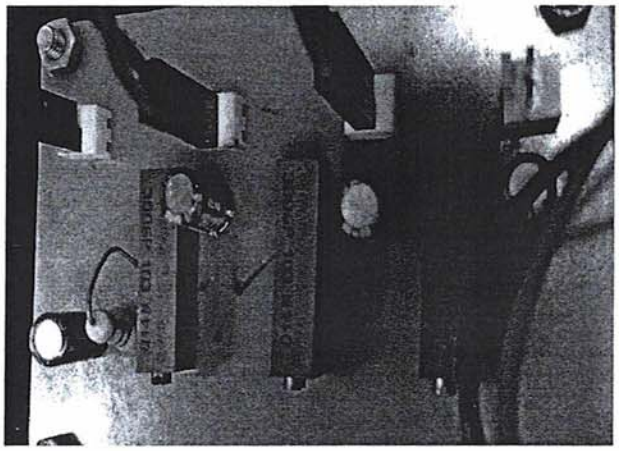
รูปที่ 4.5 สัญญาณเสียงจากเครื่องเล่นดีวีดี ณ จุด TP 2



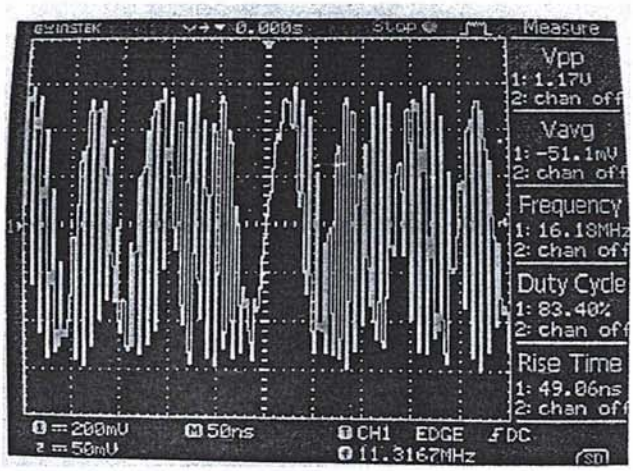
รูปที่ 4.6 สัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตทางความถี่ ณ จุด TP 3

4.1.3 วงจรรวมสัญญาณ

จากรูปที่ 4.7 แสดงอุปกรณ์ต่างๆ ของวงจรรวมสัญญาณ และทำการวัดสัญญาณที่ได้จากวงจรรวมสัญญาณ ของสัญญาณจากจุด TP 1 และสัญญาณจากจุด TP 3 เข้าด้วยกัน ณ จุด TP 4 สัญญาณที่ได้มีความถี่เท่ากับ 11.3167 MHz แสดงสัญญาณที่ได้ดังรูปที่ 4.8



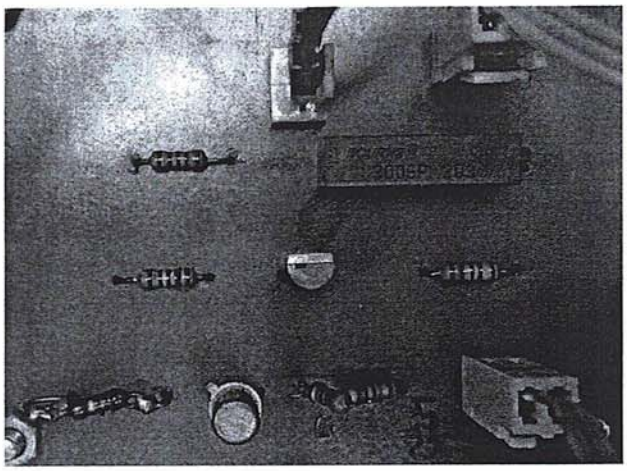
รูปที่ 4.7 อุปกรณ์ต่างๆ ของวงจรรวมสัญญาณ



