

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



หลักการสื่อสารสองทางด้วยสัญญาณแสง

นาย สุวัฒน์ชัย วัฒนาชัยองกุล

๑พ.
๗876๖
2536

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

619554832

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2536

FIBER OPTIC WIRELESS VOICE COMMUNICATIONS

Mr. Suwatchai Wattanachaiyongkul

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the

Requirement for the Degree of Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1993

หัวข้อโครงการพิเศษ	หลักการสื่อสารสองทางด้วยเส้นใยนำแสง
โดย	นาย สุวัฒน์ชัย วัฒนาชัยมงคล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ปรีชา สุพาณิชย์ อ.สันติ หมอกมิต
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2536

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาและออกแบบระบบการสื่อสารแบบคัลเพล็กซ์ (Duplex) โดยใช้เส้นใยนำแสงเป็นตัวกลาง ซึ่งสามารถรับและส่งสัญญาณเสียงได้ภายในเวลาเดียวกัน วงจรที่ใช้ในโครงการนี้ประกอบไปด้วยวงจร 2 ส่วน คือ วงจรภาคส่งและวงจรภาครับ วงจรภาคส่งจะรับเสียงมาจากแหล่งกำเนิดเสียงต่าง ๆ เช่น เทป วิทยุ ไมโครโฟน แล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า จากนั้นจะนำไปทำการมอดดูเลตแบบ พัลส์ฟรีควเอนซ์มอดดูเลชั่น (Pulse Frequency Modulation) และนำสัญญาณที่ได้ไปขับ แอล อี ดี (LED) ซึ่งจะทำการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นแสง โดย แอล อี ดี จะใช้การมอดดูเลตแบบอินเทนซิติตีมอดดูเลชั่น (Intensity Modulation) แสงที่ได้จะส่งผ่านเข้าไปในเส้นใยนำแสง และออกไปตกกระทบกับ พี ไอ เอ็น (PIN) โฟโตไดโอด ซึ่งอยู่ทางด้านวงจรภาครับ ในส่วนนี้ พี ไอ เอ็น จะถูกรีเวิร์สไบแอสไว้ และจะทำการเปลี่ยนระดับกำลังแสงที่รับได้ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าที่มีลักษณะเหมือนกันกับในภาควงจรถูกส่ง จากนั้นจะนำไปขยายสัญญาณอีกครั้ง และทำการดีมอดดูเลตโดยใช้เฟสล็อกคูลูป (Phase Lock Loop) เป็นตัวดีมอดดูเลต เอาท์พุทที่ได้ออกมาจากเฟสล็อกคูลูปคือสัญญาณเสียง และจะถูกกรองด้วยวงจรถูกส่งผ่านต่ำ (Low Pass Filter) เพื่อทำการขจัดสัญญาณรบกวนต่าง ๆ ที่อาจจะปะปนเข้ามามีสัญญาณเสียง สัญญาณเสียงที่ได้นี้จะถูกขยายอีกครั้ง จากนั้นจะนำไปขับลำโพงซึ่งจะได้เสียงออกมาเหมือนเดิม

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำโครงการพิเศษ เรื่อง หลักการสื่อสารสองทางด้วยเส้นใยนำแสง ถ้าจะเป็นประโยชน์แก่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังแล้ว ผู้จัดทำโครงการพิเศษ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้คอยเป็นห่วงเป็นใย และให้การสนับสนุนการศึกษามาโดยตลอด และขอขอบคุณอาจารย์ผู้แนะนำ ให้ค่าปรึกษา เพื่อให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ดังมีรายนามดังต่อไปนี้

ดร.ปรีชา ยุพานิน	อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ
นาย สนิท หมอกมิด	อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษและสนับสนุนเครื่องมือ
นาย อนูชิต จารุณาววัฒน์	กรุณาให้ค่าปรึกษา
นาย วิชิต ศิริโชติ	กรุณาให้ค่าปรึกษา
ผศ.อนุพงษ์ สรงประภา	กรุณาให้ค่าปรึกษา
น.ส. มยุรี หาญสุกานุสรณ์	สนับสนุนอุปกรณ์

นอกจากบุคคลต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีบุคคลอีกหลายท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ทางผู้จัดทำขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาไทยอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	ง
สารบัญรูป	จ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ประวัติความเป็นมาของการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง	1
1.2 การเชื่อมต่อของเส้นใยนำแสง	2
1.3 ระบบของการสื่อสารโดยใช้เส้นใยนำแสงอย่างง่าย	3
1.4 การเปรียบเทียบเส้นใยนำแสงกับตัวกลางชนิดต่าง ๆ	4
1.5 คุณสมบัติพิเศษต่าง ๆ ของการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง	5
1.6 หลักการทั่วไปของการสื่อสารสองทางด้วยเส้นใยนำแสง	6
1.6.1 หลักการของภาคส่ง	6
1.6.2 เส้นใยนำแสง	7
1.6.3 หลักการของภาครับ	7
บทที่ 2 ทฤษฎีของเส้นใยนำแสง แหล่งกำเนิดแสง และอุปกรณ์รับแสง	9
2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของแสง	9
2.2 โครงสร้างของเส้นใยนำแสง	11
2.3 พารามิเตอร์ทางแสงที่สำคัญของเส้นใยนำแสง	12
2.3.1 อัตราส่วนผลต่างค่าดัชนีหักเห (Δ)	12
2.3.2 มุมรับแสง (θ_{max})	13
2.3.3 ตัวเลขอะเพอร์เจอร์ (NUMERICAL APERTURE = NA)	14
2.4 ชนิดของเส้นใยนำแสง	15
2.4.1 เส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยว (SINGLE-MODE)	17

2.4.2	เส้นใยนำแสงแบบมัลติโหมดชนิดสเตปอินเดกซ์ (MULTIMODE STEP-INDEX FIBER)	20
2.4.3	เส้นใยนำแสงแบบมัลติโหมดชนิดเกรดอินเดกซ์ (MULTIMODE GRADED-INDEX FIBER)	22
2.5	อุปกรณ์กำเนิดแสง (LIGHT SOURCE)	22
2.5.1	หลักการพื้นฐานของการเปล่งแสง	23
2.5.2	แอล อี ดี (LIGHT EMITTING DIODE : LED)	23
2.5.3	เลเซอร์ไดโอด	27
2.5.4	คุณสมบัติอื่น ๆ ของแหล่งกำเนิดแสง	28
2.6	อุปกรณ์รับแสง (PHOTO DETECTOR)	29
2.6.1	สารที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์รับแสง	30
2.6.2	โครงสร้างของอุปกรณ์รับแสง	31
2.6.3	โฟโตรีโอด (PHOTO DIODE : PD)	31
2.6.4	อะวาลันซ์ไดโอด (AVALANCHE PHOTO DIODE : APD)	32
2.6.5	คุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง	33
บทที่ 3	การมอดูเลชัน (MODULATION)	36
3.1	รูปแบบของการมอดูเลชันแบบอนาล็อก	36
3.1.1	แอมพลิจูดมอดูเลชัน (AM)	36
3.1.2	เฟรควเอนซีมอดูเลชัน (FM)	38
3.1.3	เฟสมอดูเลชัน (PM)	38
3.2	วงจรมอดูเลชันอนาล็อก	38
3.3	รูปแบบของการมอดูเลชันแบบพัลส์	41
3.3.1	พัลส์แอมพลิจูดมอดูเลชัน (PAM)	41
3.3.2	พัลส์โคดมอดูเลชัน (PCM)	42
3.3.3	พัลส์โพสิทีฟมอดูเลชัน (PPH)	43
3.3.4	พัลส์วอร์มมอดูเลชัน (PWH)	43
3.4	วงจรมอดูเลชันดิจิทัล	44
3.5	ระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงและการนำไปใช้งาน	45

3.6	รูปแบบของการติดต่อสื่อสาร	47
3.7	ระบบมัลติเพล็กซ์ (MULTIPLEX SYSTEM)	47
3.7.1	ระบบการแบ่งเวลา (TIME DIVISION MULTIPLEXING ; TDM)	47
3.7.2	ระบบการแบ่งความถี่ (FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING : FDM)	49
3.7.3	ระบบการแบ่งความยาวคลื่น (WAVELENGTH DIVISION MULTI- -PLEXING : WDM)	50
บทที่ 4	การออกแบบวงจรที่ใช้ในโครงงาน	52
4.1	วงจรทางภาคส่ง	52
4.1.1	วงจรปรับแอมพลีไฟร์	52
4.1.2	วงจรพัลส์ฟรีเคานซ์มอดูเลชัน (PULSE FREQUENCY MODULATION : PFM)	53
4.1.3	วงจรขับ	54
4.2	วงจรทางภาครับ	58
4.2.1	ภาคก่อนขยายแบบทรานส์อิมพีแดนซ์ (TRANSIMPEDANCE)	58
4.2.2	วงจรขยายสัญญาณ	59
4.2.3	วงจรดีมอดูเลต	60
4.2.4	วงจรภาคขยายเสียง	62
บทที่ 5	การดำเนินงานและผลการทดลอง	65
5.1	วงจรทางภาคส่ง	67
5.1.1	ผลการทดลองวงจรทางภาคส่ง	67
5.2	วงจรทางภาครับ	68
5.2.1	ผลการทดลองของการหาสัญญาณรบกวนของวงจร เมื่อไม่มีแสงตก กระทบที่ PIN ไดโอด	68
5.2.2	ผลการทดลองของวงจรขยายสัญญาณเมื่อมีแสงตกกระทบที่ PIN ไดโอด	69

5.2.3 ผลการทดลองของวงจรมอดูเลต	70
5.2.4 ผลการทดลองสัญญาณเสียง	71
5.2.5 ผลการทดลองหาอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SIGNAL to NOISE RATIO)	72
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	73
6.1 วงจรภาคส่ง	73
6.2 วงจรภาครับ	73
6.3 วิจารณ์ผลการทดลอง	73

ภาคผนวก ก. ข้อมูลจำเพาะของเส้นใยนำแสงและอุปกรณ์ ST CONNECTOR

ภาคผนวก ข. ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารอ้างอิง

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	แสดงการเปรียบเทียบตัวกลางชนิดต่าง ๆ	4
ตารางที่ 2.1	แสดงชนิดของสารกึ่งตัวนำที่ให้ค่าความยาวคลื่นออกมาและค่าของ Energy Bandgap	25
ตารางที่ 2.2	แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง	35
ตารางที่ 3.1	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการสื่อสารด้วยสายเคเบิลกับการสื่อ สารด้วยเส้นใยนำแสง	46

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 1.1	แสดงแสงที่เดินทางอยู่ภายในท่อนำคลื่นที่เป็นน้ำ	1
รูปที่ 1.2	แสดงหลักการสื่อสารสองทางโดยใช้เส้นใยนำแสง	3
รูปที่ 1.3	แสดงกราฟการลดทอนเทียบกับความถี่ ในตัวกลาง 3 ชนิด	5
รูปที่ 1.4	แสดงบล็อกไดอะแกรมการสื่อสารแบบคู่เพิล็กซ์	6
รูปที่ 1.5	แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของภาคส่ง	7
รูปที่ 1.6	แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของภาครับ	8
รูปที่ 2.1	แสดงถึงปรากฏการณ์หักเหของแสง	10
รูปที่ 2.2	แสดงถึงการหักเหที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับภายในหมด	10
รูปที่ 2.3	แสดงโครงสร้างของเส้นใยนำแสง	11
รูปที่ 2.4	แสดงลักษณะดัชนีหักเหของเส้นใยนำแสงทั้ง 2 ชนิด	12
รูปที่ 2.5	แสดงมุมรับแสง	13
รูปที่ 2.6	แสดงค่าจำกัดความของตัวเลขอะเพอร์เจอร์ (Numerical Aperture)	14
รูปที่ 2.7	แสดงวิธีการป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสงอย่างมีประสิทธิภาพ	14
รูปที่ 2.8	แสดงลักษณะของเส้นใยนำแสงชนิดต่าง ๆ	15
รูปที่ 2.9	แสดงทิศทางการเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสงแต่ละชนิด	16
รูปที่ 2.10	แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเส้นใยนำแสงชนิดต่าง ๆ	17
รูปที่ 2.11	แสดงพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว	18
รูปที่ 2.12	แสดงถึงอันดับของโหมดต่าง ๆ ในเส้นใยนำแสง โดยนัยต่อค่าคงที่ของ การแพร่ในเส้นใยนำแสง (β) เป็นฟังก์ชันของ V-number	18
รูปที่ 2.13	แสดงอันดับของโหมดโพลาไรซ์เชิงเส้น (Linearly Polarized : LP) ต่าง ๆ ในเส้นใยนำแสง	19
รูปที่ 2.14	แสดงถึงแพทเทิน (Pattern) ความสว่างของแสง LP_{01} ที่ออกมาจาก ปลายของเส้นใยนำแสงโดยใช้ฉาก (Screen) เป็นตัวรับแสง	19
รูปที่ 2.15	แสดงการกระจายแสงในเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยว	20
รูปที่ 2.16	แสดงพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยนำแสงแบบมัลติโหมดชนิดสเตปอินเดกซ์ ...	20
รูปที่ 2.17	แสดงแพทเทินความสว่างของแสงของโหมด LP_{01} , LP_{11} , LP_{02} , LP_{21}	21

รูปที่ 2.18	แสดงพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยนำแสงแบบมัลติโหมดชนิดเกรตติ้งเดกรีซ ...	22
รูปที่ 2.19	แสดงลักษณะของ LED และระดับพลังงาน	24
รูปที่ 2.20	(a) แสดงชั้นต่าง ๆ ของอุปกรณ์กำเนิดแสงที่ปล่อยแสงออกจากผิว หน้า เรียกว่า เบอร์รัส (Burrus) หรือ เอ็ช-เวลล์ (Etched-Well) (b) แสดงโครงสร้างของ LED แบบ เบอร์รัส (Burrus)	26
รูปที่ 2.21	แสดง LED แบบ เอ็ดจ์-อิมิตติ้ง (Edge-Emitting)	27
รูปที่ 2.22	แสดงลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของเลเซอร์ไดโอด	27
รูปที่ 2.23	แสดงคัพพลิซันโซน (Depletion Zone)	29
รูปที่ 2.24	แสดงความยาวคลื่นในการรับแสงของอุปกรณ์รับแสงแต่ละชนิด	30
รูปที่ 2.25	แสดงหลักการทำงานรับแสงและระดับพลังงานของ PIN-PD	31
รูปที่ 2.26	แสดงหลักการทำงานรับแสงและระดับพลังงานของ APD	32
รูปที่ 2.27	แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้และกระแสโฟโต้ (Photo Current)	34
รูปที่ 3.1	แสดงอินเทนซิติตีมอดูเลชัน (Intensity Modulation)	36
รูปที่ 3.2	แสดงลักษณะสัญญาณตามวิธีของ AM, PM และ FM	38
รูปที่ 3.3	แสดงวงจรมอดูเลชันแบบอิมิตติ้ง	39
รูปที่ 3.4	(a) แสดงกระแสที่ขับ LED (b) แสดงผลของกำลังแสง	39
รูปที่ 3.5	แสดงตัวอย่างวงจรมอดูเลชันแบบอิมิตติ้ง	40
รูปที่ 3.6	แสดงกราฟคาแรคเตอร์ริสติกของทรานซิสเตอร์ $\beta = \Delta i_c / \Delta i_b$..	40
รูปที่ 3.7	แสดงการมอดูเลตแบบ PAM	41
รูปที่ 3.8	แสดงรูปคลื่นของสัญญาณระบบมอดูเลตแบบ PCM	42
รูปที่ 3.9	แสดงเทคนิคของ PPM และ PWM	43
รูปที่ 3.10	(a) แสดงวงจรซีรีส์ สวิตช์ (Series Switch) และ พาราเลล สวิตช์ (Parallel Switch) (b) วงจรเสมือนของวงจรรับกระแส	44
รูปที่ 3.11	(a) ตัวอย่างวงจรขับ LED โดยให้ทรานซิสเตอร์ (b) จุดทำงานของวงจร	45
รูปที่ 3.12	แสดงการทำงานของระบบ TDM	48
รูปที่ 3.13	แสดงบล็อกไดอะแกรมของ FDM	49

รูปที่ 3.14	แสดงช่วงคลื่นพาหะย่อยในแต่ละช่องสัญญาณของ FDM	49
รูปที่ 3.15	แสดงการทำงานของระบบ WDM	51
รูปที่ 4.1	แสดงวงจรปริแอมป์	53
รูปที่ 4.2	แสดงวงจรพัลส์ฟรีควมมอดคูเลชั่น (Pulse Frequency Modulation)	54
รูปที่ 4.3	แสดงวงจรขับ LED ที่ใช้ในโครงการงาน	55
รูปที่ 4.4	แสดงวงจรทางภาคส่งที่ใช้ในโครงการงาน	57
รูปที่ 4.5	แสดงวงจรภาคก่อนขยาย	58
รูปที่ 4.6	แสดงวงจรขยายสัญญาณ	59
รูปที่ 4.7	แสดงบล็อกไดอะแกรมของเฟสล็อคลูป	60
รูปที่ 4.8	แสดงวงจรดีมอดคูเลตสัญญาณ PFM	61
รูปที่ 4.9	แสดงวงจรภาคขยายเสียง	62
รูปที่ 4.10	แสดงวงจรทางภาครับที่ใช้ในโครงการงาน	63
รูปที่ 4.11	แสดงวงจรจ่ายไฟกระแสตรง บวก ลบ 12 โวลต์	64
รูปที่ 5.1	แสดงวงจรต้นแบบทางภาคส่งและภาครับ 2 ชุด	65
รูปที่ 5.2	แสดงเส้นใยนำแสงและชุด ST Connectors ที่ใช้ในโครงการงาน	66
รูปที่ 5.3	แสดงการจัดอุปกรณ์ทั้งหมดรวมไว้ด้วยกัน	66
รูปที่ 5.4	แสดงลักษณะรูปคลื่นที่มีความถี่ 300 KHz ในขณะที่ยังไม่มีสัญญาณอินพุตเข้ามา	67
รูปที่ 5.5	แสดงลักษณะรูปคลื่นพาหะ 300 KHz ที่ทำการมอดคูเลตทางความถี่กับสัญญาณไซน์ 4500 Hz	68
รูปที่ 5.6	แสดง Noise ของวงจรภาครับเมื่อไม่มีแสงมาตกกระทบที่ PIN ไดโอด	69
รูปที่ 5.7	แสดงรูปสัญญาณคลื่นมอดคูเลตทางความถี่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระหว่างทางภาคส่งและภาครับโดยผ่านเส้นใยนำแสง	70
รูปที่ 5.8	แสดงรูปสัญญาณคลื่น Sine ที่ความถี่ 4500 Hz โดยรูปคลื่นข้างบนเป็นสัญญาณอินพุตทางด้านวงจรส่ง ส่วนข้างล่างเป็นเอาต์พุตที่ได้จากวงจรขยายสัญญาณออติโอของวงจรรับ	71

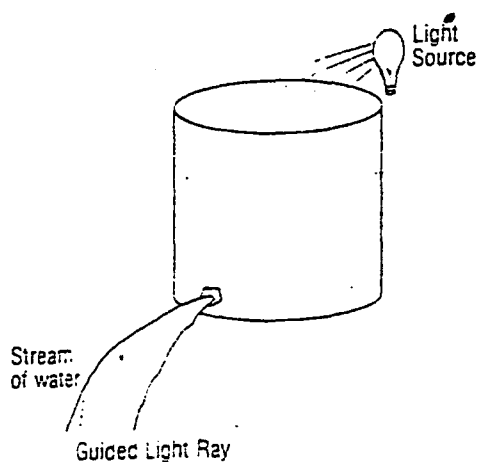
บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันนี้จากความเจริญก้าวหน้าทางเศรษฐกิจและการขยายตัวของสังคม ทำให้มีความต้องการในการแลกเปลี่ยนข่าวสารและข้อมูลเพิ่มขึ้นมากมาย และเพื่อเป็นการตอบสนองต่อความต้องการนี้ทั้งในปัจจุบันและในอนาคต ได้มีการใช้ระบบสื่อสารใหม่ขึ้นมาเรียกว่า ระบบสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง (Optical Fiber Communication System) ซึ่งสามารถส่งข่าวสารและข้อมูลต่าง ๆ ได้เป็นจำนวนมากในเวลาเดียวกัน และมีข้อดีอื่น ๆ อีกมากเมื่อเทียบกับระบบสื่อสารที่ใช้สายเคเบิลโลหะเป็นตัวกลาง

1.1 ประวัติความเป็นมาของการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง.

หลักการของการสื่อสารโดยใช้แสง เริ่มเป็นที่รู้จักกันในศตวรรษที่ 19 ในปี 1870 โดยจอห์น ไทน์ดัล (John Tyndall) ได้แสดงถึงแสงสามารถเดินทางไปมาอยู่ภายในท่อนำคลื่นที่เป็นน้ำ ซึ่งกำลังพุ่งออกมาจากรูของถังน้ำ การทดลองนี้ได้แสดงถึงแนวความคิดของ หลักการสะท้อนของแสงกลับภายในทั้งหมด (Total Internal Reflection) คือลำแสงที่แพร่ไปโดยมีการสะท้อนกลับไปกลับมาที่ผิว หรือขอบเขตของตัวกลาง



รูปที่ 1.1 แสดงแสงที่เดินทางอยู่ภายในท่อนำคลื่นที่เป็นน้ำ

ภายหลังต่อมา อเล็กซ์ซานเดอร์ เกรแฮม เบลล์ (Alexander Graham Bell) ได้ประดิษฐ์โทรศัพท์ที่ใช้แสง (Photophone) โดยเสียงจะถูกเปลี่ยนเป็นแสง และสามารถส่งไปได้ไกล

กว่า 200 เมตร และทางด้านรับจะเปลี่ยนแสงกลับเสียงอย่างเดิมอีก และในปี 1910 ฮอนโดรส (Hondros) และ เดอบาย (Debye) ได้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาทฤษฎีที่นำคลื่นไดอิเล็กตริก

การศึกษาการส่ง โดสใช้คลื่นแสงได้ดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่ง ในปี 1950 ได้มีการพัฒนาเส้นใยนำแสงสำหรับใช้ในวงการแพทย์เรียกว่า Fiberscope การวิจัยค้นคว้าเกี่ยวกับเส้นใยนำแสงเพื่อนำมาใช้ในการสื่อสารได้เริ่มอย่างจริงจัง ในช่วงปี 1960 ในช่วงนั้นเส้นใยนำแสงมีค่าการสูญเสียอยู่ในระดับ 1000 dB/km และนักวิจัยได้พยายามมุ่งจะสร้างเส้นใยนำแสงที่มีการสูญเสียต่ำต่อไป ในปี 1970 ค่าการสูญเสียได้ลดลงมาเหลือเพียง 3 dB/km นับตั้งแต่นั้นมาจนถึงปัจจุบัน เทคโนโลยีเส้นใยนำแสงที่มุ่งพัฒนาให้มีการสูญเสียต่ำได้พัฒนาอย่างรวดเร็ว จนในปัจจุบันนี้ สามารถทำให้ลดลงเป็น 0.2 dB/km ได้

การวิจัยต่อไปในอนาคตของผู้ผลิตเส้นใยนำแสงคือ ลดคุณสมบัติของการกระจาย (Dispersion) ของเส้นใยนำแสงซึ่งการกระจายนี้จะจำกัดแบนด์วิธ (Bandwidth) ของมันและปริมาณความจุของข้อมูลข่าวสาร คุณสมบัติพิเศษของการสื่อสารด้วยแสงนี้คือ แบนด์วิธที่มากมามหาศาล ซึ่งถ้าใช้ความยาวคลื่นของแสง 1 ไมครอน หรือมีความถี่ 300,000 GHz ซึ่งถ้ากำหนดให้ช่วงแบนด์วิธของการส่งข้อมูลมีเพียง 1 เปอร์เซ็นต์ของค่าความถี่แสงที่ใช้ จะได้แบนด์วิธกว้างถึง 3,000 GHz

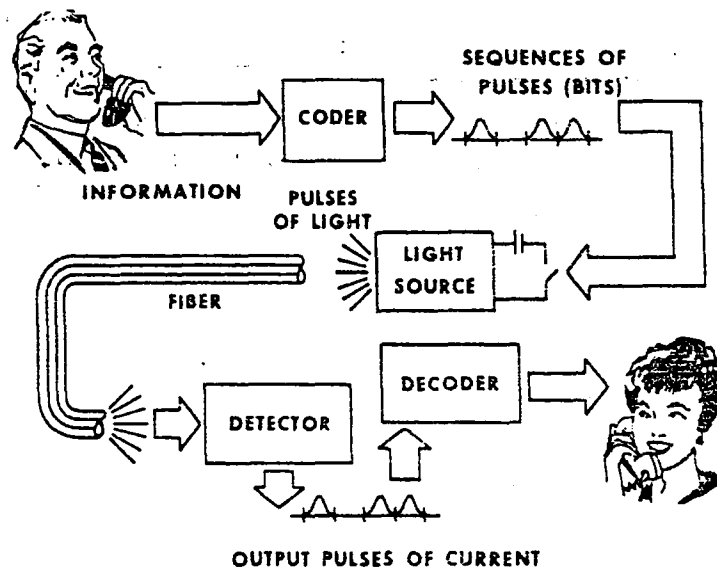
1.2 การเชื่อมต่อของเส้นใยนำแสง

การเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงจะเชื่อมระหว่าง เครื่องส่งกับเครื่องรับ สัญญาณที่เข้ามาอาจจะ เป็นดิจิตอลหรืออนาล็อก ข้อมูลเหล่านี้จะนำมาทำการมอดดูเลตทางไฟฟ้าก่อน (Premodulated) ต่อจากนั้น จะถูกส่งไปยังแหล่งกำเนิดแสง เพื่อทำการมอดดูเลตแบบความเข้มแสง (Intensity Modulation) กับตัว LED หรือ Laser Diode โดยที่สัญญาณที่เข้ามาถ้าเป็นอนาล็อก ตัว LED หรือ Laser Diode จะเกิดการสว่างมากหรือสว่างน้อย ตามระดับความแรงของสัญญาณอนาล็อก หรือถ้าสัญญาณที่เข้ามาเป็นดิจิตอล ตัว LED หรือ Laser Diode จะสว่างหรือดับ ขึ้นอยู่กับระดับของสัญญาณทางดิจิตอลคือ "1" หรือ "0" ซึ่งก็คือ ON หรือ OFF นั่นเอง สัญญาณแสงที่ได้จากตัว LED หรือ Laser Diode จะถูกส่งผ่านเข้าไปในเส้นใยนำแสง เมื่อแสงผ่านเข้าไปในเส้นใยนำแสงแล้วมักจะมีการลดทอน (Attenuation) และมีการบิดเบือนไปของสัญญาณ (Distortion) ซึ่งทำให้แบนด์วิธ (Bandwidth) หรืออัตราการส่งถูกจำกัดไปด้วย ที่จุดปลายของสายเส้นใยนำแสง แสงจะพุ่งออกเข้าสู่ตัวรับ (Detector) ซึ่งที่จุดนี้ความเข้มของแสงจะน้อยลงและบิดเบือน

ไปก่อนที่สัญญาณแสงจะถูกเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า

1.3 ระบบของการสื่อสารโดยใช้เส้นใยนำแสงอย่างง่าย

เพื่อให้เข้าใจในระบบคร่าว ๆ ของการสื่อสารด้วยแสงได้สะดวก และประหยัดเวลา จะอธิบายถึงโครงสร้างของระบบง่าย ๆ ดังนี้



รูปที่ 1.2 แสดงการสื่อสารทางโทรศัพท์โดยใช้เส้นใยนำแสง

ในระบบจะประกอบด้วยวงจรส่ง (Transmitter Circuit) ตัวกลาง (Medium) ในการส่งซึ่งคือเส้นใยนำแสงและ วงจรรับ (Receiver Circuit) โดยในวงจรส่งจะประกอบไปด้วยภาคมอดูเลต (Modulate) หรือการเข้ารหัส (Coding) ของสัญญาณ ภาควงจรขับ (Driver Circuit) และแหล่งกำเนิดแสง LED หรือ Laser Diode สัญญาณอินพุตที่เข้ามาทางวงจรส่งซึ่งอาจจะเป็นเสียง, สัญญาณภาพ, ข้อมูล จะถูกนำมามอดูเลตก่อน (Pre-Modulate) หรือนำมาเข้ารหัสด้วยวิธีการมอดูเลตแบบต่าง ๆ เช่น AM, FM, PCM, ASK, FSK เมื่อผ่านการมอดูเลตหรือการเข้ารหัสแล้ว จะถูกส่งต่อไปยังวงจรขับและนำไปขับ (Drive) LED หรือ Laser Diode ต่อไปโดย LED หรือ Laser Diode จะเป็นส่วนที่เปลี่ยนสัญญาณทางไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณทางแสงและส่งผ่านเส้นใยนำแสงออกไปยังภาครับ ในส่วนภาครับนี้จะมีตัวโฟโตดีเทคเตอร์

(Photodetector) ซึ่งได้แก่ พีไอเอิน (PIN) หรือ เอพีดี (APD) ซึ่งจะเปลี่ยนสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า สัญญาณไฟฟ้าจะถูกดีมอดคูเลต (Demodulate) ด้วยขบวนการต่าง ๆ ได้สัญญาณที่เหมือนในคอนอินพุตของภาคส่งและเปลี่ยนสัญญาณเหล่านั้นให้เป็น เสียง, ภาพ, ข้อมูล ส่วนต่าง ๆ ง่าย ๆ ของระบบที่กล่าวมานี้ เป็นพื้นฐานของระบบที่ซับซ้อนของการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงในปัจจุบัน

1.4 การเปรียบเทียบเส้นใยนำแสงกับตัวกลางชนิดต่าง ๆ

เนื่องจากระบบการสื่อสารเส้นใยนำแสง มีคุณสมบัติที่ดี คือ มีการสูญเสียต่ำ (Low Loss) และใช้ได้กับย่านความถี่กว้าง ๆ (Wide Bandwidth) ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวโน้มว่าในอนาคต เส้นใยนำแสงจะถูกนำมาใช้แทน สายคู่เกลียว (Twisted Pair) และสายโคแอกเชียล (Coaxial Cable) เราสามารถเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของตัวกลางต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 1.1

GROWTH CAPABILITY TRANSMISSION MEDIA COMPARISONS

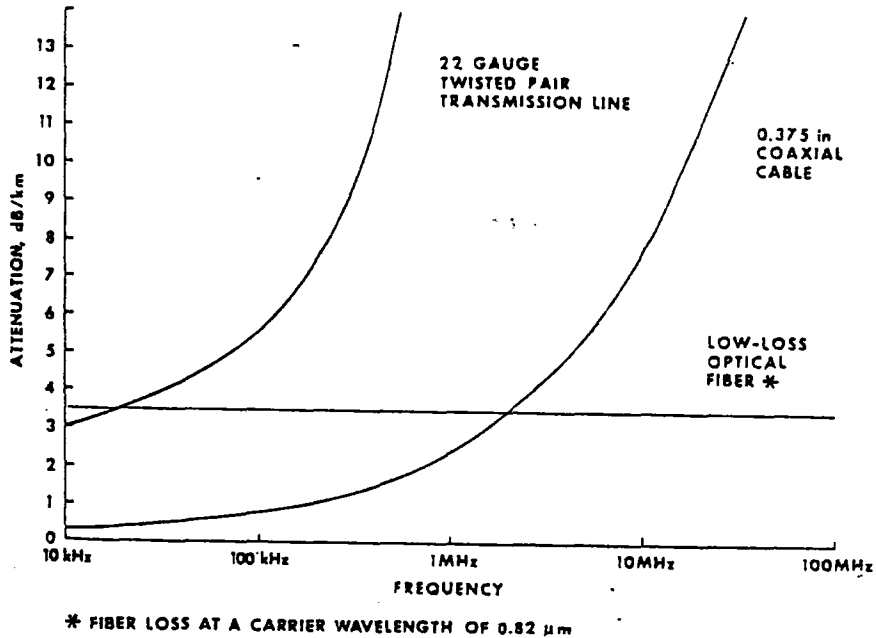
Transmission Media	Loss in dB/km at Half Bit Rate Frequency (Digital Transmission Rates)		
	T1 (1.544 Mb/s)	T2 (6.312 Mb/s)	T3 (44.736 Mb/s)
26-GAUGE TWISTED WIRE PAIR	24	48	128
19-GAUGE TWISTED WIRE PAIR	10.8	21	56
0.375-in-DIAMETER COAXIAL CABLE	2.1	4.5	11
LOW-LOSS OPTICAL FIBER *	3.5	3.5	3.5

* FIBER LOSS AT A CARRIER WAVELENGTH OF 0.82 μm

ตารางที่ 1.1 แสดงการเปรียบเทียบตัวกลางชนิดต่าง ๆ

จากตารางที่ 1.1 พบว่าที่ความถี่ต่าง ๆ ไม่มีผลต่อการลดทอน ซึ่งทำให้การควบคุมการทำงานง่ายและสะดวกกว่าระบบสายส่งแบบอื่น ๆ และเนื่องจากการสูญเสียต่ำ ทำให้การใช้ขยายหรือการทวนสัญญาณ (Repeater) น้อยลงในระยะทางที่เท่ากัน และจากการที่เส้นใยนำแสงมีขนาดเล็กน้ำหนักเบาและโค้งงอได้ง่ายทำให้นำมาใช้งานได้ดีในเครื่องบิน, เรือ, การสื่อสารในระยะทางไกลหรือในชุมชนที่มีการสื่อสารหนาแน่นและเนื่องจากเส้นใยนำแสงทำมาจากสารไดอิเล็กตริก

(Dielectric) เพราะฉะนั้นมันจึงไม่มีผลจากการรบกวนกันทางไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 1.3 กราฟแสดงการลดทอนเทียบกับความถี่ ในตัวกลาง 3 ชนิด

1.5 คุณสมบัติพิเศษต่าง ๆ ของการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง

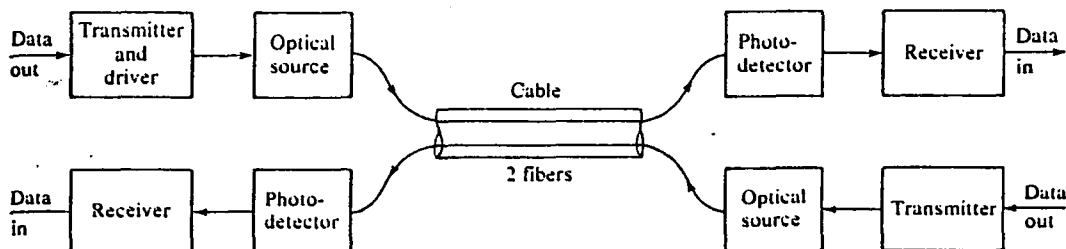
ระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารที่ใช้สายเคเบิลทำด้วยโลหะ (Metalic Cable) แล้วมีข้อดีต่าง ๆ ที่เกิดจากคุณสมบัติของเส้นใยนำแสงดังนี้

1. ให้แบนด์วิดท์ที่กว้างกว่า (Greater Bandwidth) การใช้คลื่นพาหะที่มีความถี่สูงในระบบสื่อสาร ทำให้แบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของสัญญาณกว้างมากขึ้นด้วย เพราะเส้นใยนำแสง (Fiber Optic) ขึ้นกับคลื่นพาหะที่มีความถี่อยู่ในช่วง 10^{13} - 10^{14} Hz เมื่อเปรียบเทียบกับความถี่วิทยุซึ่งมีความถี่ 10^6 - 10^9 Hz แล้วจะเห็นว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณกว้างขึ้นถึงประมาณ 10^6 เท่า
2. ขนาดเล็กและน้ำหนักเบา (Small Size and Light Weight) เส้นใยนำแสงเพียงเส้นเดียวสามารถแทนคู่สายทองแดงขนาดใหญ่ ๆ แต่ละคู่ได้ เช่น สายเคเบิลทางโทรศัพท์ที่มี 1,000 คู่สาย มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 7-10 เซนติเมตร สามารถใช้เส้นใยนำแสงเพียงเส้นเดียวมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตรแทนได้ในการส่งจำนวนช่องสัญญาณที่เท่ากัน

3. การสูญเสียต่ำ (Low Attenuation) เส้นใยนำแสงมีค่าการสูญเสียเนื่องจาก Attenuate น้อยกว่า สายคู่ (Twisted Wire) หรือโคแอกเซียลเคเบิล (Coaxial Cable)
4. ไม่ถูกรบกวนโดย EMI (Freedom from EMI) เนื่องจากเส้นใยนำแสงไม่ได้สร้างจากเส้นลวดเหมือนสายเคเบิล แต่สร้างจากแก้ว (Glass) หรือซิลิคอน (Silicon) ดังนั้นจึงไม่แพ้หรือถูกรบกวนโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro-Magnetic Interface; EMI) และไม่ต้องใช้เทคนิคหรือวิธีการชิลด์ (Shield) ที่มีราคาแพงหรือยุ่งยากเพื่อป้องกันการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
5. คงทนไม่ถูกรบกวนโดยสภาพดินฟ้าอากาศ (Ruggedness) แก้วหรือซิลิคอนมีความแข็งกว่าโลหะถึง 20 เท่า และซิลิคอนหรือแก้วก็เป็นธาตุเฉื่อยดังนั้นสภาพแวดล้อมจึงมีผลน้อยกว่าแบบสายที่ทำด้วยโลหะ
6. มีความปลอดภัย (Safety) ในระบบสายโลหะ จำเป็นต้องป้องกันอันตรายให้กับอุปกรณ์หรือมนุษย์จากการช็อตระหว่างสาย หรือ ระหว่างสายกับกราวด์ (Ground) ซึ่งเมื่อใช้เส้นใยนำแสงแล้วจะไม่มีปัญหาเกี่ยวกับสิ่งเหล่านี้
7. ราคาถูกกว่า (Low Cost) ราคาของเส้นใยนำแสง ในปัจจุบันมีราคาต่ำลงเรื่อย ๆ ในขณะที่ราคาของสายโลหะมีราคาเพิ่มขึ้น ในทางปฏิบัติทุกวันนี้ ราคาของการออกแบบระบบที่ใช้เส้นใยนำแสงมีราคาต่ำกว่าระบบแบบใช้โลหะ

1.6 หลักการทั่วไปของการสื่อสารสองทางด้วยเส้นใยนำแสง

ในโครงการพิเศษนี้เป็นการสื่อสารแบบคู่เพล็กซ์ (Duplex) คือสามารถส่งและรับสัญญาณเสียงได้ในเวลาเดียวกันในโครงการนี้จะประกอบด้วย 3 ส่วนใหญ่ ๆ ด้วยกันคือ ภาควงเส้นใยนำแสงและภาควิธี

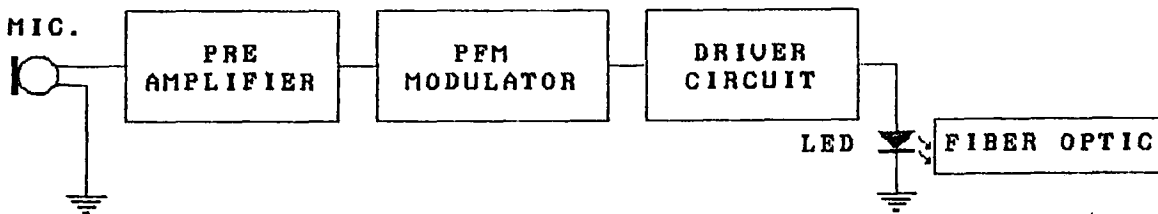


รูปที่ 1.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมการสื่อสารแบบคู่เพล็กซ์

1.6.1 หลักการของภาคส่ง

เนื่องจากในโครงงานนี้เป็น การสื่อสารโดยใช้สัญญาณอินพุต คือ สัญญาณอะนาล็อก เป็นแบบอนาล็อก ดังนั้นจึงใช้ LED เป็นแหล่งกำเนิดแสง เพราะว่าพลังงานแสงที่มันให้ออกมา มีความเป็นเชิงเส้นดีกว่า Laser Diode และในการนำมาใช้งานสามารถทำได้ง่ายกว่า Laser Diode ในส่วนของวงจรภาคส่งแสดงเป็นองค์ประกอบได้ดังรูปที่ 1.5

จากรูปแสดงถึงองค์ประกอบในส่วนของภาคส่ง ซึ่งสัญญาณอะนาล็อกจะถูกแปลงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าโดยผ่านทางไมโครโฟนจากนั้นจะถูกขยายสัญญาณโดยผ่านวงจรปริแอมพลิไฟร์และทำการมอดคูเลต (Pre-Modulated) แบบ PFM (Pulse Frequency Modulation) สัญญาณที่ถูกมอดคูเลตแล้วที่ออกมาจากส่วนนี้ จะมีความถี่เปลี่ยนแปลง โดยขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของสัญญาณที่เกิดจากไมโครโฟน สัญญาณ PFM จะถูกส่งไปยังวงจรขับและขับ LED ซึ่งแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นแสงแล้วส่งผ่านไปยังเส้นใยนำแสง



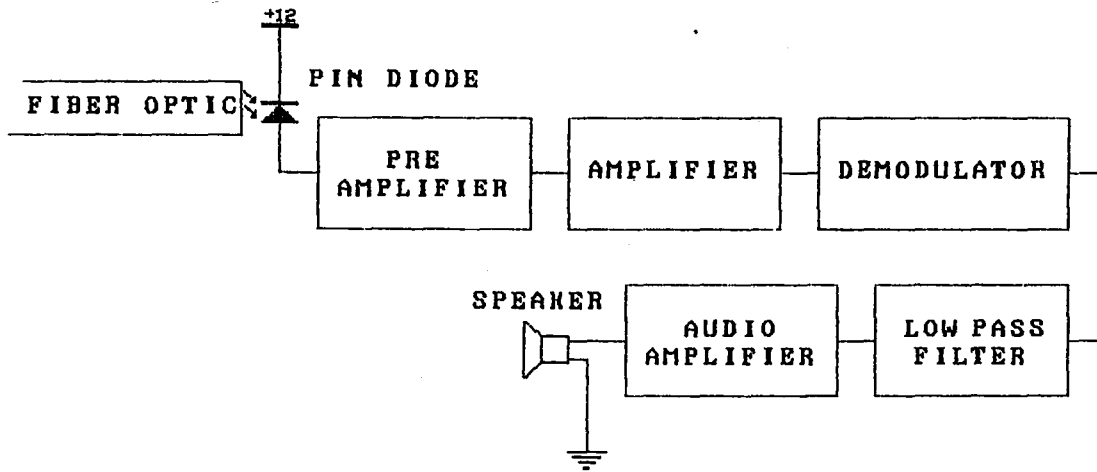
รูปที่ 1.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของภาคส่ง

1.6.2 เส้นใยนำแสง

ในโครงงานนี้ใช้เส้นใยนำแสงแบบ Multimode ชนิด Graded Index 2 เส้น ยึดติดกัน มีขนาด Core และ Cladding เท่ากับ 62.5/125 ไมครอน ที่ปลายทั้งสองของเส้นใยนำแสง แต่ละเส้นจะมีหัวคอนเน็กเตอร์แบบ ST Style เชื่อมติด (Splice) ไว้แล้ว ซึ่งเวลานำมา คัปปลิง (Coupling) กับ LED หรือ PIN Diode สามารถใช้ร่วมกับคอนเน็กเตอร์แบบ ST Receptacle ได้ทันที

1.6.3 หลักการของภาครับ

ในส่วนหน้าที่ของวงจรรับ จะทำการดีเท็ค (Detect) สัญญาณแสงที่ส่งผ่านออกมาจากเส้นใยนำแสงแล้วแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า จากนั้นนำไปเข้า วงจรแอมพลิไฟร์ วงจรดีมอดคูเลต สัญญาณ วงจรกรองความถี่ต่ำ วงจรขยายสัญญาณออกดีไอ และสัญญาณที่ได้จะถูกขับไปยังลำโพง ได้เป็นเสียงออกมาเหมือนเดิม สามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูป 1.6



รูปที่ 1.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของภาครับ

บทที่ 2

ทฤษฎีของเส้นใยนำแสง แหล่งกำเนิดแสง และอุปกรณ์รับแสง

สำหรับการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงนั้น แสงจะเป็นตัวนำพาข่าวสาร ข้อมูลต่าง ๆ จากจุดส่งไปยังจุดรับ ดังนั้นในบทนี้กล่าวถึง คุณสมบัติพื้นฐานของแสงที่จำเป็นในการศึกษาทฤษฎีของเส้นใยนำแสง แหล่งกำเนิดแสง และอุปกรณ์รับแสง

2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของแสง

การที่จะศึกษาถึงเทคโนโลยีของเส้นใยนำแสงควรมีพื้นฐานเกี่ยวกับการหักเห และการสะท้อนของแสงเสียก่อน เริ่มจากดัชนีหักเหแสงของตัวกลาง (n) ซึ่งก็คืออัตราส่วนของความเร็วแสงในสุญญากาศต่อความเร็วแสงในตัวกลาง (เช่น แก้ว, พลาสติก, น้ำ) ในที่นี้เราจะประมาณความเร็วแสงในสุญญากาศเท่ากับความเร็วของแสงในอากาศ จากความสัมพันธ์นี้จึงเขียนเป็นสมการได้

$$n = C/V_m \dots\dots\dots(2.1)$$

เมื่อ C = ความเร็วของแสงในสุญญากาศ = 3×10^8 m/s

V_m = ความเร็วของแสงในตัวกลาง

ปรากฏการณ์หักเหของแสงจะเกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง ($n_1 \neq n_2$) ดังในรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงถึงกรณีที่ $n_1 > n_2$ พิจารณาแสงซึ่งเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหแสงสูง n_1 ไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่ำ n_2 (สังเกตว่ามุมตกกระทบ θ_1 จะมีค่าเท่ากับมุมสะท้อน θ_3 เนื่องจากกฎของการสะท้อน) จะพบว่ารังสีของแสงเกิดการหักเห โดยจะเปลี่ยนทิศทางเบนออกจากเส้นปกติมากขึ้นซึ่งจะทำให้มุม θ_2 กับเส้นปกติ และมุม θ_2 จะมีค่ามากกว่ามุมตกกระทบ θ_1 จากความสัมพันธ์นี้สามารถอธิบายได้โดยกฎของ Snell ดังสมการ