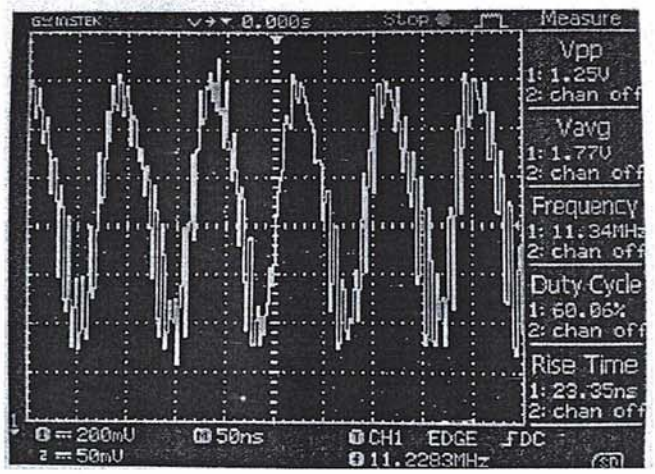
รูปที่ 4.8 สัญญาณที่วัดได้ ณ จุด TP 4

4.1.4 วงจรเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสง (E/O Converter)

จากรูปที่ 4.9 แสดงอุปกรณ์ต่างๆ ของวงจรเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสง และรูปที่ 4.10 แสดงการวัดสัญญาณ ณ จุด TP 5 ซึ่งเป็นสัญญาณที่ได้จากวงจรเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสง ค่าความถี่ที่ได้มีค่าเท่ากับ 11.2283 MHz

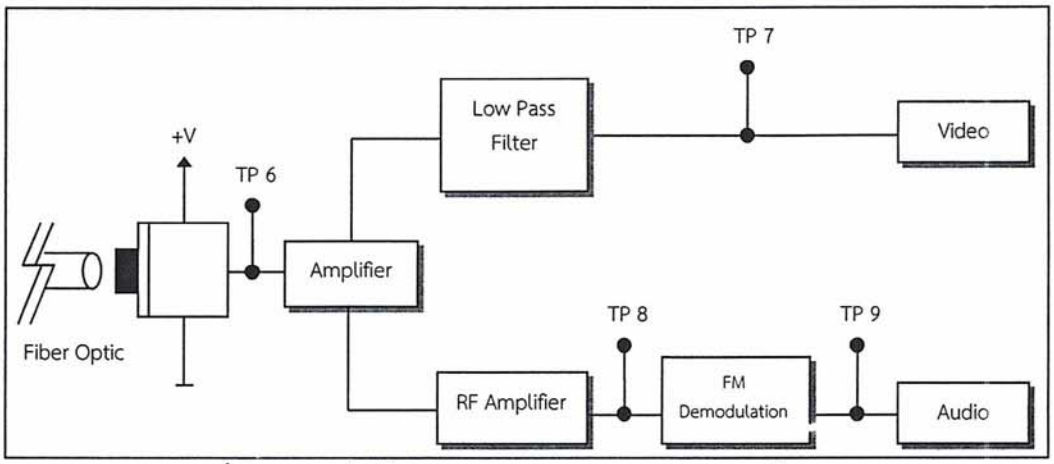


รูปที่ 4.9 อุปกรณ์ต่างๆ ของวงจรเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสง

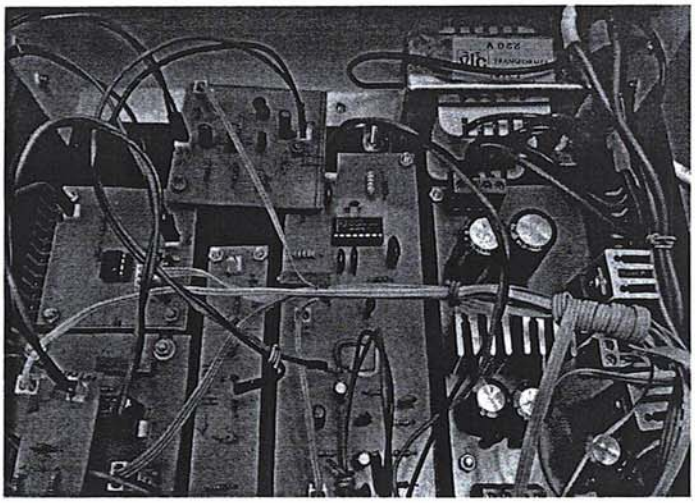


รูปที่ 4.10 สัญญาณที่ได้จากวงจรเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสง ณ จุด TP 5

4.2 ผลการทดสอบสัญญาณทางภาครับ



รูปที่ 4.11 บล็อกไดอะแกรมจุดวัดสัญญาณต่างๆ ทางด้านภาครับ

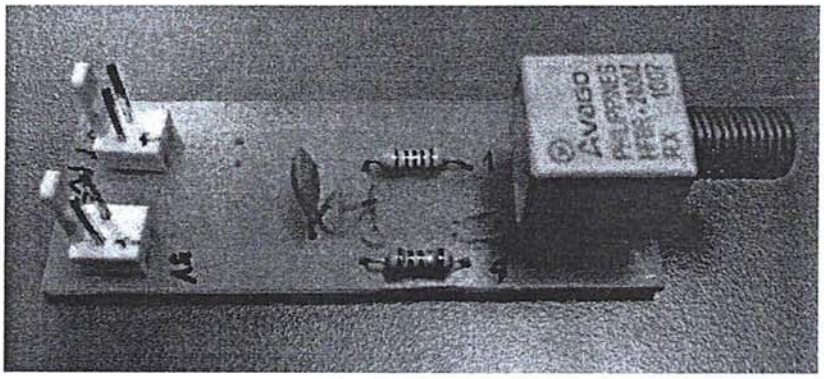


รูปที่ 4.12 อุปกรณ์ต่างๆ ภายในเครื่องเครื่องรับ

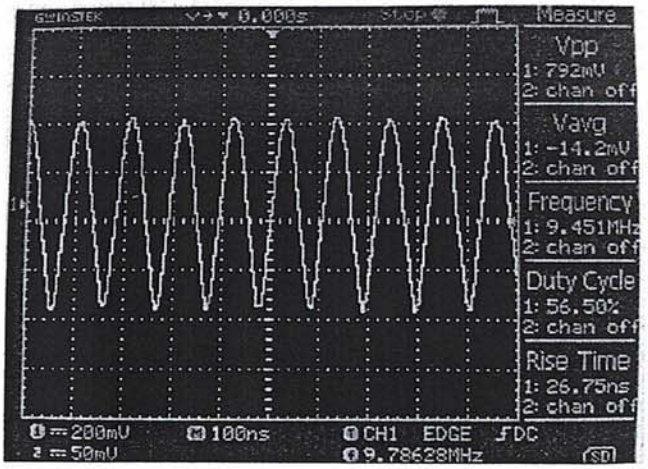
จากรูปที่ 4.12 แสดงอุปกรณ์ต่างๆ ภายในเครื่องรับทั้งหมด ประกอบด้วย วงจรเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า วงจรขยาย วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรขยายความถี่วิทยุ วงจรดีมอดูเลตทางความถี่ ตามลำดับ โดยจะแสดงจุดทดสอบไว้คือ จุดทดสอบ TP 6 – จุดทดสอบ TP 9 เป็นต้น

4.2.1 วงจรเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า (O/E Converter)

อุปกรณ์ต่างๆ ของวงจรเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าและสัญญาณที่ได้จากวงจรเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ณ จุดทดสอบ TP 6 มีความถี่เท่ากับ 9.7862 MHz แสดงดังรูปที่ 4.13 และ รูปที่ 4.14 ตามลำดับ