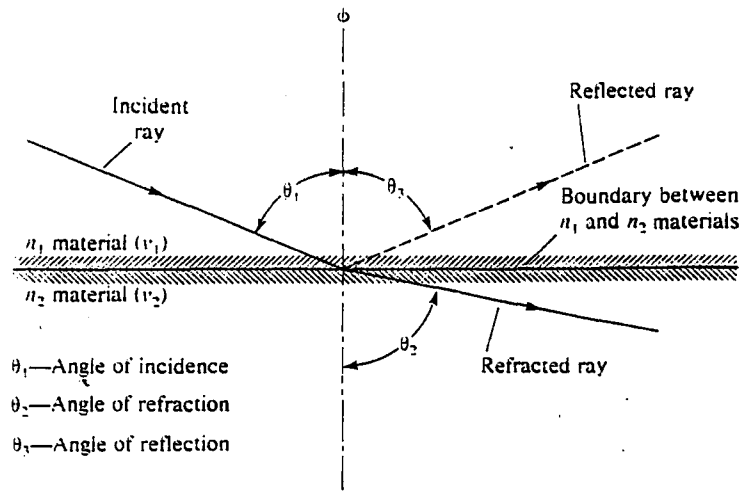
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \dots\dots\dots(2.2)$$

$$\text{หรือ} \quad \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \dots\dots\dots(2.3)$$

เมื่อ θ_1 = มุมตกกระทบของรังสี θ_3 = มุมสะท้อนของรังสี

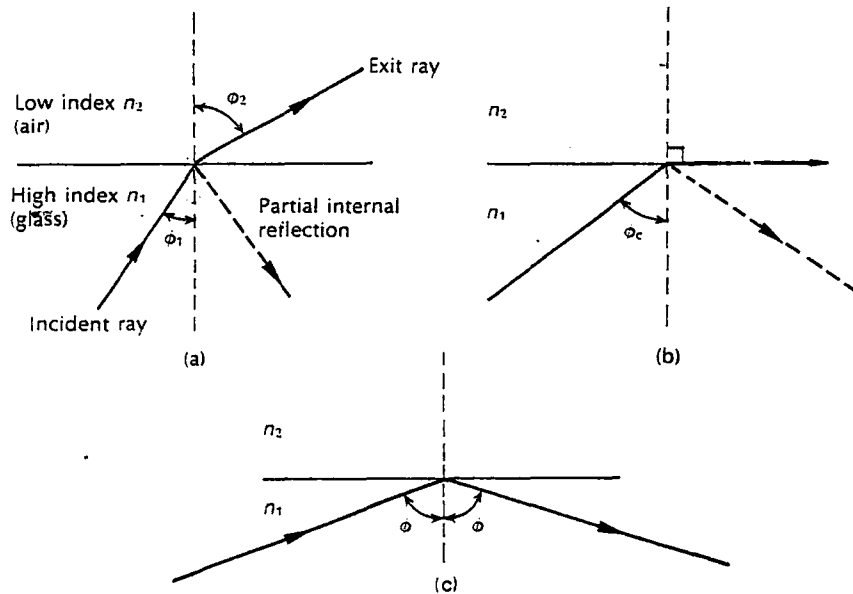
θ_2 = มุมหักเหของรังสี

ในกรณีตรงกันข้ามถ้าแสงเดินทางจากตัวกลาง n_2 ไปยังตัวกลาง n_1 ($n_2 < n_1$) จะทำให้รังสีหักเหของแสงเบนเข้าหาเส้นปกติมากขึ้น



รูปที่ 2.1 แสดงถึงปรากฏการณ์หักเหของแสง

สำหรับในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเส้นใยนำแสงก็คือ เฉพาะในกรณีที่แสงจะต้องเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหแสงมากไปหาเนื้อที่น้อยเท่านั้น ดังรูปที่ 2.2 จะแยกเป็น 3 กรณีต่าง ๆ กัน โดยจะกล่าวถึงในรูปที่ 2.2(b) ก่อน



รูปที่ 2.2 แสดงถึงการหักเหของรังสีที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับภายในหมด

จากรูปจะเห็นว่ารังสีหักเหในรูป b จะขนานไปตามผิวของตัวกลาง ในกรณีนี้จะได้ว่ามุมตกกระทบ θ_c เป็นมุมวิกฤติ (Critical Angle; θ_c) ซึ่งเป็นมุมที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมด แสงไม่สามารถเดินทางผ่านไปยังตัวกลางที่ 2 เราสามารถหาความสัมพันธ์ของกรณีการเกิดสะท้อนกลับหมด

ก่อนกลับหมดได้ โดยให้ $\theta_c = 90$ องศา

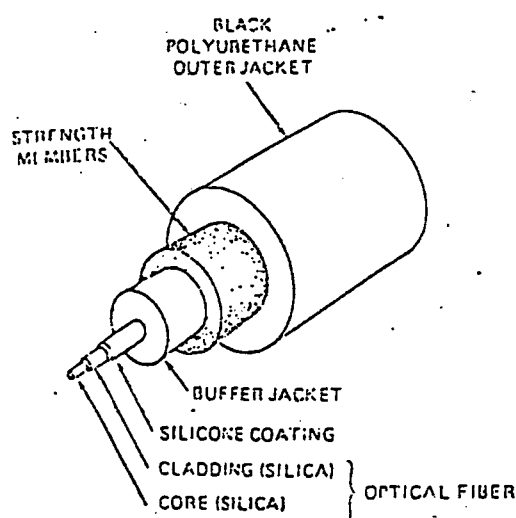
จากกฎของสเนลล์

$$\begin{aligned} n_1 \sin \theta_1 &= n_2 \sin \theta_2 \\ n_1 \sin \theta_c &= n_2 \sin 90^\circ \\ n_2/n_1 &= \sin \theta_c \\ \theta_c &= \sin^{-1}(n_2/n_1) \end{aligned}$$

สำหรับรังสีในรูป a จะมีมุมตกกระทบน้อยกว่ามุมวิกฤตดังนั้นรังสีส่วนใหญ่ก็จะเป็นรังสีหักเหทะลุผ่านตัวกลางออกไป จะมีบางส่วนเท่านั้นที่เป็นรังสีสะท้อนที่สะท้อนกลับออกมาด้วยมุมสะท้อนที่เท่ากับมุมตกกระทบ ส่วนรังสีในรูป c จะมีมุมตกกระทบมากกว่ามุมวิกฤต ทำให้ไม่เกิดการหักเห แต่จะเกิดการสะท้อนกลับภายในทั้งหมด (Total Internal Reflection) กรณีของรังสี c ก็คือ ลักษณะการใช้งานเส้นใยนำแสงนั่นเอง

2.2 โครงสร้างของเส้นใยนำแสง

เส้นใยนำแสงประกอบด้วย คอร์ (Core) แล้วล้อมรอบด้วยชั้นของวัสดุที่เรียกว่า แคลดดิ้ง (Cladding) และแคลดดิ้งนี้จะถูกหุ้มไว้ด้วยแจ็คเก็ต (Jacket) อีกชั้นหนึ่ง คอร์ของเส้นใยนำแสงจะคอยส่งผ่านคลื่นแสง โดยมีแคลดดิ้งเป็นตัวป้องกันเก็บคลื่นแสงไว้ให้อยู่ภายในคอร์ และช่วยให้คอร์มีความแข็งแรงมากขึ้น ส่วนแจ็คเก็ตจะคอยป้องกันความชื้น รอยขีดข่วน รอยฉีก ที่อาจเกิดกับเส้นใยนำแสงได้



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของเส้นใยนำแสง

คอร์และแคลคดั่งทำจากวัสดุจำพวกแก้วหรือพลาสติก แบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

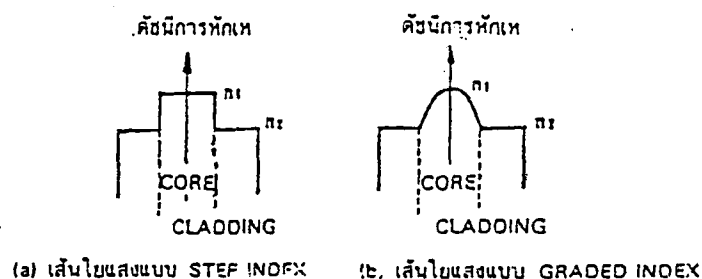
1. คอร์และแคลคดั่งเป็นพลาสติก
2. คอร์และแคลคดั่งเป็นแก้ว
3. คอร์เป็นแก้ว แคลคดั่งเป็นพลาสติก

ในกรณีที่เป็นพลาสติก คอร์จะเป็นพวกลโพลีสไตรีน (Polystyrene) หรือ โพลีเมททิลเมทาคราเลท (Polymethyl Methacrylate) ส่วนแคลคดั่งโดยทั่วไปจะเป็นพวกซิลิโคน (Silicone) หรือ เทฟลอน (Teflon) ถ้าเป็นแก้วจะต้องมีความบริสุทธิ์มากอย่างไรก็ตามเราอาจเจอปนโบรอน เจอมาเนียม หรือฟอสเฟอรัสเล็กน้อย ซึ่งสารพวกนี้จะทำให้ดัชนีหักเหของแสงเปลี่ยนแปลงไป โบรอนออกไซด์เมื่อนำมาเจือปนกับซิลิกา จะเกิดเป็นแก้วโบโรซิลิเคท (Borosilicate Glass) ซึ่งเป็นแคลคดั่งของเส้นใยนำแสง เพื่อทำให้เส้นใยแสงมีประสิทธิภาพดีขึ้นกว่าเดิม

ในการเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยนำแสง แบบแก้ว กับ แบบพลาสติก แบบพลาสติกมีความยืดหยุ่น ราคาถูก ง่ายในการติดตั้งและการเชื่อมต่อ อีกทั้งสามารถทนต่อความเค้น (Stress) ได้มากกว่าแก้วและมีน้ำหนักเพียง 40% ของเส้นใยนำแสงแบบแก้วต่ออย่างไรก็ตาม แบบพลาสติกไม่สามารถส่งแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากการสูญเสียในสายสูง ซึ่งจะใช้กับระยะทางสั้น ๆ เท่านั้น เช่นภายในอาคาร เป็นต้น เส้นใยนำแสงที่มีคอร์เป็นแก้ว ได้นำมาใช้อย่างกว้างขวางมากกว่าแบบพลาสติก

2.3 พารามิเตอร์ทางแสงที่สำคัญของเส้นใยนำแสง

2.3.1 อัตราส่วนผลต่างค่าดัชนีหักเห (Δ)



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะดัชนีหักเหของเส้นใยนำแสงทั้ง 2 ชนิด

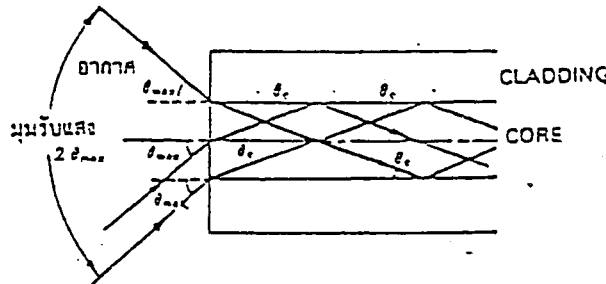
อัตราส่วนผลต่างของค่าดัชนีหักเห เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงความแตกต่างของดัชนีหักเหของ Core กับ Cladding ของเส้นใยนำแสงที่มีลักษณะของดัชนีหักเหดังรูปที่ 2.4 เราสามารถหาค่าของอัตราส่วนผลต่างค่าดัชนีการหักเหได้ดังสมการที่ 2.4

$$\Delta = (n_{core} - n_{cl}) / n_{core} \approx (n_1 - n_2) / n_1 \dots\dots\dots(2.4)$$

ปกติแล้ว Δ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ 1 อัตราส่วนผลต่างค่าดัชนีหักเหมีจุดประสงค์เพื่อแสดงความสามารถในการป้อนแสงเข้าไปใน Core ถ้าหาก Δ มีค่ามาก หมายถึงว่าสามารถป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสงได้ง่าย

2.3.2 มุมรับแสง (θ_{max})

ในการที่จะให้แสงเดินทางไปในเส้นใยนำแสงนั้นจะต้องให้มุมตกกระทบที่ด้านปลายของเส้นใยนำแสงมีค่าน้อยกว่ามุมวิกฤติระหว่างดัชนีหักเหของอากาศ และ Core ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงมุมรับแสง

ค่า θ_{max} นี้สามารถหาได้จากเงื่อนไข การสะท้อนกลับหมดที่รอยต่อของ Core กับ Cladding ถ้ากำหนดให้ค่าดัชนีหักเหของอากาศเป็น n_0 ($n_0=1$) ความสัมพันธ์ของมุมตกกระทบ θ_{max} ที่ด้านปลายของเส้นใยนำแสงกับมุมหักเห θ_c สามารถหาได้จากกฎของสเนลล์ (Snell Law) ซึ่งจะได้ว่า

$$n_0 \sin \theta_{max} = n_1 \sin \theta_c$$

$$\sin(90^\circ - \theta_c) = \cos \theta_c = n_2 / n_1 \dots\dots\dots(2.5)$$

ดังนั้นกรณีที่มีมุมรับแสง θ_{max} มีค่าสูงสุดได้นั้น $n_1 \approx n_2$ จากสมการ 2.4 และ 2.5 จะได้

$$\sin \theta_{max} = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} / n_1 \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \dots\dots\dots(2.6)$$

การที่จะให้แสงเดินทางไปในเส้นใยนำแสงได้นั้นมุมตกกระทบของแสงจะต้องมีค่าอยู่ในช่วง

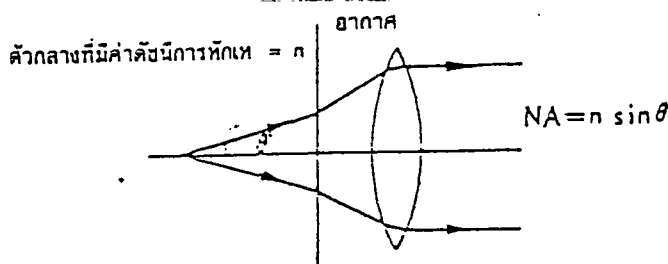
ของ $2\theta_{max}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 มุม $2\theta_{max}$ นี้เป็นมุมรับแสงกรณีที่ θ_{max} มีค่าน้อยสามารถ
ใช้ค่าประมาณ $\theta_{max} = \sin \theta_{max}$ ดังนั้นจะได้มุมรับแสงดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{มุมรับแสง } 2\theta_{max} &= 2\sin \theta_{max} \\ &= 2n_1 \sqrt{(2\Delta)} \dots\dots\dots (2.7) \end{aligned}$$

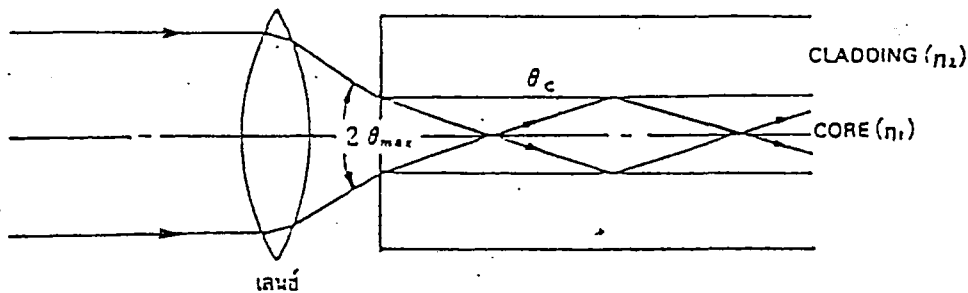
2.3.3 ตัวเลขอะเพอร์เจอร์ (NUMERICAL APERTURE : NA)

NA เป็นตัวเลขที่บ่งบอกถึงความสามารถในการรับแสง ในการแสดงประสิทธิภาพของเลนส์
วัตถุของกล้องจุลทรรศน์นั้น จะใช้หารามิเตอร์ที่เรียกว่า Numerical Aperture ดังรูปที่ 2.6
โดยแสงที่ออกจากวัตถุบนแกนนั้น ให้ลำแสงส่วนที่กว้างออกกว้างที่สุดทำมุม θ กับแกน และให้ค่า
ดัชนีหักเหของวัตถุเป็น n จะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$NA = n \sin \theta \dots\dots\dots (2.8)$$



รูปที่ 2.6 แสดงค่าจำกัดความของ Numerical Aperture



รูปที่ 2.7 แสดงวิธีการป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสงอย่างมีประสิทธิภาพ

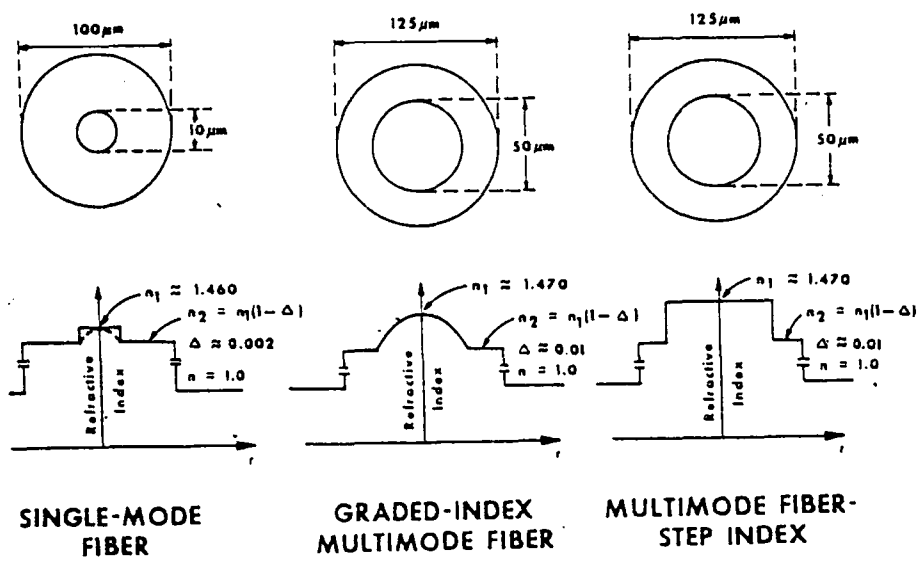
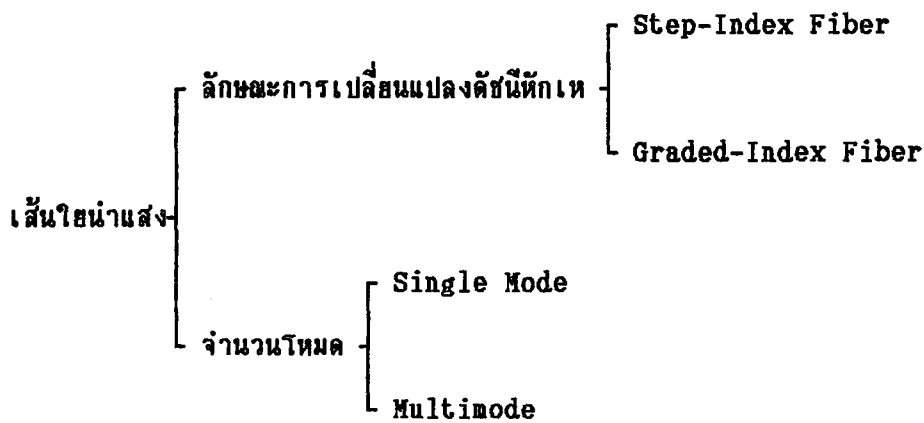
ในที่นี้ θ เป็นมุมที่กำหนดจากมุมวิกฤติของรอยต่อของวัตถุกับอากาศ NA นี้นิยมใช้ในการพิจารณาคุณสมบัติของเส้นใยนำแสง กล่าวคือ ในการที่จะทำให้สามารถป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสงอย่างมีประสิทธิภาพที่สุดนั้น จะต้องใช้เลนส์ที่มี NA ดังสมการ

$$NA = n_1 \sin \theta_c = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \dots\dots\dots(2.9)$$

$$NA = n_1 \sqrt{(2\Delta)} \dots\dots\dots(2.10)$$

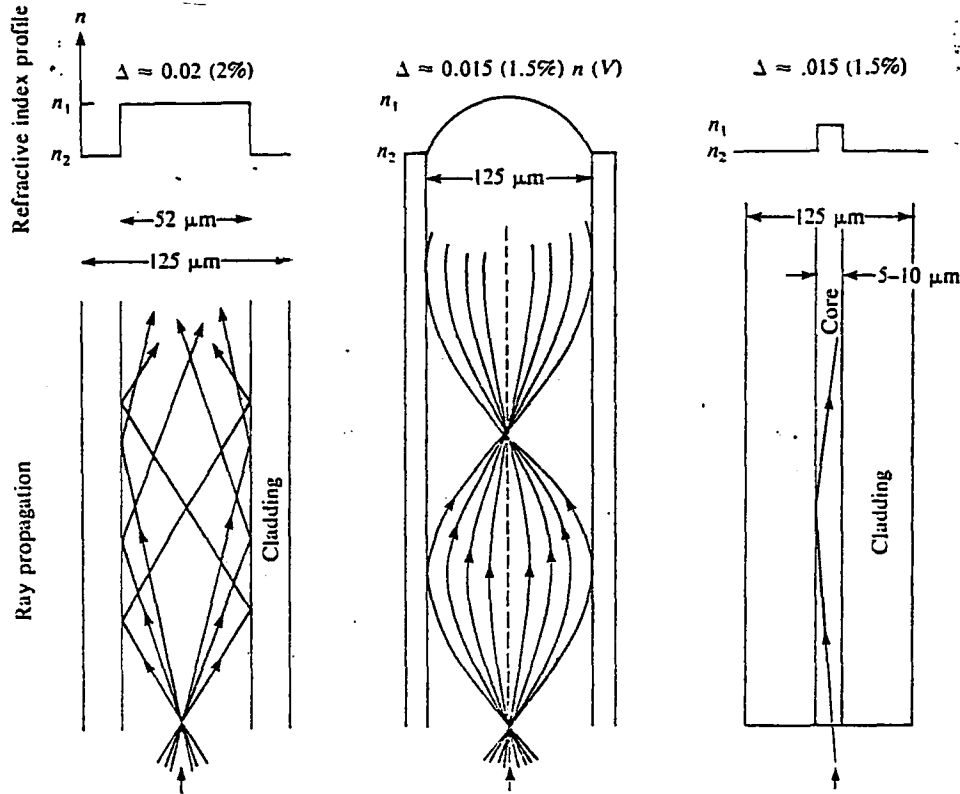
2.4 ชนิดของเส้นใยนำแสง

ชนิดของเส้นใยนำแสงสามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหหรือแบ่งตามจำนวนโหมด (Mode) ได้ดังนี้



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของเส้นใยนำแสงชนิดต่าง ๆ

กรณีของ Step-Index ค่าดัชนีหักเหของ Core จะมีค่าเท่ากันตลอดและเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดที่บริเวณ Cladding ส่วนในกรณี Graded-Index ค่าดัชนีหักเหของแสงจะแปรตามรัศมีของ Core ซึ่งทั้ง 2 แบบ สามารถแบ่งเป็น Single Mode และ Multimode

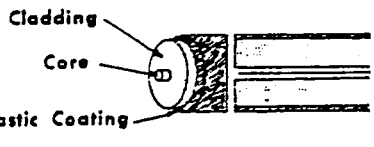
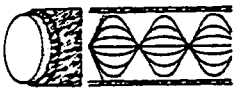