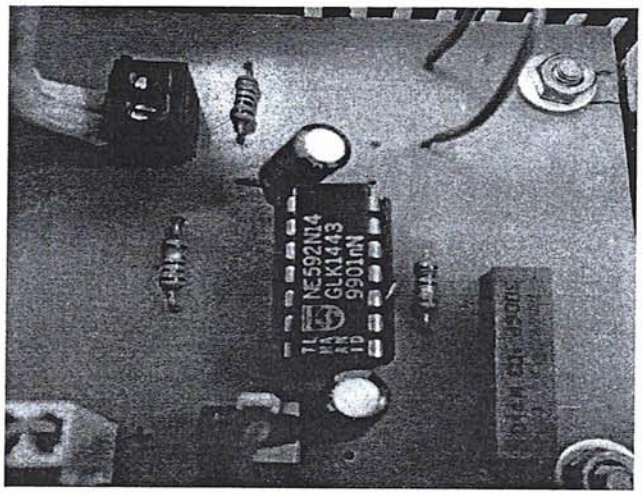
รูปที่ 4.13 อุปกรณ์ต่างๆ ของวงจรเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า



รูปที่ 4.14 สัญญาณที่ได้จากวงจรเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า ณ จุด TP 6

4.2.2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

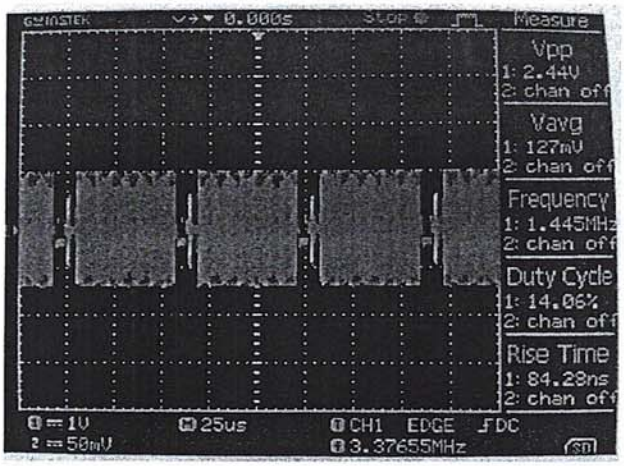
จากรูปที่ 4.15 แสดงอุปกรณ์ต่างๆ ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และแสดงการวัดสัญญาณของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ณ จุดทดสอบ TP 7 มีค่าความถี่เท่ากับ 3.3765 MHz ซึ่งมีค่าความถี่ใกล้เคียงกับค่าความถี่ทางด้านส่ง สัญญาณที่ได้จะส่งต่อไปยังจอแสดงผลแสดงดังรูปที่ 4.16



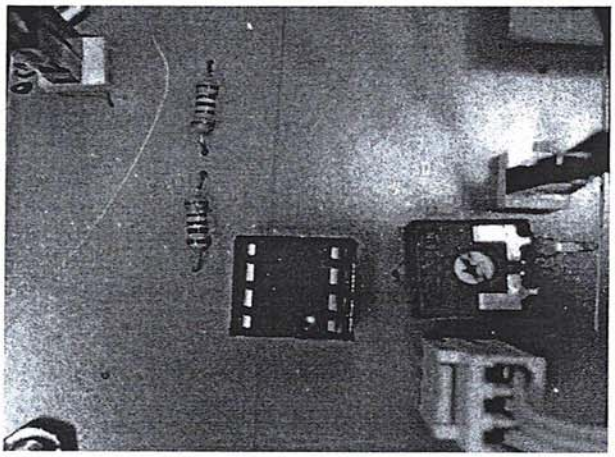
รูปที่ 4.15 อุปกรณ์ต่างๆ ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

4.2.3 วงจรขยายความถี่วิทยุ

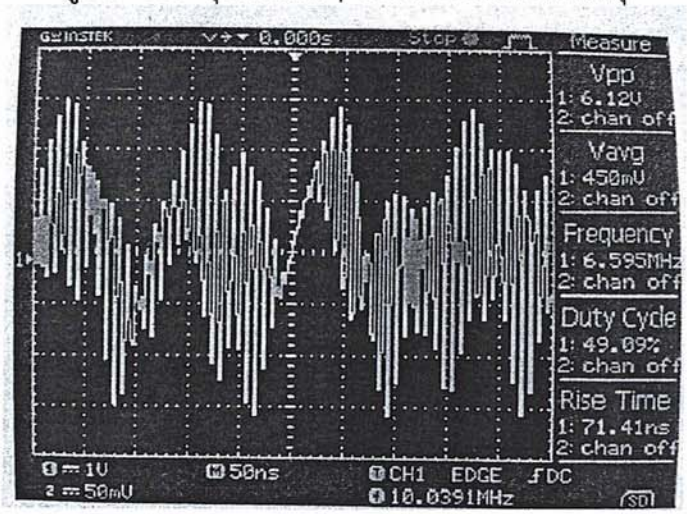
อุปกรณ์ต่างๆ ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และการวัดสัญญาณของวงจรวงจรขยายความถี่วิทยุ ณ จุดทดสอบ TP 8 มีค่าความถี่เท่ากับ 10.0391 MHz แสดงดังรูปที่ 4.17 - รูปที่ 4.18



รูปที่ 4.16 สัญญาณที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ณ จุด TP 7



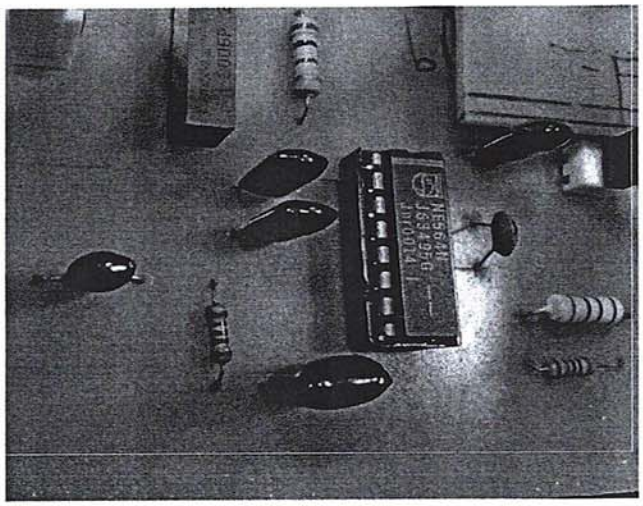
รูปที่ 4.17 อุปกรณ์ต่างๆ ของวงจรขยายความถี่วิทยุ



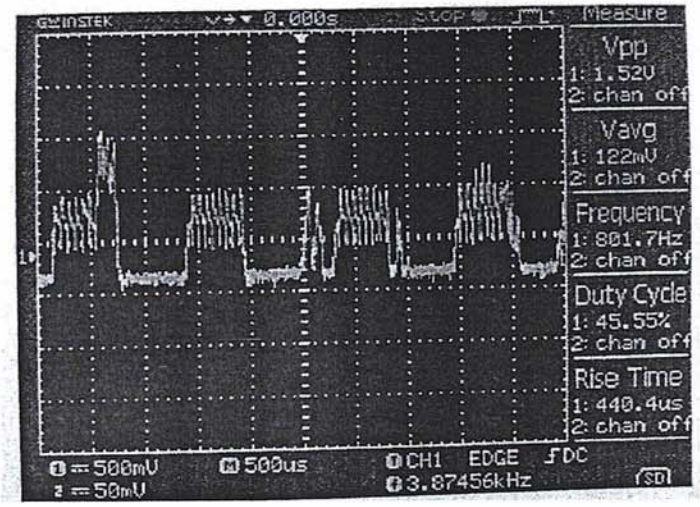
รูปที่ 4.18 สัญญาณของวงจรวงจรขยายความถี่วิทยุ ณ จุดทดสอบ TP 8

4.2.4 วงจรดีมอดูเลตทางความถี่

จากรูปที่ 4.19 แสดงอุปกรณ์ต่างๆ ของวงจรดีมอดูเลตทางความถี่ และรูปที่ 4.20 แสดงการวัดสัญญาณที่ได้จากวงจรดีมอดูเลตทางความถี่ ณ จุด TP 9 มีค่าเท่ากับ 3.8745 KHz สังเกตได้ว่าสัญญาณที่ได้คือสัญญาณเสียงแต่ยังคงมีสัญญาณรบกวนประกอบอยู่ จากนั้นจึงส่งออกไปยังลำโพง