รูปที่ 2.9 แสดงทิศทางการเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสงแต่ละชนิด

เส้นใยนำแสงแบบ Multimode จะมีข้อได้เปรียบกว่าแบบ Single Mode หลายอย่าง เช่น มีขนาดของ Core ใหญ่ ทำให้ง่ายในการส่งกำลังของแสงไปยังเส้นใยนำแสง และง่ายต่อการเชื่อมต่อ (Splice) ระหว่างเส้นใยนำแสงด้วยกัน ข้อดีอีกอย่างหนึ่งคือเราสามารถให้ LED ในการส่งแสงใน Multimode ในขณะที่ Single Mode จะต้องใช้เฉพาะ Laser Diode เท่านั้น ถึงแม้ว่า LED จะมีกำลังส่งน้อยกว่า Laser Diode ก็ตาม แต่ LED สามารถทำงานได้ง่ายและถูกกว่า มีอายุใช้งานมากกว่า และยังต้องการวงจรขับขื่อนน้อยกว่า จึงมักใช้ LED มากกว่า Laser Diode

สำหรับข้อเสียของ Multimode คือ เมื่อเราส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูง (High Speed Data) และใช้ระยะทางการสื่อสารไกล จะทำให้เกิดการกระจายระหว่างโหมด (Intermodal Dispersion) ซึ่งหมายถึงเราส่งสัญญาณแสงที่เป็นพัลส์ไปยังเส้นใยนำแสงกำลังส่งของพัลส์จะกระจายเป็นหลาย ๆ โหมด แต่ละโหมดจะถูกส่งไปด้วยความเร็วที่ต่างกัน ซึ่งแต่ละโหมดที่รับได้ปลายทางก็จะมีเวลาต่างกันด้วย ทำให้พัลส์ที่รับได้เกิดการแผ่กว้างออกไปตามเวลาที่ใช้ในการเดินทาง

ซึ่งผลอันนี้เราเรียกว่า การกระจายระหว่างโหมด

	SINGLE-MODE FIBER	GRADED-INDEX MULTIMODE FIBER	STEP-INDEX MULTIMODE FIBER
			
SOURCE	REQUIRES LASER	LASER or LED	LASER or LED
BANDWIDTH	VERY VERY LARGE > 3 GHz-km	VERY LARGE 200 MHz to 3 GHz-km	LARGE < 200 MHz-km
SPLICING	VERY DIFFICULT DUE TO SMALL CORE	DIFFICULT BUT DOABLE	DIFFICULT BUT DOABLE
EXAMPLE OF APPLICATION	SUBMARINE CABLE SYSTEM	TELEPHONE TRUNK BETWEEN CENTRAL OFFICES	DATA LINKS
COST	LESS EXPENSIVE	MOST EXPENSIVE	LEAST EXPENSIVE

รูปที่ 2.10 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเส้นใยนำแสงชนิดต่าง ๆ

2.4.1 เส้นใยนำแสงแบบ SINGLE-MODE

เส้นใยนำแสงชนิดนี้ถูกออกแบบสำหรับการส่งเพียงโหมดเดียวเท่านั้น ลักษณะของเส้นใยนำแสงชนิดนี้ คือมีส่วน Core ที่เล็กมาก ประมาณ 4-10 ไมครอน

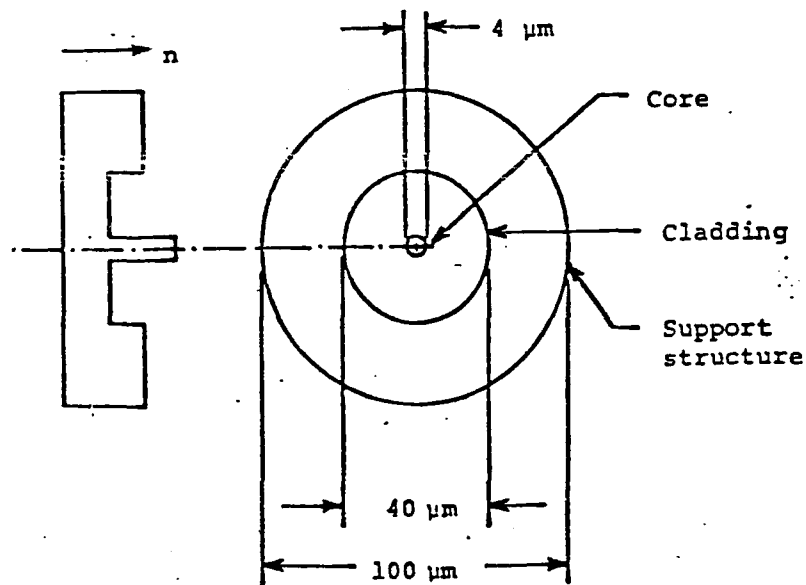
สำหรับการหาโหมด (Mode) ของการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของเส้นใยนำแสง สามารถหาค่าได้จากค่าตัวแปร ที่เรียกว่า V-number หรือ Normalized Wave Number ซึ่งเขียนได้ว่า

$$V = k_0 a \text{NA} \dots\dots\dots (2.11)$$

โดยที่ k_0 คือ เลขคลื่นใน Free Space = $2\pi/\lambda_0$

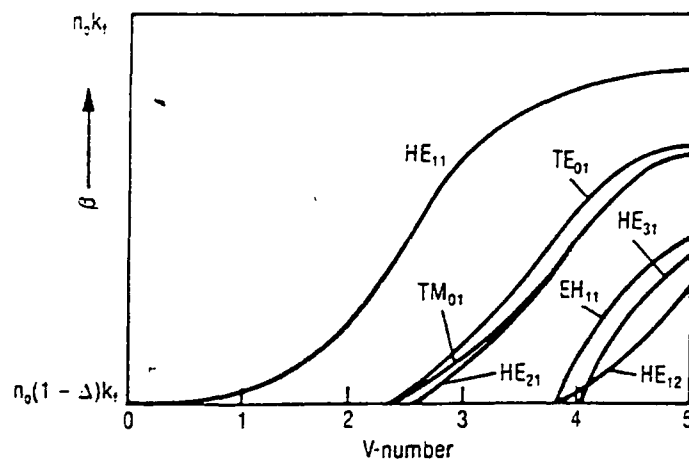
a คือ รัศมีของ Core

NA คือ ตัวเลข Aperture

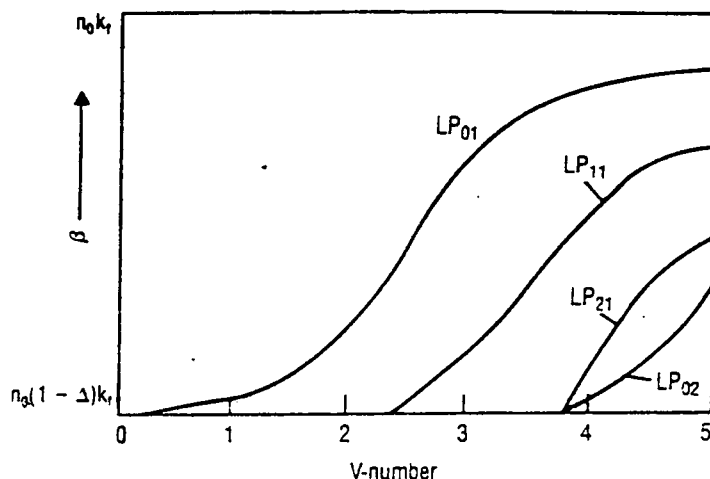


รูปที่ 2.11 แสดงพื้นที่หน้าตัดของ Single-Mode

ค่า V-number จะเป็นตัวบอกถึงจำนวนโหมดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่สามารถแพร่หรือเดินทางเข้าไปในเส้นใยนำแสงได้ซึ่งโดยปกติแล้วถ้าค่า V-number น้อยกว่า 2.405 จะมีเพียงโหมดต่ำสุดเท่านั้นที่สามารถแพร่ (Propagate) เข้าไปในเส้นใยนำแสงได้ และถ้าค่า $V=2.405$ ค่าความยาวคลื่นของโหมดที่มีอันดับสูงกว่า (Higher-order Modes) จะถูก Cut-Off ไม่สามารถแพร่เข้าไปได้ซึ่งเรียกว่า Cut-Off Wavelength แต่จะยังคงมีโหมดต่ำสุดที่ยังสามารถแพร่เข้าไปในเส้นใยนำแสงได้



รูปที่ 2.12 แสดงถึงอันดับของโหมดต่าง ๆ ในเส้นใยนำแสง โดยพล็อตค่าคงที่ของการแพร่ในเส้นใยนำแสง (β) เป็นฟังก์ชันของ V-number



รูปที่ 2.13 แสดงอันดับของโหมดโพลาไรซ์เชิงเส้น (Linearly Polarized; LP) ต่าง ๆ ในเส้นใยนำแสง

จากรูปที่ 2.12 และ 2.13 เราจะเห็นว่าไม่มีเพียงโหมด $HE_{1,1}$ หรือ ถ้าเป็นโหมดในโพลาไรซ์เชิงเส้น (Linearly Polarized ; LP) ก็จะมีเพียงโหมด $LP_{0,1}$ เท่านั้นที่จะสามารถแพร่เข้าไปเป็นใยนำแสงแบบ Single-Mode



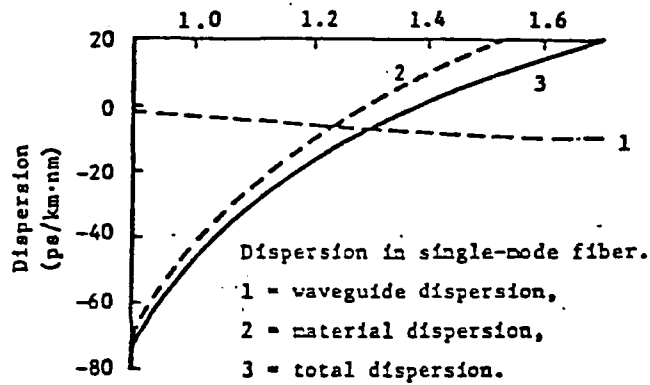
LP₀₁

รูปที่ 2.14 แสดงถึงแพทเทิร์น (Pattern) ความสว่างของแสง $LP_{0,1}$ ที่ออกมาจากปลายของเส้นใยนำแสง โดสใช้ฉาก (Screen) เป็นตัวรับแสง

การกระจาย (Dispersion) ที่เกิดขึ้นใน Single-Mode จะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ

1. Wavelength Dispersion ปกติจะมีค่าเป็นลบ
2. Material Dispersion จะมีค่าเป็นบวกที่ความยาวคลื่นมาก ๆ

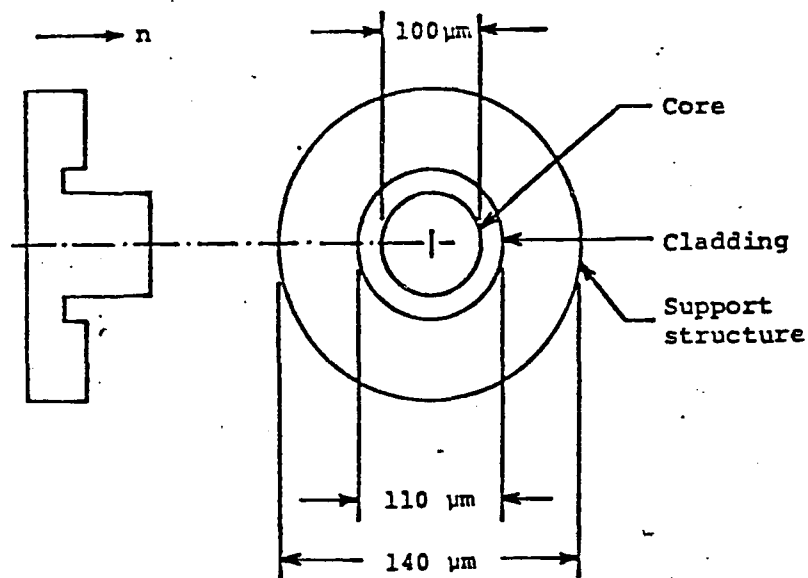
จากรูป 2.15 จะเห็นว่าที่ค่าความยาวคลื่นหนึ่ง ซึ่งมีผลรวมของการกระจายเป็นศูนย์ ดังนั้นเราจำเป็นต้องเลือกให้ที่ช่วงความยาวคลื่นที่ผลรวมของการกระจายเป็นศูนย์



รูปที่ 2.15 แสดงการกระจายในเส้นใยนำแสงแบบ Single-Mode

2.4.2 เส้นใยนำแสงแบบ MULTIMODE STEP-INDEX FIBER

เส้นใยแสงชนิดนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากมีแบนด์วิธไม่กว้างมากนักในรูปที่ 2.16 แสดงถึงพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยนำแสง

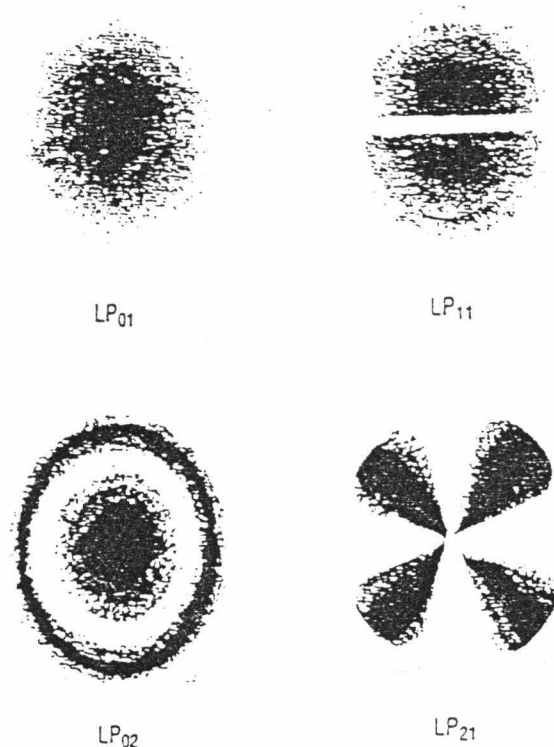


รูปที่ 2.16 แสดงพื้นที่หน้าตัดของ Multimode Step Index Fiber

ขนาดของ Core จะมีขนาดใหญ่โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 100 ไมครอน ค่าดัชนีของแสงมีค่าเท่ากันตลอดในชั้นของ Core ส่วน Cladding จะมีขนาดบาง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีความแตกต่างของค่าดัชนีของแสงระหว่าง Core กับ Cladding อย่างมาก เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียซึ่งเกิดจากการโค้งงอของเส้นใยแสง

ข้อดีของเส้นใยแสงชนิดนี้ คือมีขนาดของคอร์ใหญ่และมีค่า NA สูง ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการที่จะรับกำลังแสงเข้าไป จึงเหมาะสำหรับการใช้กับ LED ซึ่งมีราคาถูก ยิ่งไปกว่านั้นปัญหาในการเชื่อมต่อกันจะมีน้อยเนื่องจากขนาดที่ใหญ่ของ Core อย่างไรก็ตามเนื่องจากมีค่า NA มากจึงทำให้เกิดการสูญเสียมากตามไปด้วยโดยทั่วไปจะประมาณ 1-6 dB/km ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการใช้ในระบบที่มีระยะสั้น ๆ เช่น การเชื่อมต่อระบบคอมพิวเตอร์

ในเส้นใยนำแสงแบบ Multimode ค่า V-number จะมีค่ามากกว่า 2.405 ซึ่งทำให้โหมดต่าง ๆ สามารถแพร่เข้าไปในเส้นใยได้ ตัวอย่างเช่น ถ้าค่า V-number มีค่ามากกว่า 2.405 เล็กน้อย มีเพียงโหมด LP_{01} และ LP_{11} สามารถแพร่เข้าไปได้ อย่างไรก็ตามเมื่อ $V=3.832$ จะมีโหมด LP_{21} และ LP_{02} เพิ่มขึ้นมา ที่สามารถแพร่เข้าไปได้ (ดูรูปที่ 2.13 ประกอบด้วย)

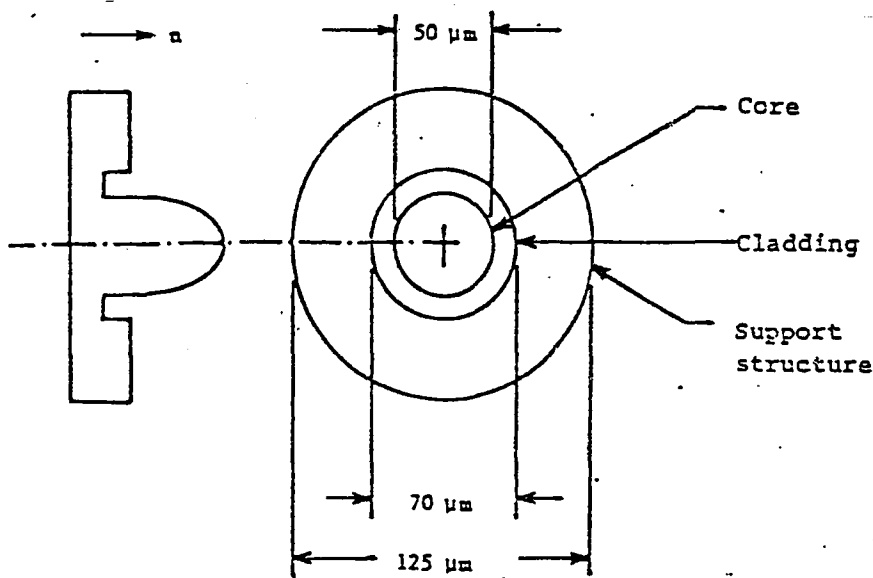


รูปที่ 2.17 แสดงแพทเทินความสว่างของแสงของโหมด LP_{01} , LP_{11} , LP_{02} , LP_{21}

2.4.3 เส้นใยนำแสง แบบ MULTIMODE GRADED-INDEX FIBER

เส้นใยนำแสงชนิดนี้มีความสำคัญและมีการพัฒนาไปอย่างมาก มีค่าดัชนีหักเหของแสงของ Core เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกับรัศมี a (ดังรูป 2.18) รายละเอียดข้อนี้เป็นสิ่งสำคัญในการกำหนดความจุของแบนด์วิธ ในทางทฤษฎีแล้วกราฟเส้นรอบรูปของดัชนีหักเหของแสงจะสามารถแสดงเสมือนกฎของกำลังที่ส่งออกมาได้

เส้นใยนำแสงชนิดนี้ได้มีการยอมรับเป็นมาตรฐานของขนาดของ Core จะมีค่าประมาณ 50 ไมครอน ค่า NA จะเปลี่ยนตามแต่ละประเภทที่ใช้ อาจเป็น 0.18, 0.2 หรือ 2.3 ส่วน Cladding จะต้องมีความหนาพอสมควรอย่างน้อย 4-5 ไมครอน การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของแสงใน Core สามารถควบคุมได้โดยการโด๊ป (Dope) สารเจือมาเนียม (Germanium) ฟอสฟอรัส (Phosphorous)



รูปที่ 2.18 แสดงพื้นที่หน้าตัดของ Multimode Graded-Index Fiber

2.5 อุปกรณ์กำเนิดแสง (LIGHT SOURCE)

ในระบบการสื่อสารเส้นใยนำแสง ลำแสงที่กำเนิดจากแหล่งกำเนิดแสง (Light Source) จะเป็นตัวพาข่าวสารไปยังปลายทาง Laser Diode และ LED จะเป็นอุปกรณ์กำเนิดแสงที่นิยมใช้กันมากที่สุดเนื่องจาก LED มีความเป็นเชิงเส้น (Linearity) มากกว่า จึงเหมาะสมที่จะใช้ในการสื่อสารแบบอนาล็อกที่ใช้ระยะทางไม่มากและไม่ต้องการ Optical Power มากนัก ส่วน Laser Diode จะไม่เป็นเชิงเส้นจึงเหมาะที่จะใช้ในการส่งแบบดิจิทัล ใช้ระยะทางไกล อัตรา

การส่งข้อมูลและต้องการ Optical Power สูง แต่อย่างไรก็ตามในโครงการพิเศษนี้เป็นการเลือกส่งแบบอนาล็อกจึงเลือกใช้ LED เป็นอุปกรณ์กำเนิดแสง และเพื่อให้เข้าใจในทฤษฎีของการเปล่งแสงของ LED และ Laser ซึ่งทั้งสองเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงเราจะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของการเปล่งแสงก่อน

2.5.1 หลักการพื้นฐานของการเปล่งแสง

อะตอม โมเลกุลและผลึกของเซมิคอนดักเตอร์ จะดูดกลืนและปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งอยู่ในรูปของแสง จากทฤษฎีควอนตัมกล่าวถึง พลังงานในอะตอมซึ่งแบ่งเป็นระดับชั้นของพลังงานที่เรียกว่าควอนไทซ์เลเวล (Quantize Level) เมื่ออิเล็กตรอนถูกทำให้เลื่อนขึ้นพลังงานจาก E_1 ไป E_2 พลังงานที่ปล่อยออกมาจะเป็นในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานเท่ากับ $E_2 - E_1$ (พลังงานที่ปล่อยออกมาอาจจะอยู่ในรูปอื่นอีกด้วย เช่น ความร้อน)

$$\text{และจาก } E = hf = hc/\lambda ; h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ (j-s) } \dots \dots \dots (2.12)$$

ซึ่งเราเรียกสมการข้างบนว่าสมการของบอร์ (Borh's)

มีอยู่ 2 วิธี ที่อะตอม โมเลกุลและผลึกเซมิคอนดักเตอร์ สามารถดูดกลืนและเปล่งพลังงานออกมาซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน

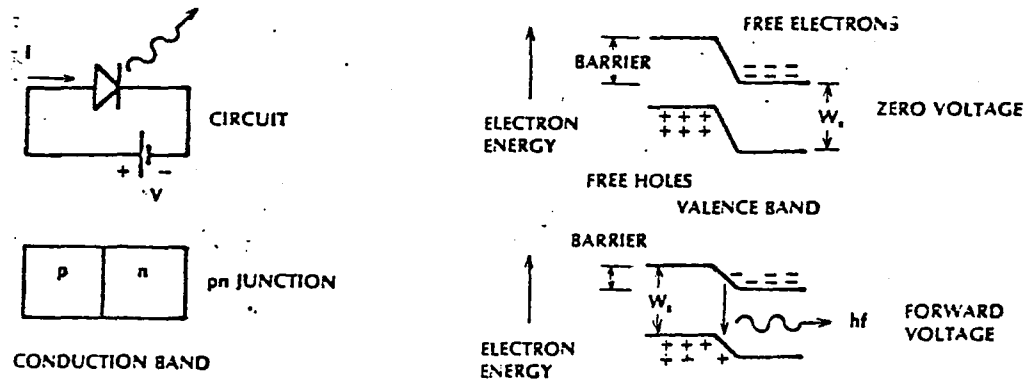
1. เมื่ออะตอมอยู่ในระดับชั้นพลังงานที่ 2 เมื่อลดระดับลงมาอยู่ที่ชั้นที่ 1 ทำให้เปล่งแสงที่มีความถี่ f_0 ซึ่งเกิดได้โดยไม่มีพลังงาน (แสง) มากระตุ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า สปอนตาเนียสอีมิสชัน (Spontaneous Emission)
2. เกิดเมื่อแสงที่มีความถี่ f_0 หรือใกล้เคียงกับ f_0 จากภายนอกที่มีพลังงานเท่ากับผลต่างของชั้นพลังงาน ตกกระทบอะตอมหรือโมเลกุล ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับ 1 ไประดับ 2 เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า เรโซแนนท์ แอ็บซอร์ปชัน (Resonant Absorbsion)