รูปที่ 4.19 อุปกรณ์ต่างๆ ของวงจรดีมอดูเลตทางความถี่



รูปที่ 4.20 การวัดสัญญาณที่ได้จากวงจรดีมอดูเลตทางความถี่ ณ จุด TP 9

4.3 ผลการทดสอบการส่งสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแก้ว

หลังจากทำการทดสอบสัญญาณในแต่ละส่วนแล้ว ทำการต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 4.21 – รูปที่ 4.23 เพื่อทำการทดสอบการส่งสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแก้ว คุณภาพของสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงที่ได้อยู่ในระดับดีมากเหมือนกับทางด้านส่ง

รูปที่ 4.21 สัญญาณภาพจากเครื่องเล่นดีวีดี

รูปที่ 4.22 สัญญาณภาพเมื่อส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

รูปที่ 4.23 สัญญาณภาพและสัญญาณเสียงเมื่อส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาและสร้างชุดสื่อการสอนการส่งสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ประกอบด้วยภาคส่งและภาครับ โดยมีเส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลาง ซึ่งในภาคส่งจะประกอบด้วย 3 วงจรคือ วงจรมอดูเลต วงจรรวมสัญญาณ และวงจรแปลงสัญญาณฟ้าเป็นสัญญาณแสง ส่วนภาครับจะประกอบ 5 วงจร คือ วงจรแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า วงจรขยายสัญญาณ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรขยายความถี่วิทยุ และวงจรดีมอดูเลต โดยมีวงจรจ่ายไฟตรงแรงดัน +5V, -5V ในภาคส่งและ +5V, -5V, +8V, -8V ในภาครับ

โดยหลักการทำงานคือ ชุดส่งจะรับสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงอินพุตจากเครื่องเล่นดีวีดี โดยที่สัญญาณเสียงทำการมอดูเลตทางความถี่ที่ความถี่ 10 MHz แล้วเข้าวงจรรวมสัญญาณกับสัญญาณภาพ ส่งไปยังวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสงเพื่อส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงที่เป็นตัวกลาง จากนั้นสัญญาณแสงเข้ามายังภาครับวงจรแปลงสัญญาณแสงกลับมาเป็นสัญญาณไฟฟ้าเช่นเดิม โดยทำการขยายสัญญาณที่ได้มาก่อนทำการแยกสัญญาณภาพออกจากกันโดยเข้าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ส่วนสัญญาณเสียงนั้นได้ทำการขยายความถี่แล้วดีมอดูเลตกลับมายังเช่นเดิม ซึ่งทั้ง 2 สัญญาณส่งผ่านสาย AV มายังเครื่องรับโทรทัศน์

จากการทดลองส่งและรับสัญญาณภาพ สัญญาณเสียงโดยผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ผลที่ได้ในเรื่องของสัญญาณภาพได้ผลที่น่าพอใจ คือสัญญาณภาพที่เครื่องรับโทรทัศน์ ไม่ล้มและไม่เลื่อน แต่ความชัดเจนของภาพ เมื่อเทียบกับสัญญาณที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ พบว่าความสว่างของภาพไม่สดใส ในส่วนของสัญญาณเสียงนั้นคุณภาพเสียงลดต่ำลง แต่ถ้ามีการปรับระดับสัญญาณเสียงให้แรงขึ้น จะทำให้เกิดการรบกวนไปยังสัญญาณภาพ และเช่นเดียวกันหากปรับระดับสัญญาณภาพให้แรงขึ้นก็จะไปรบกวนสัญญาณเสียง

ทั้งนี้ปัญหาของการรบกวนในสัญญาณภาพและสัญญาณเสียง จะมากหรือน้อยเท่าไร จะขึ้นอยู่กับการปรับระดับสัญญาณภาพและสัญญาณเสียง ที่จะมาผสมกันที่ภาคผสมสัญญาณ ในเครื่องส่ง ถ้าการปรับระดับสัญญาณพอดีจะทำให้การรบกวนลดต่ำลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากปัญหาของการรบกวนของสัญญาณที่เกิดขึ้นกับชุดส่งสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง พบว่าอยู่ที่การปรับระดับสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงที่มาผสมกันที่ภาคผสมสัญญาณ (Summing) เป็นสำคัญ ควรออกแบบวงจรที่จะผสมสัญญาณให้มีความละเอียดและมีการปรับจูนได้ง่ายขึ้น

5.2.2 ส่วนความสามารถในการส่งสัญญาณควรพัฒนาให้สามารถส่งสัญญาณภาพและเสียงแบบดิจิตอล ส่งได้ทีละหลายๆ ช่องสัญญาณพร้อมกันและส่งได้ในระยะไกล จำเป็นต้องเพิ่มขีดความสามารถของตัวส่งและตัวรับใหม่ ให้กำลังในการส่งสัญญาณแสงให้มากขึ้น และตัวรับจะต้องมีความไวในการรับได้สูงขึ้น อีกทั้งสายสัญญาณก็เป็นตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่สำคัญ ควรใช้สายสัญญาณที่มี

การสูญเสียในสายต่ำ จะทำให้มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงในระยะไกลๆ ได้ดี

5.3 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

5.3.1 การหาข้อมูลของอุปกรณ์ ชุดขับแอลอีดี (LED) และตัวรับสัญญาณ (Pin Photodiode) รวมไปถึงเส้นใยแก้วนำแสง จะมีข้อมูลน้อยและมีราคาแพง ซึ่งต้องสั่งจากต่างประเทศทำให้ต้องใช้เวลาในการจัดส่งนานกว่าสินค้าในประเทศ

5.3.2 ความคงทนของอุปกรณ์ส่งสัญญาณแสง ขาดความคงทนต่อกระแสที่ไหลผ่านตัวมัน เพราะว่าจากข้อกำหนดการใช้งานของมัน ตัวของแอลอีดีถูกกำหนดให้ทนกระแสไม่เกิน 100 mA ซึ่งเป็นการยากต่อการออกแบบมากจะต้องระวังไม่ให้กระแสเกินเพราะจะทำให้มันขาดได้และถ้าแอลอีดีขาดแล้วเป็นการยากในการหาซื้อและมีราคาแพง

5.3.3 เส้นใยแก้วนำแสง จะหาซื้อได้ยากตามท้องตลาดจำเป็นต้องแบ่งตัดจากม้วนแล้วมาเข้าหัวต่อ (Connector) มาตรฐานกับตัวรับและตัวส่งแสงด้วย

บรรณานุกรม

[1] รำพึง มังคละสวัสดิ์ และ ศิริวัฒน์ หงษ์ทอง. 2548. **การออกแบบและสร้างชุดสื่อการสอน การส่งสัญญาณภาพและเสียงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง** [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: http://antispam.kmutt.ac.th/index.php/jit_journal/article/view/4006/0

[2] ผศ.ปรียา อนุพงษ์องอาจ. 2548. **ฟิสิกส์ของแสง**. ภาควิชาฟิสิกส์. คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1.htm

[3] สำนักบริการคอมพิวเตอร์. 2549. **เส้นใยแก้วนำแสง.** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: http://www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnews/0/285/19/Fiber-optic.htm

[4] อธิคม ฤกษบุตร. **เส้นใยแก้วและการประยุกต์ใช้งานเบื้องต้น**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. ซีเอ็ดยูเคชั่น. 2543.

[5] อภินันท์ มัณยานนท์. **การสื่อสารเส้นใยแสง**. กรุงเทพฯ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิชา. 2528.

[6] วิวัฒน์ กิรานนท์. **วิศวกรรมสื่อสาร**. กรุงเทพฯ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิชา. 2540.

[7] มนตรี ศิริปรัชญานันท์. 2540. **วงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟเบื้องต้น**. ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.