นอกจากนี้ยังสามารถเกิดได้อีกแบบหนึ่งคือ อิเล็กตรอนครึ่งแรกอยู่บนระดับที่ 2 เมื่อถูกกระตุ้นด้วยพลังงานโฟตอน ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการคายพลังงานออกมาและไปกระตุ้นอิเล็กตรอนตัวอื่นอีกที่อยู่ในระดับที่ 2 ซึ่งจะทำให้เกิดการคายพลังงานออกมาจำนวนมากอยู่ในรูปของแสงที่มีเฟสและความถี่เดียวกัน ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า สติมูเลตอิมิสชัน (Stimulated Emission) ซึ่งปรากฏการณ์นี้เป็นหลักการพื้นฐานของการเกิดเลเซอร์

2.5.2 แอลอีดี (LIGTH EMITTING DIODE ; LED)

LED เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด PN-junction ซึ่งจะให้แสงออกมาเมื่อทำการให้ไบแอสตรง

(Forward bias) ดังรูป 2.19 จากรูป 2.19 แสดง Junction และ แถบพลังงานของ Diode ซึ่งแถบพลังงานทั้ง 2 จะถูกแบ่งโดย Forbidden Band หรือ Bandgap ซึ่งมีพลังงาน E_0 ในระดับพลังงานด้านบนเรียกว่า แถบความนำ (Conduction Band) ซึ่งอิเล็กตรอนอิสระ สามารถเคลื่อนที่ได้ และระดับพลังงานด้านล่างเรียกว่า แถบวาเลนซ์ (Valence Band) ซึ่งโฮล สามารถเคลื่อนที่ได้



รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะของ LED และระดับพลังงาน

สารกึ่งตัวนำชนิด N-TYPE จะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระอยู่มาก และสารกึ่งตัวนำชนิด P-TYPE จะมีโฮลอิสระอยู่มากเมื่อนำสารทั้ง 2 มาวางเข้าไว้ด้วยกันจะทำให้เกิด Energy Barrier อิเล็กตรอนอิสระในบริเวณ N-junction จะไม่มีพลังงานเพียงพอที่จะข้าม Energy Barrier ไปยัง P-junction ได้ ในกรณีของโฮลอิสระใน P-junction ก็เช่นกัน เมื่อเราไม่มีการป้อนศักย์ให้กับไดโอด ก็จะไม่มีการเคลื่อนที่ของประจุภายใน PN-junction แต่ถ้าเราป้อนโวลเตจให้กับไดโอดโดยให้ไบแอสตรง จะไปลด Energy Barrier เพิ่มพลังงานศักย์ให้กับทางด้าน N และลดระดับพลังงานศักย์ทางด้าน P ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระจะมีพลังงานเพียงพอในการเคลื่อนที่ผ่าน Junction Region เมื่ออิเล็กตรอนอิสระรวมกับโฮลอิสระ อิเล็กตรอนจะตกลงในแถบวาเลนซ์และรวมกับโฮล การรวมกันของอิเล็กตรอนกับโฮลจะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานแสงออกมา (Optical Power) ซึ่งมีความสัมพันธ์ของ Photon Energy กับความถี่แสง ดังสมการที่ 2.13

$$E_0 = hf$$

$$= hc/\lambda \dots\dots\dots (2.13)$$

สมการนี้ค่าของ E_0 (Energy Gap) มีหน่วยเป็น Joule ความยาวคลื่นมีหน่วยเป็นเมตร

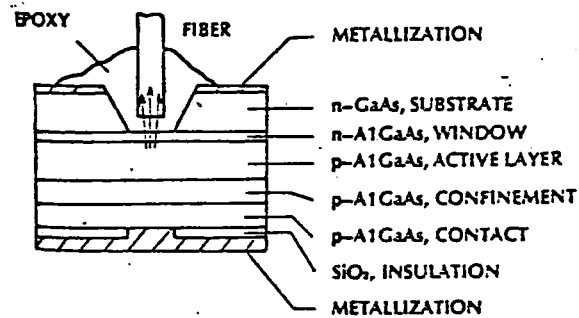
วัสดุและโลหะผสมที่ต่างกันจะให้ค่าของ Bandgap Energy ที่ต่างกัน ตาราง 2.1 แสดงความยาวคลื่นที่เปล่งออกมาจากสารประกอบเซมิคอนดักเตอร์ และค่าประมาณของ Bandgap Energy จากตารางที่ 2.1 สารซิลิกอนจะไม่มี เพราะไฮโดรเจนและอิเล็กตรอนไม่สามารถรวมกันได้โดยตรงทำให้จัดเป็นสาร Inefficient Emitter

Material	Wavelength Range (μm)	Bandgap Energy (eV)
GaAs	0.9	1.4
AlGaAs	0.8-0.9	1.4-1.55
InGaAs	1.0-1.3	0.95-1.24
InGaAsP	0.9-1.7	0.73-1.35

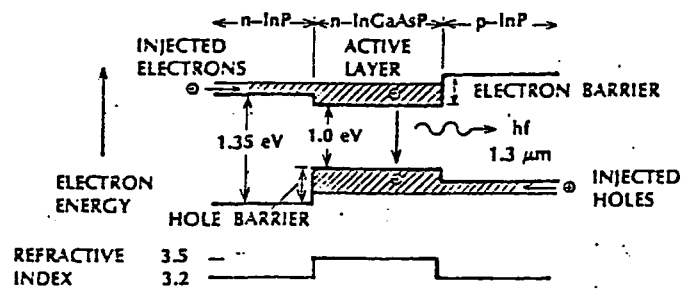
ตารางที่ 2.1 แสดงชนิดของสารกึ่งตัวนำที่ให้ค่าความยาวคลื่นออกมา และค่าของ Energy Bandgap

เราสามารถเลือกค่าความยาวคลื่นของสาร AlGaAs, InGaAs และสาร GaAsP ได้โดยการเปลี่ยนสัดส่วนขององค์ประกอบของอะตอม (Constituent Atom) ซึ่งจะทำให้ Bandgap Energy เปลี่ยนไปมีผลทำให้ความยาวคลื่นเปลี่ยนด้วยจากที่กล่าวมาเป็นตัวอย่างของ Homo Junction ซึ่งใช้สารกึ่งตัวนำชนิด PN-junction ขึ้นเดียว ลักษณะของ Homo Junction การปลดปล่อยจะไม่ได้ กล่าวคือ พลังงานโฟตอนจะแผ่รังสีออกมาจากรอยต่อและพื้นผิวระนาบของมัน ทำให้มีพื้นที่ในการปลดปล่อยแสงที่กว้างมาก ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อ (Coupling) กับเส้นใยนำแสงที่มีขนาดเล็กได้ไม่ดี จากเหตุผลเหล่านี้จึงได้ปรับปรุงโดยตรง สร้างรอยต่อ PN-junction ให้มีพื้นที่สัมผัสกันมากขึ้น เพื่อจะให้มีการรวมกันของอิเล็กตรอนกับโฮลมากขึ้นหลังจากที่มีการปลดปล่อยพลังงาน Photon ออกมาโดยจำกัดที่แคบลงซึ่งเป็นหลักการของการสร้าง Hetero Junction ซึ่งเป็นรอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่ไม่ใช่ชนิดเดียวกัน วัสดุทั้ง 2 จะมีความแตกต่างของ Bandgap Energy และมีดัชนีหักเหต่างกัน การเปลี่ยนแปลงของ Bandgap Energy จะทำให้เกิด Potential Barrier ระหว่างโฮลกับอิเล็กตรอน ประจุนประจุรวมตัวกันขึ้นใหม่ในขอบเขตแคบ ๆ ของ Active Layer เพราะบริเวณ Active Layer จะมีดัชนีหักเหสูงกว่าวัสดุที่อยู่อีกด้านหนึ่งของมุมวิกฤตทำให้เกิดโฟตอนบางตัวในบริเวณของ Active Layer ซึ่งเป็นพื้นที่เล็ก ๆ ที่มีความเข้มของแสงสูง การปลดปล่อยแสงออกมาในบริเวณจำกัดนี้ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการ Coupling ซึ่งในทางปฏิบัติใช้กับเส้นใยนำแสงขนาดเล็กซึ่ง Power จะถูก Coupling จากผิวหน้าของระบบของชั้นที่มีการปลดปล่อยแสง หรือ จากขอบของชั้นผิวหน้าที่มีการ Coupling

เรียกว่า Burrus หรือ Etched-Well ดังแสดงในรูป 2.20

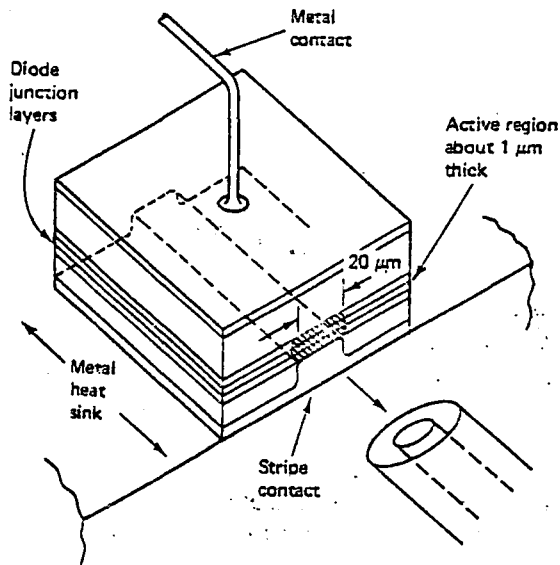


รูปที่ 2.20(a) แสดงชั้นต่าง ๆ ของอุปกรณ์กำเนิดแสงที่ปล่อยแสงออกมาจากผิวหน้า เรียกว่า Burrus หรือ Etched-Well



รูปที่ 2.20(b) โครงสร้างของ LED แบบ Burrus

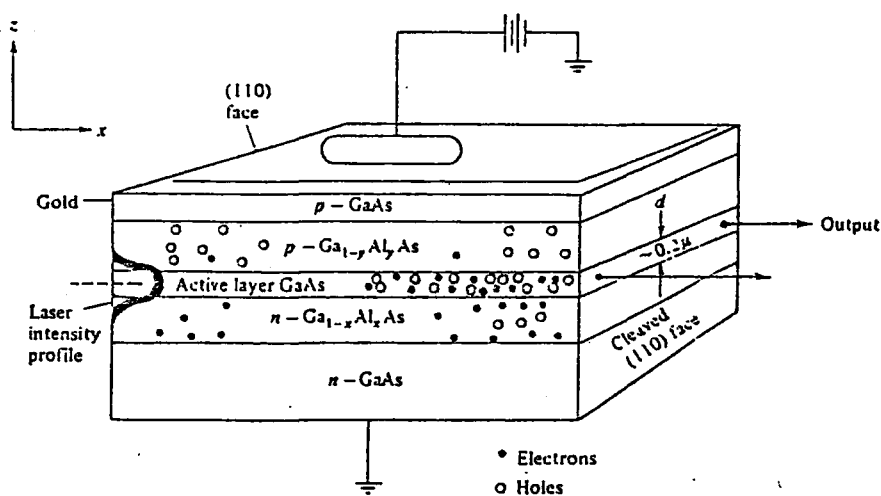
ส่วนโครงสร้างของ LED อีกแบบหนึ่งที่นิยมใช้กัน คือแบบ Edge หรือ Side Emitting Diode ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.21 LED ชนิด Edge Emitting จะมี Layers Channel ที่เป็นตัวนำแสง (ปล่อยแสง) ไปยัง Core ของเส้นใยนำแสง ซึ่งจะให้ลำแสงออกมาแคบกว่าแบบ Burrus ซึ่งทำให้สามารถลดการสูญเสียของ ค่านิวเมอร์ริคัล อะเพอเจอร์ (NA) ได้มากขึ้น ความหนาของ Junction ปกติแล้วจะมีค่าประมาณ 1 หรือ 2 μ m ผิวสัมผัสสตริป (Stripe Contact) จะจำกัดความกว้างของ Active Area ให้มีค่าประมาณ 10-20 μ m ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าขนาดของ Core และจากหลักการนี้ทำให้ LED แบบ Edge-Emitting มีค่ากำลังเอาต์พุตทางแสงมากกว่าแบบ Burrus 3-7 เท่า



รูปที่ 2.21 แสดง LED แบบ Edge-Emitting

2.5.3 เลเซอร์ไดโอด

เลเซอร์ไดโอด เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทเดียวกับไดโอด แต่ถูกออกแบบให้สามารถเปล่งแสงเลเซอร์ออกมาได้ ลักษณะของแสงเลเซอร์เป็นแสงที่เป็นระเบียบ มีทิศทางการพุ่งของแสงไปในทางเดียวกันและมีเฟสตรงกันทำให้มีความเข้มแสงสูงมาก ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของเลเซอร์ไดโอดแสดงดังรูปที่ 2.22 ซึ่งประกอบด้วยสารแบบเดียวกับที่ใช้ทำ LED ดังกล่าวมาแล้วตอนต้น แต่ที่ปลายทั้งสองด้านจะถูกเคลือบด้วยสารที่ทำหน้าที่เสมือนกระจกเงา



รูปที่ 2.22 แสดงลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของเลเซอร์ไดโอด

เมื่อมีการไบแอสที่เหมาะสมทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของโฟตอนในระหว่าง Depletion Zone เมื่อโฟตอนเคลื่อนที่ไปกระทบโฟตอนตัวอื่น จะมีการถ่ายเทพลังงาน ทำให้เกิดมีโฟตอนตัวใหม่เพิ่มขึ้นมากมายและสะท้อนกลับไปกลับมาบริเวณรอยต่อ อันเนื่องมาจากกระจกเงาที่ปลายทั้งสอง พฤติกรรมเช่นนี้ทำให้เกิดการสะสมพลังงานภายในมากขึ้นอย่าง เป็นระเบียบเมื่อพลังงานมีค่ามากพอจะพุ่งทะลุกระจกเงาด้านหนึ่งออกมาเป็นแสงเลเซอร์

หลักการทํางานที่กล่าวมานี้ เป็นเพียงแนวทางการเกิดแสงเลเซอร์อย่างคร่าว ๆ เท่านั้น การไบแอสเลเซอร์ไดโอดให้ทํางานจนเปล่งแสงเลเซอร์ออกมาได้ ขึ้นอยู่กับค่าของกระแสที่ป้อนให้กับตัวมัน โดยจะต้องมีค่าสูงกว่าค่ากระแสเทรชโฮลด์ (I_{th}) ที่กำหนดตามสเป็คของมัน หากกระแสไบแอสมีค่าต่ำกว่ากระแสเทรชโฮลด์ เลเซอร์ไดโอดยังคงทํางานอยู่ แต่แสงที่เปล่งออกมาจะมีลักษณะสะเปะสะปะคล้ายกับการเปล่งแสงของ LED ธรรมดา

ในอดีต กระแสเทรชโฮลด์ของเลเซอร์ไดโอดมีค่าสูงมาก ทำให้การใช้งานเลเซอร์ไดโอดถูกจำกัดในวงแคบ เพราะต้องออกแบบวงจรที่ค่อนข้างยุ่งยาก แต่ในปัจจุบันเลเซอร์ไดโอดถูกออกแบบให้ใช้กระแสเทรชโฮลด์ไม่กัมีลลิแอมป์ ทำให้สามารถสร้างวงจรขับ (Driver) ขึ้นมาได้งาย

2.5.4 คุณสมบัติอื่น ๆ ของแหล่งกำเนิดแสง

แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ จะต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้อยู่ในระบบทางแสง ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญมาก สำหรับคุณสมบัติที่ต้องการของแหล่งกำเนิดแสงในการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงจำเป็นต้องมีคุณสมบัติดังนี้

1. สามารถให้แสงที่มีพลังงานความเข้มแสงมากพอที่จะส่งสัญญาณ หรือเดินทางไปได้ตลอดระยะทางของการสื่อสารได้
2. โครงสร้างของแหล่งกำเนิดแสง ต้องสามารถส่งพลังงานแสงส่วนใหญ่หรือทั้งหมดเข้าไปในเส้นใยแสงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็กได้ นั่นคือ มุมของการเกิดแสงจากแหล่งกำเนิดต้องเป็นมุมแคบ ๆ และมีทิศทางที่แน่นอน ในกรณีที่แสงจากแหล่งกำเนิด มีลักษณะกระจายเป็นมุมกว้าง สามารถใช้อุปกรณ์คัปปลิง (Coupling) แสง เช่น เลนส์นูนเข้ามาช่วย เพื่อรวมแสงส่วนใหญ่พุ่งเข้าสู่เส้นใยนำแสงได้
3. ความยาวคลื่นแสงที่ได้ต้องมีความเหมาะสมกับเส้นใยนำแสงที่ใช้ในระบบสื่อสารใยแสง ความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับเส้นใยนำแสงมากที่สุด คือ $1.55 \mu m$ รองลงมาได้แก่ $1.3 \mu m$ และ $0.85 \mu m$
4. ไลน์วิดท์ (Line Width) ของแสงที่ได้จะต้องมีค่าน้อย ๆ เพื่อให้สามารถส่งข้อมูลปริมาณ

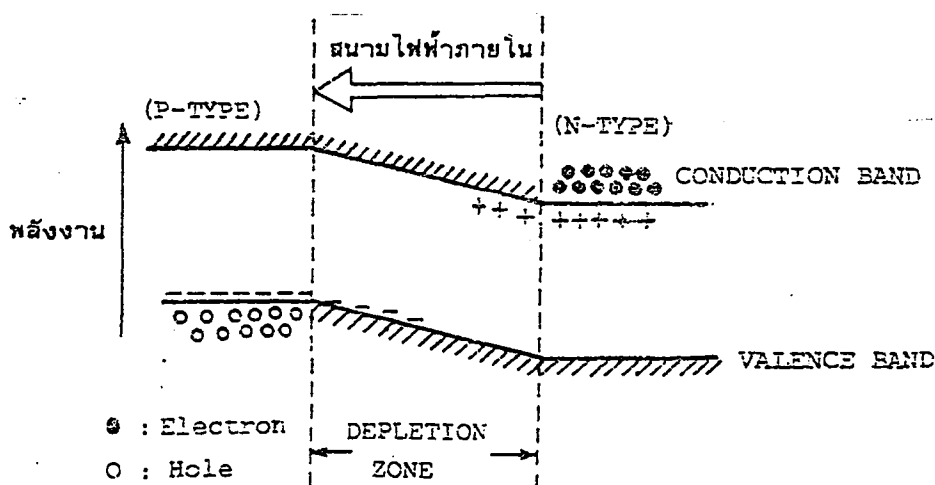
มาก ๆ ได้

5. ช่วงเวลาตอบสนองของแหล่งกำเนิดแสง หรือ ช่วงเวลาที่แหล่งกำเนิดแสงได้รับสัญญาณไฟฟ้า แล้วสร้างสัญญาณแสงออกมาต้องมีค่าน้อยมาก ๆ
6. พลังงานแสงต้องมีค่าคงที่ต่อเนื่องตลอดเวลา และไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ อันเนื่องมาจากผลของอุณหภูมิ และสภาพแวดล้อม

2.6 อุปกรณ์รับแสง (PHOTO DETECTOR)

อุปกรณ์รับแสงเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้ โดยให้ขบวนการดูดพลังงาน นั่นคือ เมื่อมีแสงมากระทบสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนอยู่ใน Valence Band จะเคลื่อนขึ้นไปอยู่ที่ Conduction Band แต่การเคลื่อนขึ้นไปเป็นแค่เพียงอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปเท่านั้น และมันจะไปรวมตัวกับโฮลใน Valence Band อีก ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photo Electric Effect) เกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้เพื่อที่จะเปลี่ยนแปลงให้เป็นไฟฟ้าจะต้องใช้สภาพการแยกกันของอิเล็กตรอนกับโฮล ก่อนที่มันจะรวมตัวกัน

สำหรับอุปกรณ์รับแสงสารกึ่งตัวนำ ก็เช่นเดียวกันกับอุปกรณ์รับแสง นั่นคือเพื่อที่จะแยกอิเล็กตรอนกับโฮลนั้น โดยทั่วไปจะให้ PN-junction โดยที่รอยต่อของ P-N นั้น จะเกิดสนามไฟฟ้า (Space Electric Field) ขึ้นมา แต่มันจะถูกดึงด้วย อิเล็กตรอนของ N-TYPE และโฮลของ P-TYPE ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็น - และ + เป็นผลให้เกิดบริเวณที่ไม่มีอิเล็กตรอนและโฮลขึ้นตรงรอยต่อ บริเวณนี้เรียกว่า ดินลึกลับ (Depletion Zone) ดังแสดงในรูป 2.23

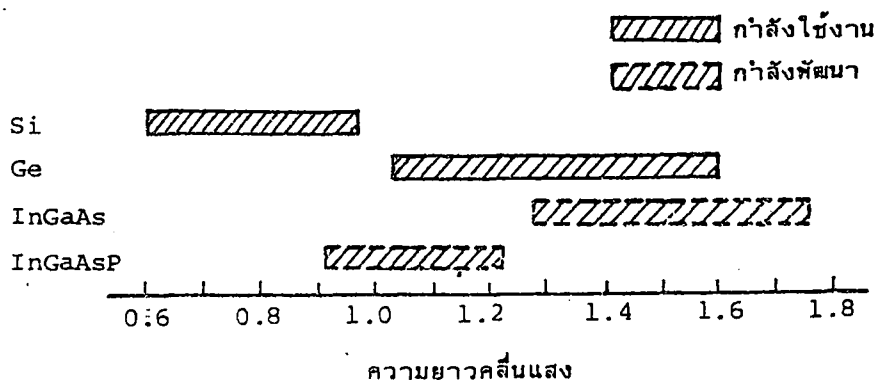


รูป 2.23 แสดง Depletion Zone

ในสภาพอย่างนี้ เมื่อมีแสงมากระทบจากทางด้านบริเวณ P-TYPE แสงนั้นจะถูกดูดซับพร้อมทั้งเคลื่อนที่ไปทางบริเวณ N-TYPE แต่ที่ Depletion Zone อิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากการดูดซับพลังงานแสงจะถูก Space Electric Field แยกไปในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคืออิเล็กตรอนไปทางด้าน N และโฮลไปทางด้าน P อนึ่งที่บริเวณซึ่งอยู่ห่างจาก Depletion Zone นั้น เนื่องจากไม่มีสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจาก Photo Electric Effect จะรวมตัวกันใหม่ในระหว่างเคลื่อนที่ แต่สำหรับอิเล็กตรอนและโฮล ที่เคลื่อนที่เข้าไปใน Space Electric Field แล้วนั้น จะสามารถเข้าไปยังบริเวณตรงกันข้ามกันได้ ผลที่ได้คือจะเกิดแรงดันไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนกับปริมาณของอิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกแยกกันระหว่างปลายทั้ง 2 ของ P-TYPE และ N-TYPE ถ้าหากนำวงจรรายนอกมาต่อกับปลายทั้ง 2 นี้ จะทำให้อิเล็กตรอนและโฮลสามารถรวมตัวกันได้โดยผ่านวงจรรายนอก นั่นคือมีกระแสไหลนั่นเอง กระแสที่เกิดขึ้นที่ Depletion Zone เรียกว่า Drift Current ส่วนกระแสที่เกิดตรงบริเวณที่อยู่ห่างจาก Depletion Zone เรียกว่า Diffusion Current และกระแสนี้เป็นหลักการของการเปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้า

2.6.1 สารที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์รับแสง

สำหรับอุปกรณ์รับแสงก็เช่นเดียวกันกับอุปกรณ์กำเนิดแสงนั้นคือมีสารหลายชนิดนอกจากนั้นผลต่างของพลังงานของ Conduction Band และ Valence Band ของอุปกรณ์รับแสงมีค่าแตกต่างกัน ทำให้มีอำนาจความยาวคลื่นต่างกันที่ดูดกลืนแสงที่เข้ามาได้ง่าย (ความไวในการรับแสงคือ) คุณสมบัติความไวในการรับแสงของสารแต่ละชนิดแสดงดังรูปที่ 2.24



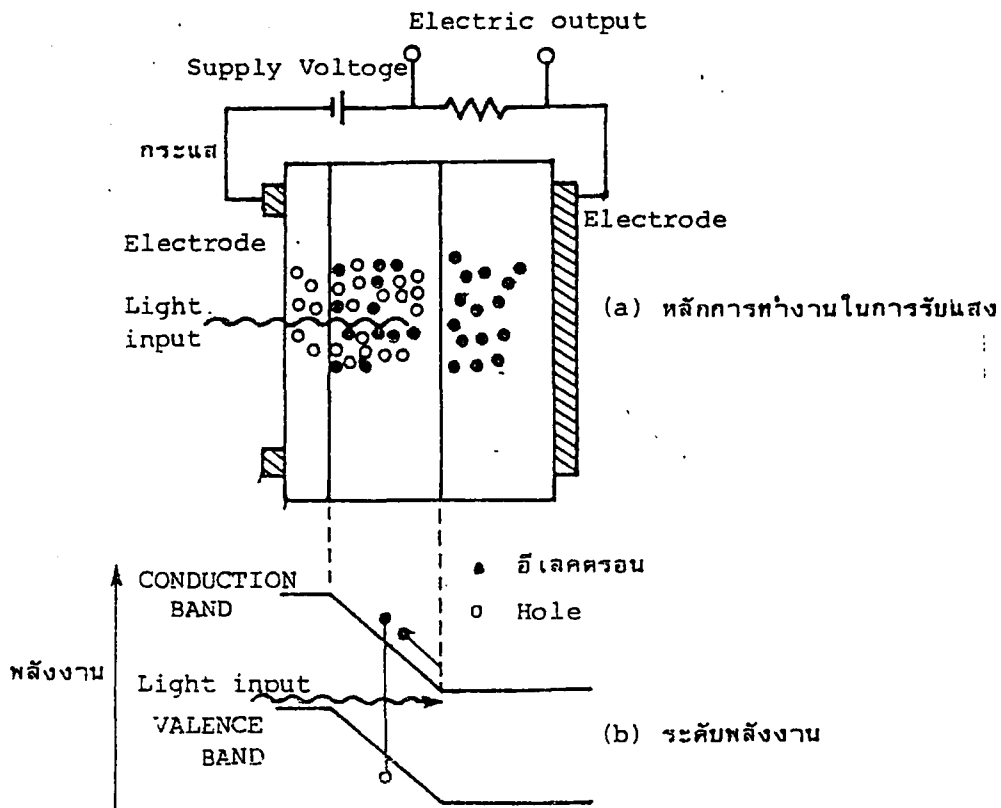
รูปที่ 2.24 แสดงความยาวคลื่นในการรับแสงของอุปกรณ์รับแสงแต่ละชนิด

2.6.2 โครงสร้างของอุปกรณ์รับแสง

ในหัวข้อที่แล้วได้กล่าวถึง Space Electric Field ตรงรอยต่อ PN ที่ทำให้อิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้ามแต่ถ้าให้แรงดันไฟฟ้ากลับทิศทางจากภายนอก (Reverse Bias) จะทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลตรงรอยต่อมีอัตราเร่งเพิ่มขึ้น

อุปกรณ์รับแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำนี้แบ่งออกเป็นพวกใหญ่ ๆ ได้ 2 พวก ตามปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้จากภายนอก คือ

2.6.3 PHOTO DIODE : PD

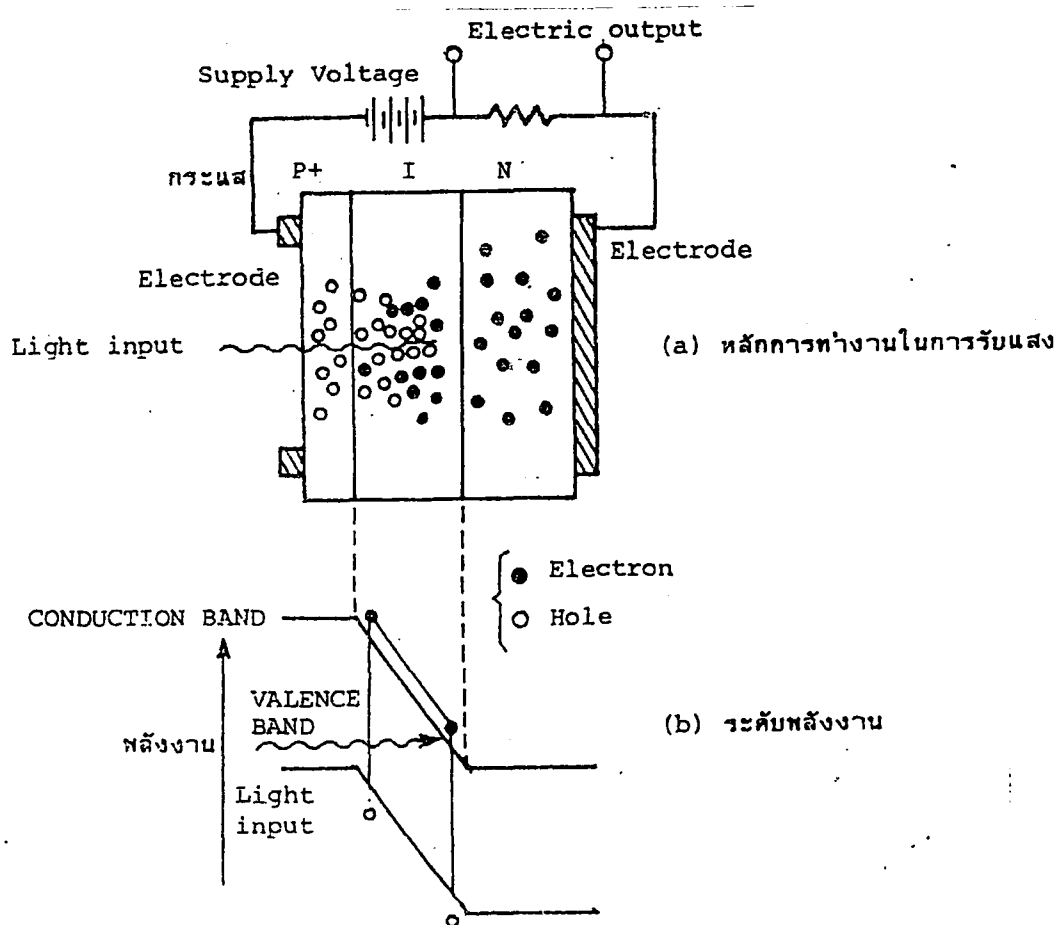


รูปที่ 2.25 แสดงหลักการทํางานรับแสงและระดับพลังงานของ PIN-PD

PD เป็นพวกที่ได้รับการป้อนแรงดันไฟฟ้าปริมาณน้อย ตัวอย่างของ PD คือ PIN-PD ดังแสดงในรูป 2.25 PIN หมายถึง ในระหว่างสารกึ่งตัวนำ P-TYPE และ N-PYPE มีสารกึ่งตัวนำแบบ Intrinsic (I) คั่นอยู่ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า Drift Current นั้นเกิดขึ้นใน Depletion Zone และผลของสนามไฟฟ้าทำให้มีการตอบสนองเร็ว แต่ในทางตรงกันข้าม Diffusion Current ที่เกิดขึ้นภายนอก Depletion Zone นั้นมีการตอบสนองช้า ดังนั้นถ้าความ

กว้างของ Depletion Zone ซึ่งมีความกว้างมากเท่าใด Quantum Efficiency และความ
เร็วของการตอบสนองความถี่ยิ่งดีขึ้น ความกว้างของ Depletion Zone นี้ถ้าความหนาแน่นของ
อิเล็กตรอนและโฮลของ P และ N ยิ่งต่ำจะยิ่งกว้างดังนั้นสารกึ่งตัวนำแบบ I ที่คั่นกลางระหว่าง
กับ N จึงมีหน้าที่เพื่อทำให้ความกว้างของ Depletion Zone กว้างขึ้นนั่นเอง เนื่องจาก PD
ที่ใช้ในระบบการสื่อสารนั้นโดยทั่วไป ต้องการความเร็วในการตอบสนองสูง ดังนั้นส่วนใหญ่จะใช้
PIN-PD

2.6.4 AVALANCHE PHOTO DIODE : APD



รูปที่ 2.26 แสดงหลักการทำงานรับแสงและระดับพลังงานของ APD

APD นั้นใช้ปฏิกิริยาการขยาย Avalanche ของอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำ เมื่อ
เปรียบเทียบกับ PD แล้ว APD เป็นอุปกรณ์รับแสงที่ให้กระแสจำนวนมาก หลักการทำงานของ
APD แสดงดังรูป 2.26 สำหรับโครงสร้างนั้นส่วนใหญ่ทางด้าน P ของ PN-junction จะมีสาร
กึ่งตัวนำแบบ P-TYPE ที่มีความหนาแน่นของโฮลสูง (P+ ในรูป) โดยการทำเช่นนี้จะทำให้สนาม

ไฟฟ้าภายในของบริเวณใกล้เคียง ๆ รอยต่อที่มี P-LAYER เป็นศูนย์กลางมีค่ามาก อิเล็กตรอนที่ดูดแสงที่มาจากกระทบจากด้าน P+ และถูกกระตุ้นจาก Valence Band ไปยัง Conduction Band ในระหว่างที่มันได้รับอัตราเร่งและผ่าน P-LAYER นั้นมันจะได้รับพลังงานจำนวนมากกว่าผลต่างของพลังงานของ Conduction Band กับ Valence Band จากผลนี้ทำให้สามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนที่อยู่ใน Valence Band และทำให้เกิดอิเล็กตรอนกับโฮลใหม่ได้ และอิเล็กตรอนกับโฮลใหม่นี้ยังถูกสนามไฟฟ้าเร่งอัตราเร่งให้อีก ทำให้เกิดอิเล็กตรอนกับโฮลใหม่ออกมาอีก เมื่อขบวนการนี้เกิดอย่างต่อเนื่องกัน จำนวนของอิเล็กตรอนกับโฮลจะเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากมาย เป็นผลให้เกิดการขยายที่เรียกว่า Avalanche Multiplication ผลนี้ทำให้กระแสถูกขยายนั่นเอง

2.6.5 คุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง

ประสิทธิภาพของอุปกรณ์รับแสงประเมินจากคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ Quantum Efficiency ซึ่งแสดงว่าแสงที่รับมานั้นถูกเปลี่ยนเป็นไฟฟ้าได้มากเท่าไร ความไวการรับแสง (ระดับแสงต่ำสุดที่ต้องการสำหรับการส่งที่มีคุณภาพ) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการออกแบบระยะเวลาการถ่ายทอดของระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสง สัญญาณรบกวน (Noise) ที่เกิดขึ้น และความเร็วของการตอบสนองการทำงาน สำหรับ Quantum Efficiency กำหนดจากสารและโครงสร้างของอุปกรณ์รับแสง แต่สำหรับความไวการรับแสงนั้นจะเกี่ยวข้องกับขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้

เนื่องจาก APD ใช้ปรากฏการณ์การขยาย Avalanche ตามที่กล่าวมาแล้วในตอนต้นดังนั้นจึงมีความไวสูงประมาณ 10-20 dB (10-100 เท่า) เมื่อเทียบกับ PD สัญญาณรบกวน (Noise) ที่เกิดในอุปกรณ์รับแสงมีสิ่งที่เรียกว่า Shot Noise ซึ่งเป็น Noise อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของ Photo Current ที่เกิดจากการกระตุ้นอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบทางเวลาหรือทาง Space คุณสมบัติของ Shot Noise เป็นดังแสดงในสมการต่อไปนี้

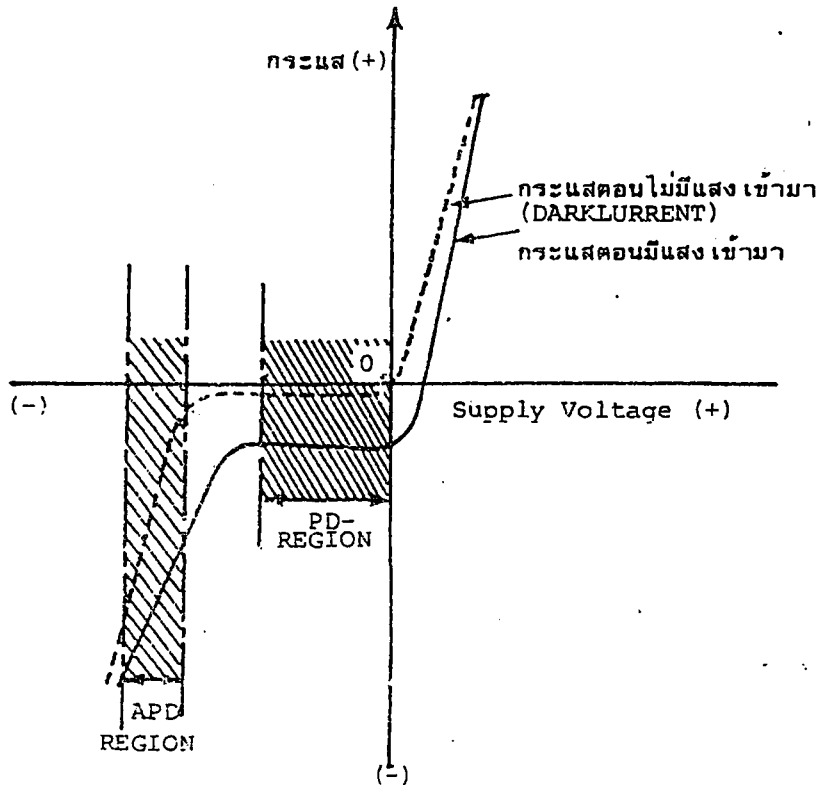
$$\text{Shot Noise Current} \propto I_0 M^{2+F} \dots\dots\dots(2.14)$$

- ในที่นี้
- M เป็นอัตราขยายกระแสของอุปกรณ์รับแสง
 - I_0 เป็น Photo Current เมื่อ $M=1$ (กรณีของ PD)
 - F เป็น Excess Noise Figure มีค่ามากเมื่อเทียบกับ M

นั่นคือ จากสมการจะเห็นว่าที่ระดับการรับแสงเท่ากัน ถ้าหากทำให้แรงดันไฟฟ้าในทิศทางกลับที่ป้อนให้มีค่าสูงและทำให้อัตราการขยายกระแสเพิ่มมากขึ้นนั้น สัญญาณออก (Output Signal, $I_0 M^2$) จะเพิ่มมากขึ้นด้วยแต่ Shot Noise ก็เพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน

คุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสงทั่วไปแสดงดังรูป 2.27 จากรูปจะช่วยทำให้เข้าใจความแตกต่าง

ของบริเวณการทำงานของ APD และ PD ได้ดี และในรูป 2.27 นี้ ได้แสดงการไหลของกระแสที่เรียกว่า Dark Current ที่เกิดในสภาพที่มีแรงดันไฟฟ้าในทิศทางกลับป้อนให้แต่ไม่มีแสงเข้ามาด้วย



รูป 2.27 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้และ Photo Current

กระแส Dark Current นี้ มีลักษณะพิเศษคือ มันจะเพิ่มขึ้นเร็วกว่าการเพิ่มขึ้นของสัญญาณออก (Output Signal) Shot Noise เป็นสิ่งที่เกิดจาก Dark Current และอื่น ๆ ที่เป็นแหล่งต้นกำเนิด กรณีของ PD เนื่องจาก $M=1$ ดังนั้น Shot Noise จึงไม่มีค่ามากแต่สำหรับกรณีของ APD จำเป็นต้องระวังเกี่ยวกับค่าของ M

ในการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสง นอกจากจะต้องคำนึงถึง Shot Noise นี้แล้วยังมี Thermal Noise ที่เกิดในวงจรไฟฟ้าซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับสัญญาณแสงที่เข้ามา ดังนั้นในการออกแบบระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแสง จำเป็นต้องเลือกค่า M ที่เหมาะสมที่ทำให้ผลรวมของ Thermal Noise กับ Shot Noise มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับระดับของสัญญาณ

ความเร็วของการตอบสนองความถี่เป็นสิ่งที่กำหนดจากเวลาที่สัญญาณแสงเข้ามาจนกระทั่งเกิดปรากฏการณ์จุดแสง แต่ในปัจจุบันเนื่องจากทั้ง PD และ APD สามารถตอบสนองความเร็วได้ถึงหลาย GHz จึงไม่มีปัญหาในการใช้งาน การเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของ PD กับ APD

สามารถแสดงได้ดังตาราง 2.2

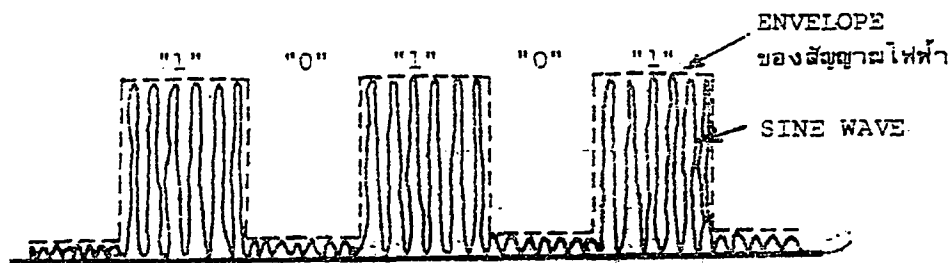
หัวข้อ \ อุปกรณ์รับแสง	PD	APD
QUANTUM EFFICIENCY	~ 80 %	~ 80 %
ความไวการรับแสง (1)	- 15 ~ 20 dBm 0	-30 ~ 40 dBm 0
ความเร็วการตอบสนอง ความถี่	~ หลาย GHz	~ หลาย GHz
อัตราขยาย	1	~ 500
ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ ทำงาน	0 ~ 20 V	30 ~ 200 V

ตาราง 2.2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง

บทที่ 3

การมอดูเลชั่น (MODULATION)

ในปัจจุบันแสงที่ได้จากอุปกรณ์ปล่อยแสงจะมีความยาวคลื่นของแสงจำนวนหนึ่งป็นอยู่ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้แสงเป็นคลื่นพาห้ (Carrier Wave) สำหรับ ฟรีแควนซีมอดูเลชั่น (Frequency Modulation), เฟสมอดูเลชั่น (Phase Modulation) ของสัญญาณไฟฟ้าได้เหมือนอย่างที่ใช้ในการส่งมัลติเพล็กซ์ ในระบบการส่งสัญญาณอนาล็อกของการส่งคลื่นพาห้ (Carrier Transmission), การส่งสัญญาณไมโครเวฟ (Microwave Transmission) ที่ใช้อยู่ทั่วไป แต่จะให้การผสมที่เรียกว่า Intensity Modulation ซึ่งทำการผสมโดยตรงกับความเข้มของแสง ยกตัวอย่างเช่น ในการส่งสัญญาณดิจิทัลรูปคลื่นทางเอาท์พุทที่ได้จะเป็นดังแสดงในรูป 3.1 กล่าวคือแสงจะเกิดการกระทบสว่างและดับตามสัญญาณไฟฟ้าที่เป็น "1" และ "0" ตามลำดับ ตามความเป็นจริงแล้วความยาวคลื่นของสัญญาณแสงจะมีค่าสั้นกว่าความยาวคลื่นของสัญญาณไฟฟ้ามก ดังนั้นใน Envelope "1" ของสัญญาณไฟฟ้าจะมีแสงที่มีความยาวคลื่นหลายค่าอยู่ข้างใน ดังแสดงในรูป 3.1



รูปที่ 3.1 แสดง Intensity Modulation

3.1 รูปแบบของการมอดูเลชั่นแบบอนาล็อก

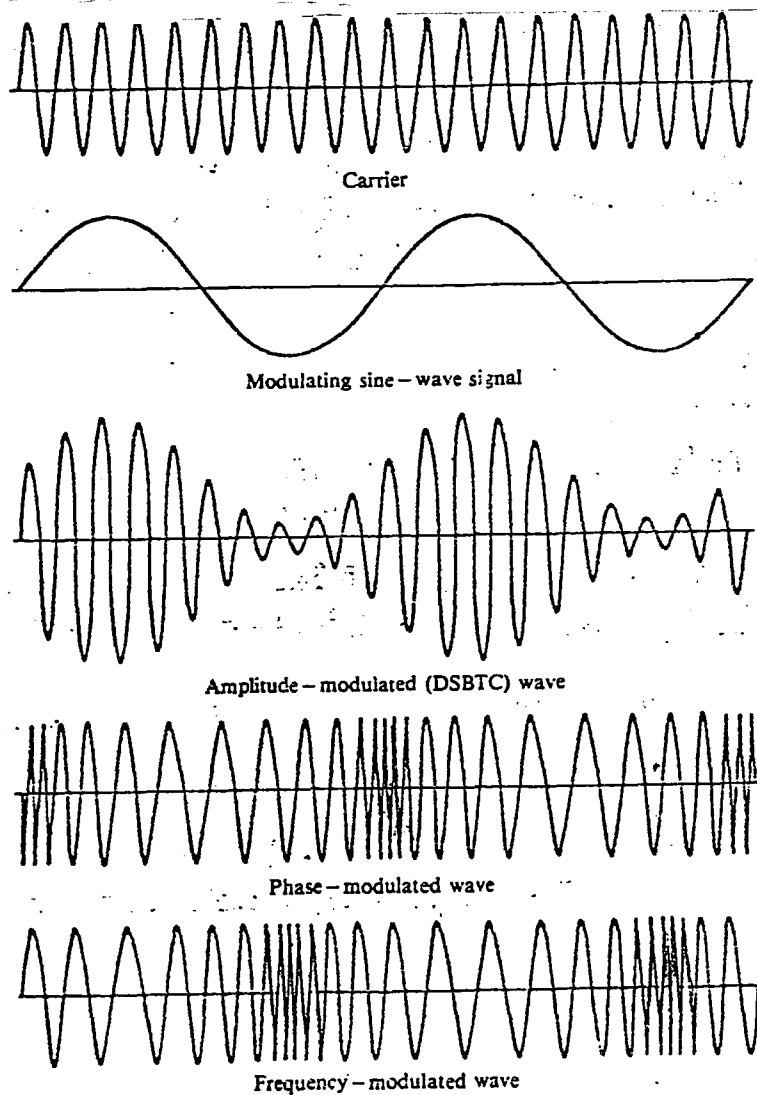
โดยทั่วไปทฤษฎีการมอดูเลตของสัญญาณอนาล็อก (Pre-Modulation) จะมีเทคนิคอยู่ 3 แบบ

3.1.1 แอมพลิจูดมอดูเลชั่น (AM)

เป็นเทคนิคการมอดูเลตสัญญาณเสียงเข้ากับสัญญาณพาห้ (Carrier Signal) ซึ่งเป็นสัญญาณรูปไซน์ (Sine Wave) ที่มีความถี่สูงทำให้สัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตแล้วมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณพาห้ตามแอมพลิจูดของสัญญาณเสียง แต่ความถี่ของสัญญาณพาห้ยังคงที่ ดังรูปที่

3.2

จุดสำคัญของการมอดูเลตชนิดนี้คือที่ "แอมพลิจูดเปลี่ยนแปลง แต่ความถี่คงที่" นอกจากนี้ รายละเอียดอื่น ๆ ของแอมพลิจูดมอดูเลชัน ยังมีอีกมากมายซึ่งไม่อาจจะกล่าวได้หมดในที่นี้ เช่น การใช้เทคนิคของการตัดสัญญาณพาห่อออกไปซึ่งเรียกว่า ซัพเพรสแคเรียร์ (Suppress Carrier) เช่นในระบบการส่งกระจายคลื่นแบบ ดับเบิลไซด์แบนด์ ซัพเพรสแคเรียร์ (Double Sideband Suppress Carrier : DSB-SC) และ ซิงเกิลไซด์แบนด์ ซัพเพรสแคเรียร์ (Single Sideband Suppress Carrier : SSB-SC) ซึ่งเป็นเทคนิคอื่น ๆ ที่ไม่อาจจะกล่าวละเอียดให้หมดในที่นี้ได้



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะสัญญาณตามวิธีของ AM, PM และ FM

3.1.2 ฟรีควเอนซีมอดูเลชัน (FM)

หลักการของการมอดูเลตทางความถี่นี้จุดสำคัญอยู่ที่ "แอมพลิจูดของสัญญาณจะคงที่แต่ความถี่ของสัญญาณพาห์ จะเปลี่ยนแปลงไปตามแอมพลิจูดของสัญญาณที่นำเข้ามามอดูเลต (Modulating Signal)" เมื่อพิจารณาารูปสัญญาณพาห์และรูปสัญญาณข่าวสารที่นำเข้ามามอดูเลต ในขณะที่แอมพลิจูดของสัญญาณอนาล็อกมีค่าเป็นบวก ความถี่ของสัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตจะสูงขึ้น แต่ในขณะที่แอมพลิจูดของสัญญาณอนาล็อกมีค่าเป็นลบ ความถี่ของสัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตจะลดลง

สำหรับเทคนิคของ FM อื่น ๆ ยังมีอีกมากมายเช่นเทคนิคของแนร์โรแบนด์ เอฟเอ็ม (Narrow Band FM : NBFM), วาสด์แบนด์ เอฟเอ็ม (Wide Band FM : WBFM) ฯลฯ ซึ่งจะไม่กล่าวถึงในที่นี้

3.1.3 เฟสมอดูเลชัน (PM)

สัญญาณ PM และ FM จะมีความสัมพันธ์คล้ายคลึงกันมาก เพราะเป็นการมอดูเลตเชิงมุมร่วมกัน สัญญาณ PM คือสัญญาณที่เกิดจากการมอดูเลชันที่เปลี่ยนเฟสของสัญญาณพาห์ตามแอมพลิจูดของสัญญาณข่าวสาร โดยจะมีแอมพลิจูดของสัญญาณพาห์คงที่เสมอดังในรูปที่ 3.2 ซึ่งแสดงรูปคลื่นของ AM, FM และ PM จะเห็นได้ว่าขนาดของสัญญาณ FM และ PM มีค่าคงที่เสมอส่วนความถี่และเฟสจะเปลี่ยนตามสัญญาณข่าวสาร

3.2 วงจร ANALOG MODULATION

Optical Power ที่เกิดจาก LED จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับกระแส Forward Bias ที่ไหลผ่านวงจร ฉะนั้นในวงจร Analog Modulation จะอาศัยกระแสจากสัญญาณที่ต้องการเปลี่ยนเป็นแสงเป็น Forward Driving Current ซึ่งปริมาณ Optical Power Output จะแปรเปลี่ยนตาม Forward Driving Current ของสัญญาณที่ป้อนเข้าไปดังรูป 3.3

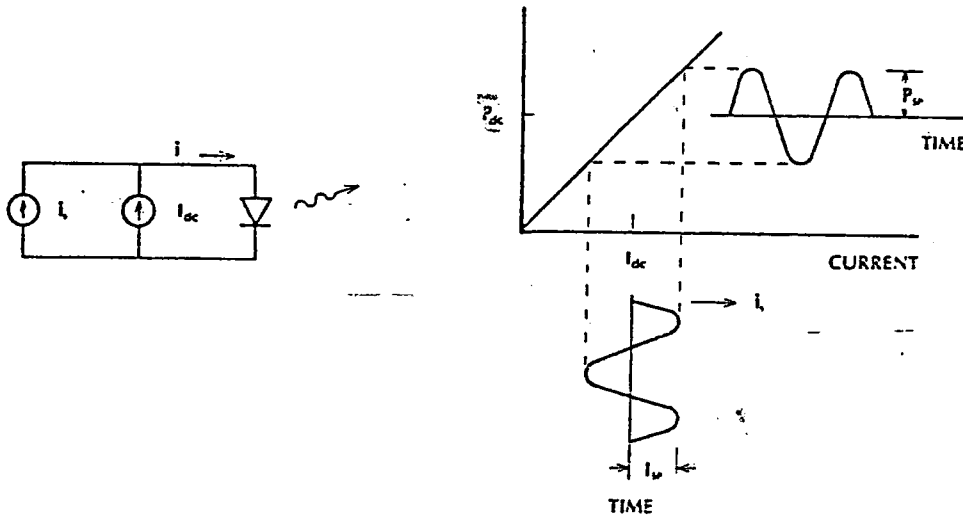
จากรูป 3.3 จะพบว่าโครงสร้างของวงจร Analog Modulation จะต้องมี DC bias เพื่อให้ LED มีการ Forward Bias ตลอดเวลา ถ้าไม่ให้ DC bias ไว้ เมื่อมีสัญญาณที่เป็น Peak ลบเข้ามาจะทำให้สัญญาณถูกขลิบ เพราะสัญญาณช่วงนั้นจะไป Reverse Bias LED ทำให้ LED off ผลรวม ของ Diode Current แสดงในสมการ 3.1

$$I = I_{DC} + I_{AC} \sin \omega t \dots \dots \dots (3.1)$$

ผลรวมของกำลังทางไฟฟ้า ซึ่งมีส่วนสัมพันธ์ในการเกิดกำลังแสง Optical Power แสดงในสมการ 3.2

$$P_o = P_{dc} + P_{av} \sin \omega t \dots\dots\dots(3.2)$$

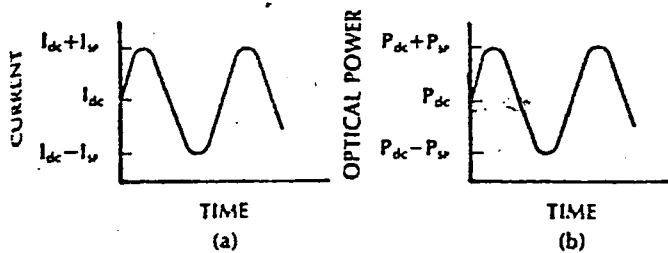
โดย I_{dc} คือ กระแส DC Bias, I_{av} คือ กระแส Signal, P_{dc} คือ Average Power และ P_{av} คือ Peak ที่เกิดจากการมอดูเลตซึ่งเป็นส่วนของ Optical Power



รูปที่ 3.3 แสดงวงจร Analog Modulation

จากสมการ (3.1) และ (3.2) เทอมที่ 2 แทน Information Signal โดยจะนิยามค่าของ Modulation Factor (m') เป็นอัตราส่วนระหว่าง Peak Current ต่อกระแสเฉลี่ยตามสมการ 3.3

$$m' = I_{av} / I_{dc} \dots\dots\dots(3.3)$$



รูปที่ 3.4 (a) แสดงกระแสที่ขับ LED (b) แสดงผลของกำลังแสง

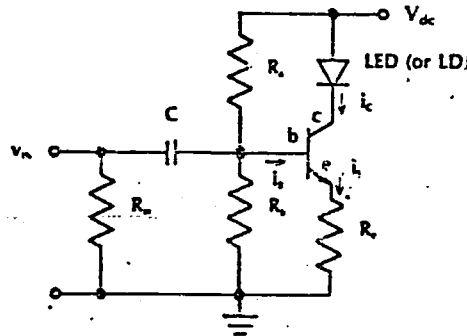
จากรูป 3.4 เพราะผลรวมของ Peak และกระแสต่ำสุด คือ $I_{dc} - I_{av}$ และกระแสสูงสุดคือ $I_{dc} + I_{av}$, I_{av} สามารถที่จะมีค่าสูงสุดได้ถ้า DC bias เป็นครึ่งหนึ่งของกระแสสูงสุดที่ได้อาจมีได้ ถ้าให้ $I_{av} = I_{dc}$ ในกรณีนี้ทำให้ Peak Current คือ $2I_{dc}$ โดยที่ $I_{min} = 0$ ดังนั้นค่า Modulation Factor มีค่าเท่ากับ 1

กำหนดให้ Optical Modulation Factor ; $m' = P_{av} / P_{dc}$

หรือ Optical Power ; $P = P_{dc}(1 + m\cos\omega t)$

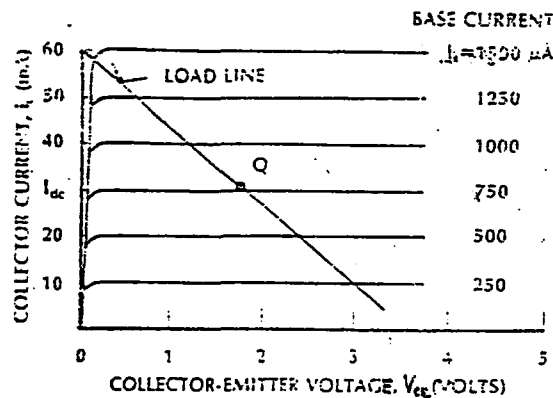
ดังนั้น $m = m' / \sqrt{1 + \omega^2 t^2} \dots\dots\dots(3.4)$

จะเห็นว่า Optic Modulation Factor จะลดลงเมื่อ Modulation Frequency เพิ่มขึ้น และถ้า $\omega t \ll 1$ (ที่ Modulation Bandwidth Below 3-dB) ดังนั้น $m=m'$



รูปที่ 3.5 แสดงตัวอย่างวงจรนำหลอดเปลวแสง

จากรูป 3.5 I_c คือกระแสขับ LED มี R_c, R_b ที่ขา BASE และมีกระแส I_b ซึ่งจะเป็นกระแส Bias เพื่อให้ Transistor ON ทำให้ I_c ไหล ซึ่งกระแสคอลเล็คเตอร์ $I_c = \beta I_b$ โดย β คือค่า Transistor's Current Amplification Factor I_c คือกระแสที่ไหลผ่าน LED ซึ่งก็คือ I_{led} ในสมการเมื่อไม่มีสัญญาณอินพุตเข้ามา จุดทำงานของทรานซิสเตอร์ Q Point จะแสดงในรูป 3.6 ซึ่งลักษณะการทำงานตามรูปจะเป็นวงจร Class A Amplification ซึ่งจะทำให้ Q Point ของวงจรมี $I_c = 0$ หรือจุด Collector Cutoff ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อ I_b (Bias Current) เป็นศูนย์



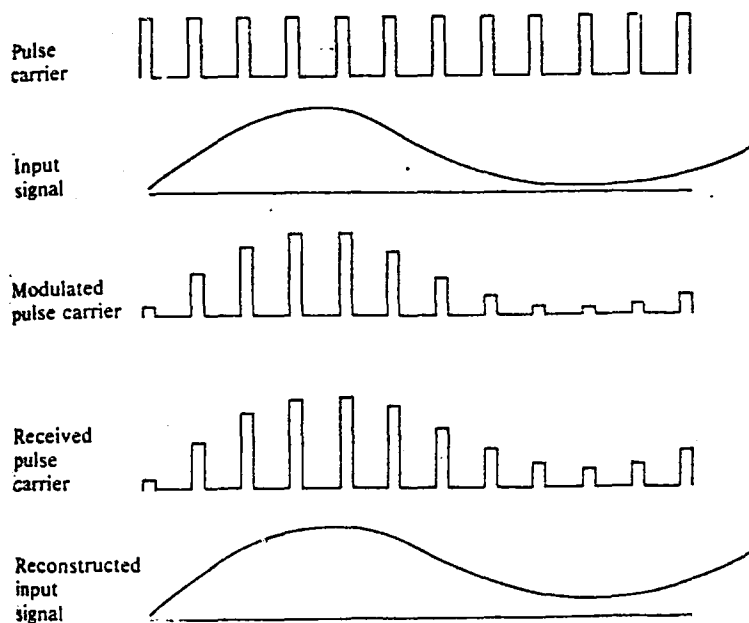
รูปที่ 3.6 แสดงกราฟค่าแบริคเตอร์รีสติกของทรานซิสเตอร์ $\beta = \Delta i_c / \Delta i_b$

เมื่อมีสัญญาณเข้ามา (V_{in}) จะทำให้เกิดกระแสที่แปรเปลี่ยนตามเวลาที่ขา Base รวมกับกระแส I_c ซึ่งเป็น DC bias ทำให้กระแสถูกขยายออกที่ขา Collector จุดทำงานในกรณีนี้จะถูกเลือกเพื่อไม่ให้กระแสรวมที่ขาของทรานซิสเตอร์เป็นศูนย์ ระหว่างช่วงที่สัญญาณ Peak ลบเข้ามาซึ่งจะทำให้ทรานซิสเตอร์ Cutoff และจะไม่ทำให้ทรานซิสเตอร์ Saturate ในช่วงที่สัญญาณ Peak บวกเข้ามา ค่าความต้านทาน R_c จะช่วยให้เสถียรภาพของจุดทำงานดีขึ้น

3.3 รูปแบบของการมอดูเลชันแบบพัลส์

3.3.1 พัลส์แอมพลิจูดมอดูเลชัน (PAM)

ลักษณะการทำงานของระบบ PAM แสดงดังรูปที่ 3.7 ซึ่งเป็นการมอดูเลตสัญญาณโดยใช้ขนาดของสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณอนาล็อก เป็นตัวกำหนดขนาดของสัญญาณพัลส์ที่ทำหน้าที่เป็นคลื่นพาหะ สัญญาณพัลส์ที่ถูกมอดูเลตแล้ว จะทำหน้าที่ควบคุมแหล่งกำเนิดแสงให้ส่งสัญญาณข้อมูลที่เป็นพลังงานความเข้มแสงขึ้นกับแอมพลิจูดของพัลส์โดยตรง ขนาดความถี่ของพัลส์ที่เป็นคลื่นพาหะต้องมีค่ามากกว่าความถี่ของสัญญาณอินพุตอย่างน้อยสองเท่า ค่าความถี่ของคลื่นพาหะนี้เรียกว่า "อัตราการแซมปลิง (Sampling Rate) ในระบบทั่วไปอาจใช้อัตราการแซมปลิงมากกว่าความถี่สัญญาณอินพุตประมาณ 3 หรือ 4 เท่า ตัวอย่างเช่น ในระบบที่ต้องการส่งข้อมูลที่เป็นสัญญาณเสียงพูด (โทรศัพท์) ซึ่งมีค่าแบนด์วิธของสัญญาณเสียงประมาณ 4000 Hz อาจใช้สัญญาณพัลส์ที่เป็นคลื่นพาหะมีค่าความถี่ประมาณ 16 KHz เป็นตัวส่งข้อมูล

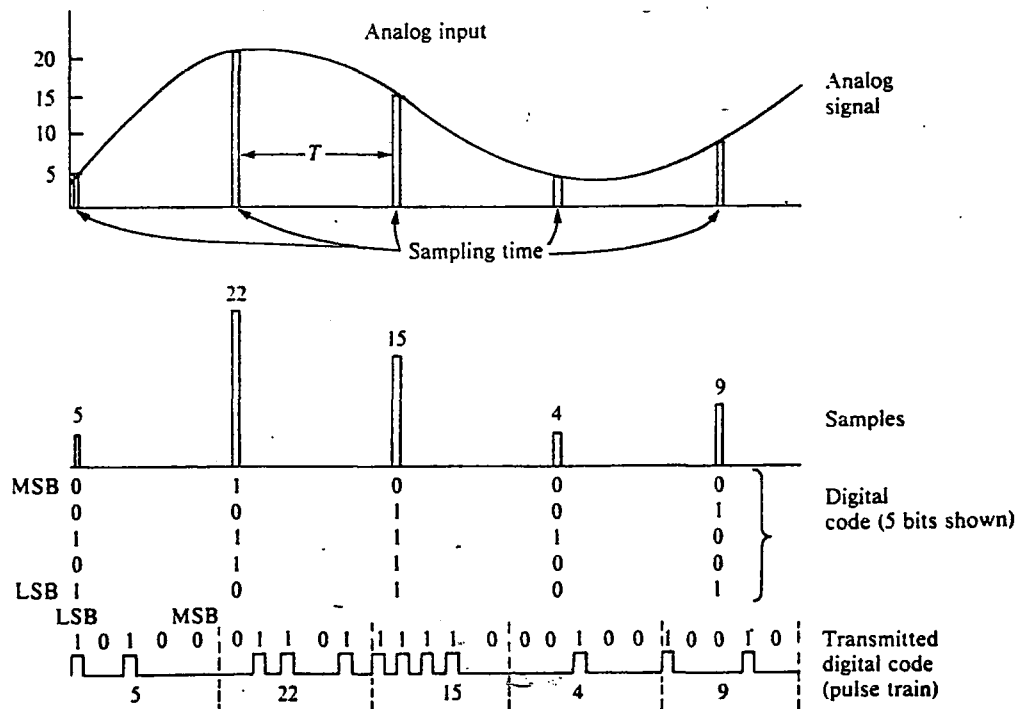


รูปที่ 3.7 แสดงการมอดูเลตแบบ PAM

โดยปกติระบบการมอดูเลตแบบ PAM ไม่ค่อยนิยมใช้กันมากนัก เว้นแต่จะใช้กับระบบสื่อสารระยะใกล้ ทั้งนี้เพราะว่า PAM มีข้อเสียดตรงที่มีความไวต่อการเกิดสัญญาณรบกวนสูงมาก

3.3.2 พัลส์โคดมอดูเลชัน (PCM)

เป็นเทคนิคการมอดูเลตที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบสื่อสาร โดยเฉพาะระบบโทรศัพท์ทางไกล ลักษณะการทำงานของระบบ PCM แสดงดังรูปที่ 3.8 ในตอนแรกสัญญาณอินพุตจะถูกสุ่มตัวอย่างหรือแซมปลิง (Sampling) ด้วยอัตราการแซมปลิงเหมือนกับระบบ PAM จากนั้นขนาดของสัญญาณที่ถูกสุ่มออกมา (ซึ่งก็คือแอมพลิจูดของพัลส์ในระบบ PAM) จะถูกทำการเข้ารหัสเป็นข้อมูลทางดิจิทัลด้วยระบบไบนารี ความละเอียดของสัญญาณขึ้นอยู่กับจำนวนบิตที่ใช้ในการเข้ารหัส ข้อมูลดิจิทัลที่ถูกเข้ารหัสแล้ว จะทำหน้าที่ควบคุมแหล่งกำเนิดแสงให้ส่งข้อมูลออกไปในลักษณะของสวิตช์ปิด-เปิด ดังนั้นในระบบนี้ สัญญาณแสงที่เป็นข้อมูลจะไม่คำนึงถึงระดับความเข้มแสงเลย นอกจากการปิด-เปิดแสงในช่วงเวลาที่กำหนดในแต่ละบิตข้อมูล ทำให้ลดการเกิดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบ PAM ลงได้มาก สัญญาณดิจิทัลที่รับได้ในภาครับ จะถูกแปลงกลับสู่สัญญาณอนาล็อกอีกครั้งหนึ่ง ก่อนถูกส่งผ่านวงจรกรองความถี่เพื่อทำให้ได้สัญญาณที่มีลักษณะเดียวกับสัญญาณอินพุตก่อนนำไปขยายสัญญาณเพื่อนำไปใช้งานต่อไป



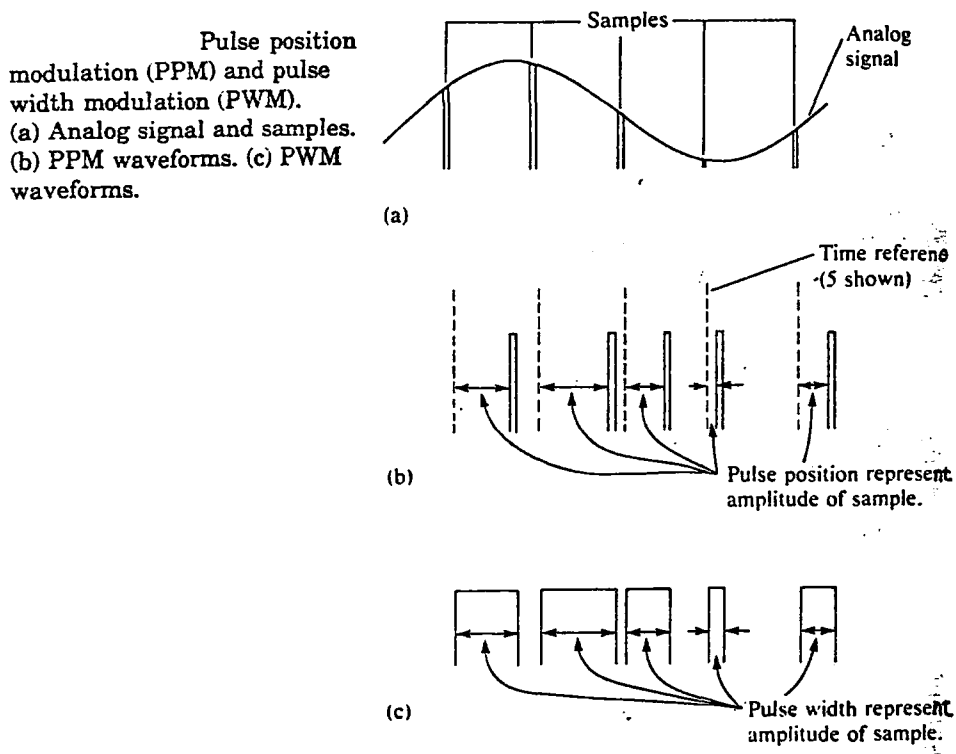
รูปที่ 3.8 แสดงรูปคลื่นของสัญญาณระบบมอดูเลตแบบ PCM

ประสิทธิภาพการส่งข้อมูลทางดิจิทัลสามารถกำหนดได้จากอัตราการส่งข้อมูล หรือ บิตเรต (Bit Rate) ในลักษณะของจำนวนบิตต่อเวลา ตัวอย่างเช่น ระบบโทรศัพท์ที่มีค่าแบนด์วิธของข้อมูล (เสียงพูด) 4 KHz หากใช้อัตราการแซมปลิง 4 เท่า คือใช้ค่าความถี่เท่ากับ 16 KHz และให้ข้อมูลแต่ละค่าที่เกิดจากการสุ่มตัวอย่าง ถูกแปลงเป็นเลขไบนารีชนิด 8 บิต จะทำให้ได้บิตเรตของระบบมีค่าเท่ากับ 128 Kb/s (กิโลบิตต่อวินาที) หรืออาจเขียนเป็นสูตรการคำนวณได้ว่า

$$\text{บิตเรต} = \text{แบนด์วิธ} \times \text{อัตราการแซมปลิง} \times \text{จำนวนบิตต่อข้อมูล} \dots (3.5)$$

3.3.3 พัลส์โพสิชันมอดูเลชัน (PPM)

เป็นการมอดูเลตโดยใช้ขนาดของสัญญาณที่ถูกสุ่มตัวอย่าง เป็นตัวกำหนดระยะเวลาในการส่งสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ข) ข้อมูลแสงที่ถูกส่งออกจะเป็นลักษณะของการปิดเปิดแสง โดยมีช่วงเวลาเริ่มต้นของการเปิดแสง ที่เปลี่ยนไปจากจุดเวลาเริ่มต้นของการสุ่มตัวอย่าง เป็นตัวบอกขนาดของข้อมูล ดังนั้นอัตราการแซมปลิงในระบบ PPM จะต้องมีช่วงเวลาห่างของการสุ่มตัวอย่างมากพอที่จะไม่ทำให้ระยะเวลาของการส่งข้อมูลแสงเกิดการซ้อนทับกันได้



รูปที่ 3.9 แสดงเทคนิคของ PPM และ PWM

3.3.4 พัลส์วิดท์มอดูเลชัน (PWM)

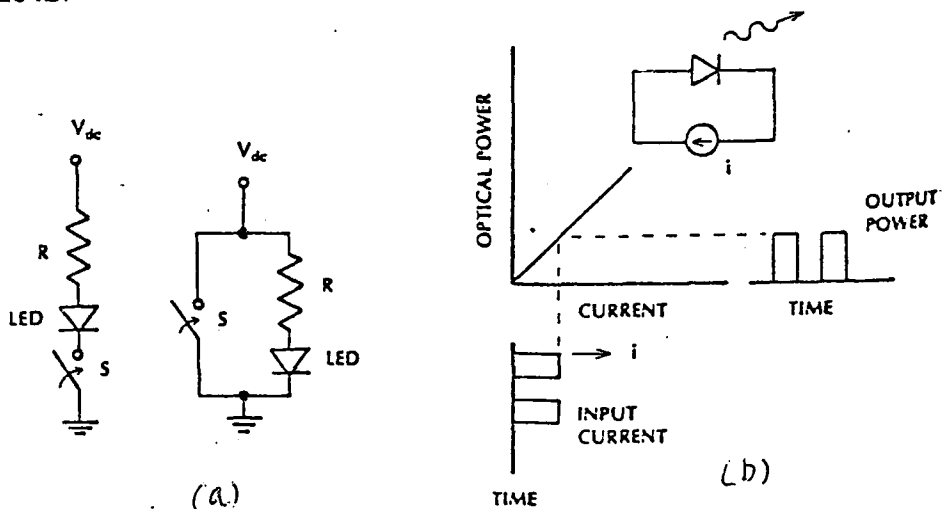
มีลักษณะการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.9 (ค) ซึ่งมีหลักการคล้ายกับระบบ PPM เพียงแต่สัญญาณ

ที่เป็นข้อมูลแสงจะเริ่มทำงาน(เปิดแสง) ณ ตำแหน่งเวลาของการเริ่มต้นลุ่มตัวอย่าง โดยช่วงเวลาการเปิดแสงหรือขนาดความกว้างของพัลส์จะเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมกับขนาดของข้อมูลที่ถูกลุ่มตัวอย่าง

ในระบบ PPM และ PWM ระยะเวลาของการปิดเปิดแสงเพื่อส่งข้อมูลต้องมีความแน่นอนสูง มิฉะนั้นข้อมูลที่รับได้อาจเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ง่าย ในขณะเดียวกัน ระบบการส่งสัญญาณแสงในช่วงระยะทางหนึ่ง มีผลทำให้สัญญาณข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลง ในเรื่องของขนาดความกว้างสัญญาณได้ จึงทำให้ระบบดังกล่าวไม่ค่อยเป็นที่นิยมกันนัก

3.4 วงจร DIGITAL MODULATION

วงจรขับคิวิตอล LED ไม่จำเป็นต้องใช้กระแส DC bias แต่จะให้ LED ทำงาน on หรือ off ที่สถานะ off LED เป็น Low ซึ่งกระแสที่ Drive จะขึ้นกับขนาดของสัญญาณอินพุต และกำลังงานทางเอาต์พุตจะเหมือนกันทุก ๆ Pulse ถึงแม้ว่าสัญญาณอินพุตจะเปลี่ยนไปตาม ดังแสดงในรูป 3.10(B)



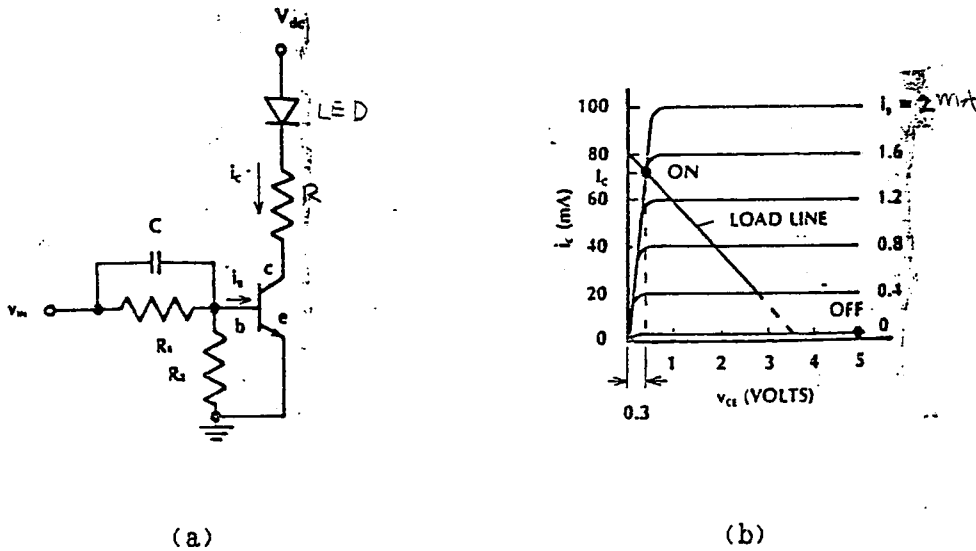
รูปที่ 3.10(a) แสดงวงจร Series Switch และ Parallel Switch

(b) วงจรเสมือนของวงจรขับกระแส

ในวงจรเมื่อสวิตช์ถูก Open จะไม่มีกระแสไหลดังนั้นจะไม่สว่าง เมื่อสวิตช์ถูก Close จะมีการกระแส $I = (V_{dc} - V_d)/R$ เมื่อ V_d คือ Forward Voltage ของไดโอดและที่สวิตช์ในแบบอุดมคติ (Ideal Switch) ค่าความต้านทานของมันสามารถตัดทิ้งได้และค่าศักย์ที่ตกคร่อมจะไม่มีผล เมื่อสวิตช์ Close ซึ่งจะไม่มีความสัมพันธ์กับขนาดของกระแส ส่วนหน้าทีของ R คือจะเป็นตัวจำกัดป้องกันไม่ให้มีกระแสไหลเกินเพื่อไม่ให้ LED เป็นอันตราย

สำหรับ Parallel Switch ทำงานคล้ายกับ Series คือเมื่อสวิตช์ถูก Close LED จะ

ไม่สว่างโดยการ Bypass ให้กระแสลง Ground เมื่อสวิตช์ถูก Open กระแสทั้งหมดจะผ่านไป
ถึง LED เกิดการสว่าง



รูปที่ 3.11(a) ตัวอย่างวงจรขับ LED โดยใช้ทรานซิสเตอร์

(b) จุดทำงานของวงจร

จากรูปที่ 3.11(a) และ (b) ผลของสมการ $I = (V_{cc} - V_d) / R$ ทรานซิสเตอร์ไม่เพียง
แต่จะเป็นสวิตช์ (Switching) แต่ยังทำหน้าที่เป็นแอมพลิไฟร์กระแสอินพุต 1 mA ซึ่งจะควบคุม
กระแสที่สูงกว่า ($I_c = 50-100$ mA) โดยที่ I_c จะเป็นตัวขับ LED ส่วน R_1, R_2 ในวงจรเป็น
Impedance Match ของ Source กับ Transistor ส่วนคาปาซิเตอร์ มีไว้เพื่อเพิ่ม Speed
ให้วงจรถ้าต้องการ ในวงจรมีสามารถทำงานได้ถึง 30 MHz

3.5 ระบบการสื่อสารด้วยสัญญาณแสงและการนำไปใช้งาน

ในระบบการสื่อสารด้วยสายเคเบิล สัญญาณจะถูกมอดูเลตเข้ากับสัญญาณความถี่สูง ซึ่งถูก
สร้างจากออสซิลเลเตอร์ในรูปของการมอดูเลตด้วยขนาด (Amplitude Modulation) การ
มอดูเลตด้วยความถี่ (Frequency Modulation) หรือการมอดูเลตด้วยพัลส์ (Pulse Modu-
lation) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วและจะถูกส่งผ่านสายเคเบิลหรือสายโคแอกเซียล ที่ภาครับ สัญญาณ
รวมที่ถูกลำบากก็จะถูกดีมอดูเลต (Demodulate) โดยตัวรับหรือออสซิลเลเตอร์

การสื่อสารด้วยแสงผ่านสัญญาณแสงเปรียบเทียบกับ การสื่อสารผ่านสายเคเบิลได้แสดงไว้
ในตารางที่ 3.1

Comparison of Wire Telecommunication and Optical Fiber Communication

	Carrier Source	Modulation	Transmission Line	Demodulator	Repeater Spacing
Optical fiber communication	Semiconductor laser Light-emitting diode	(Direct modulation) Pulse modulation Amplitude modulation	Optical fiber	Avalanche or PIN photodiode	5-50 km at 400 Mbits/s
Wire telecommunication	Oscillators such as the transistor	(External modulation) Amplitude modulation Frequency modulation Pulse modulation	Wire-pair cable Coaxial cable	Detector diode	1-3 km at 40 Mbits/s

ตาราง 3.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการสื่อสารด้วยสายเคเบิลกับการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง

สำหรับในการสื่อสารด้วยแสงผ่านเส้นใยนำแสง โดยทั่วไปแล้วถ้าสัญญาณอินพุตที่เข้ามาเป็นสัญญาณดิจิทัลจะนำไปเปลี่ยนเป็น Code ที่เหมาะแก่การส่งเสียก่อนแล้วจึงส่งออกไป ในทำนองเดียวกัน การส่งสัญญาณแบบอนาล็อกก่อนที่จะทำการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าอนาล็อกให้เป็นสัญญาณแสงส่วนมากมักจะทำการ Pre-Modulation ก่อนดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่แล้ว ทั้งนี้เพราะว่าแสงเอาท์พุทของอุปกรณ์กำเนิดแสงนั้น ไม่เป็นส่วนเดียวกับระดับสัญญาณไฟฟ้าอินพุตเสมอไป ทำให้เกิดกรณีความยุ่งยากในการรักษาคุณสมบัติในการส่ง จึงต้องทำ Pre-Modulation เสียก่อน เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าว สัญญาณที่ทำการ Pre-Modulation หรือเข้ารหัสแล้ว จะถูกส่งไปยัง LED หรือ Laser Diode ทำการมอดูเลตแบบความเข้มแสง (Intensity Modulation) สัญญาณที่ถูกมอดูเลตแบบนี้แล้ว จะถูกส่งผ่านเส้นใยนำแสง และจะถูกดีมอดูเลตที่ภาครับอีกครั้งที่ปลายอีกด้านหนึ่งของเส้นใยนำแสงโดยไดโอดตัวรับ (Detector Diode) ในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง จะมีการสูญเสียเกิดขึ้น 3 จุดใหญ่ ๆ คือ

1. การสูญเสียที่รอยต่อของตัวส่ง และ เส้นใยนำแสง
2. การสูญเสียขณะที่คลื่นแสงเดินทางในเส้นใยนำแสง
3. การสูญเสียที่รอยต่อของเส้นใยนำแสง และ ตัวรับ

ซึ่งในการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงที่มีระยะทางไกล ๆ จะต้องมีการขยายสัญญาณซึ่งเรียกตัวขยายตามทางนี้ว่าตัวทวนสัญญาณ (Repeater) เพื่อทำหน้าที่ขยายและจัดรูปสัญญาณที่เกิดการผิดเพี้ยนไปในระหว่างการเดินทาง ในการใช้งานจริงระยะห่างระหว่างสถานีทวนสัญญาณ มีค่า

ประมาณ 10 กิโลเมตรขึ้นไป โดยจะขึ้นกับขนาดหรือปริมาณของข้อมูลที่ใช้รับส่ง สำหรับระบบที่มีประสิทธิภาพสามารถรับส่งสัญญาณข้อมูลขนาด 2 Gb/s ไปเป็นระยะทาง 2200 กิโลเมตร โดยมีสถานีทวนสัญญาณเพียง 25 สถานี ในทุก ๆ 80-90 กิโลเมตร

3.6 รูปแบบของการติดต่อสื่อสาร

รูปแบบของการติดต่อสื่อสารมีอยู่ 3 ระบบใหญ่ ๆ คือ

1. ระบบซิมเพล็กซ์ (SIMPLEX SYSTEM)

ในการติดต่อสื่อสารแบบซิมเพล็กซ์ สัญญาณถูกส่งผ่านไปทิศทางเดียวโดยสถานีหนึ่งจะเป็นตัวส่งผ่าน และ อีกสถานีหนึ่งจะเป็นตัวรับ

2. ระบบฮาล์ฟดูเพล็กซ์ (HALF DUPLEX SYSTEM)

ในการทำงานระบบช่องทางเดินสัญญาณแบบฮาล์ฟดูเพล็กซ์ สถานีทั้ง 2 ฝ่ายสามารถที่จะส่งข้อมูลได้แต่จะต้องผลัดกัน คือมีเพียงสถานีเดียวที่ทำส่งในเวลาใดเวลาหนึ่งจะเป็นฝ่ายส่งพร้อม ๆ กันไม่ได้ เมื่อตัวหนึ่งส่งอีกตัวหนึ่งต้องรับ ในทางกลับกัน เมื่อตัวหนึ่งรับอีกตัวหนึ่งต้องส่ง

3. ระบบฟูลดูเพล็กซ์ (FULL DUPLEX SYSTEM)

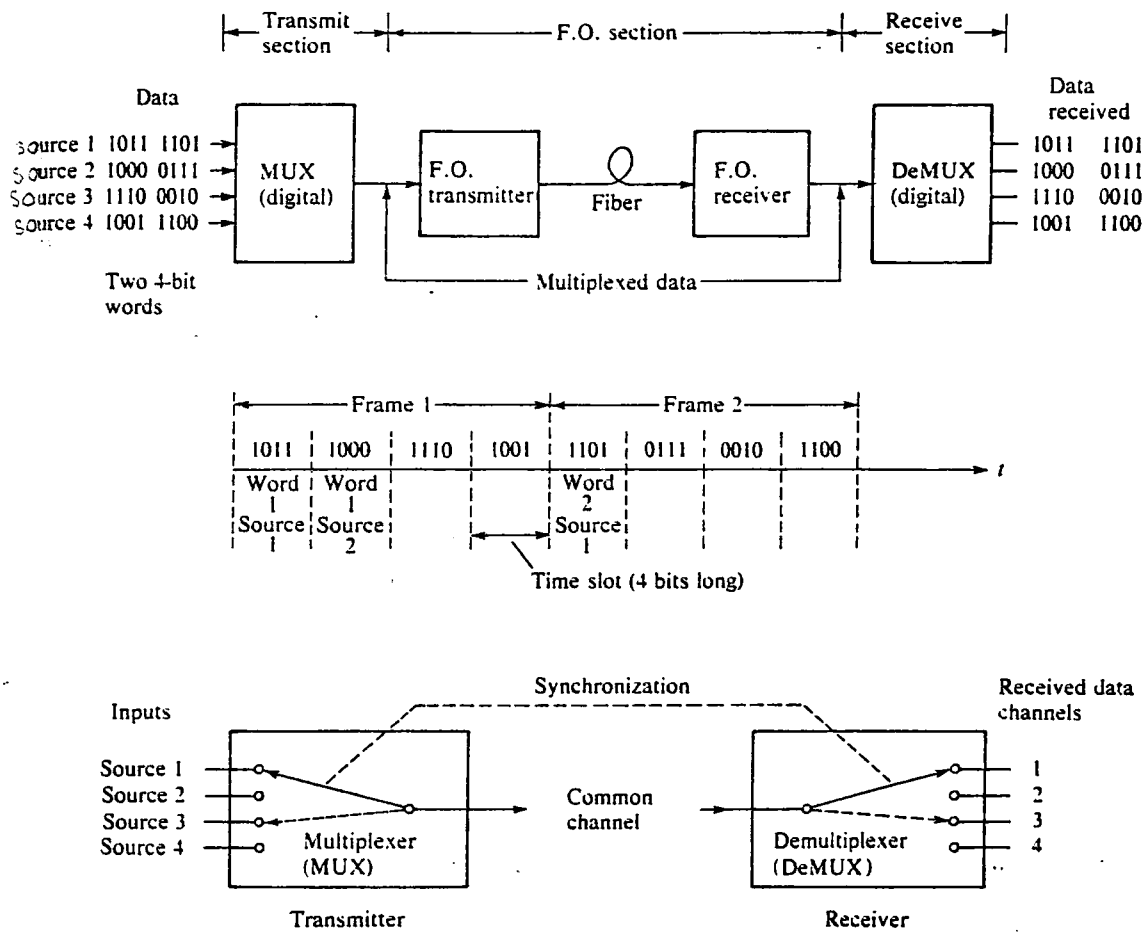
ทั้งสองสถานีสามารถส่งและรับข้อมูลได้ในเวลาเดียวกัน

3.7 ระบบมัลติเพล็กซ์ (MULTIPLEX SYSTEM)

ระบบมัลติเพล็กซ์ (MUX) เป็นระบบที่ทำให้สามารถส่งและรับข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ จำนวนมากได้ในช่วงเวลาเดียวกันโดยใช้ตัวกลางนำข้อมูลเดียวกัน ในระบบเส้นใยนำแสง นับว่ามีประโยชน์มาก เพราะเป็นระบบที่มีช่องของแบนด์วิธกว้างมากอยู่แล้ว ดังนั้นหากมีการนำเอาระบบมัลติเพล็กซ์ ที่มีประสิทธิภาพสูงมาใช้ร่วมกัน ย่อมทำให้สามารถสื่อสารข้อมูลจำนวนมหาศาลได้ภายในช่วงเวลาเดียวกัน ระบบมัลติเพล็กซ์ที่ใช้กันอยู่พอจำแนกได้ดังนี้

3.7.1 ระบบการแบ่งเวลา (TIME DIVISION MULTIPLEXING ; TDM)

เป็นระบบที่ใช้การแบ่งเวลาเป็นช่วง ๆ โดยในแต่ละช่วงจะใช้สำหรับการบรรจุข้อมูลที่มาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ต่าง ๆ เรียงกันไป



รูปที่ 3.12 แสดงการทำงานของระบบ TDM

ในรูปที่ 3.12 เป็นการทำงานของระบบ TDM ที่ต้องการส่งข้อมูลจาก 4 ช่องสัญญาณพร้อมกัน โดยในแต่ละช่องสัญญาณจะส่งข้อมูลเป็นคำ ๆ ละ 4 บิต ข้อมูลทั้ง 4 ช่องจะถูกเลือกด้วยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่คล้ายสวิตช์เชื่อมระหว่างภาคส่งและภาครับอย่างสัมพันธ์กัน โดยมีสัญญาณชิงโครไนซ์คอยควบคุม ระยะเวลาที่ใช้สำหรับรับส่งข้อมูลในแต่ละช่องต้องเท่ากัน (จำนวนบิตของข้อมูลแต่ละช่องควรเท่ากัน) และต้องมีช่วงเวลาพอที่จะส่งข้อมูลทั้งคำหรือ 4 บิตได้ เมื่อเริ่มต้นทำงานสวิตช์เลื่อนไปครบ 1 รอบ ข้อมูลที่เป็นคำแรกของทุกช่องสัญญาณจะถูกส่งไปยังภาครับทั้ง 4 ช่อง ชุดของข้อมูลที่ส่งไปในหนึ่งรอบนี้เรียกว่า เฟรม (Frame) ซึ่งแสดงด้วยไทม์มิงไดอะแกรมในรูปที่ 3.12(ข) ในแต่ละเฟรมของข้อมูลควรมีสัญญาณอื่นแทรกไว้เพื่อคอยบอกให้ทราบว่ามีข้อมูลหมดเฟรมแล้ว ภาครับจะได้เตรียมตัวสำหรับสัญญาณในเฟรมใหม่ต่อไป

ในทางปฏิบัติ สัญญาณข้อมูลอินพุตจากมอดูเลตและเข้ารหัสด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งดังกล่าวข้างต้นมาแล้ว จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งเข้าไปเก็บไว้ในวงจรบัฟเฟอร์ (Buffer) สำหรับพักข้อมูลและรอเวลาถูกอ่านในระบบมัลติเพล็กซ์ ดังนั้นระบบ TDM จึงเหมาะสำหรับข้อมูลที่มีอัตราการส่งช้า

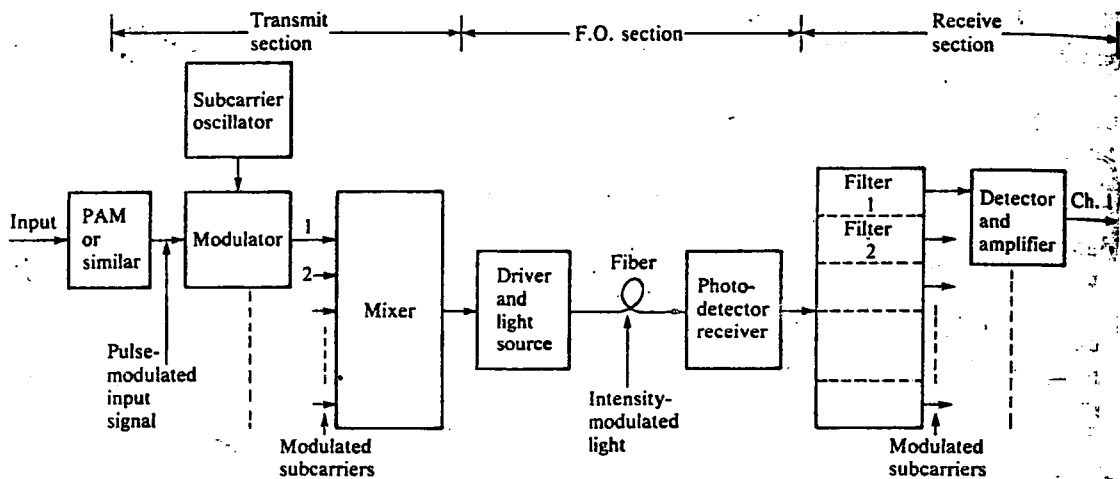
โดยจะช่วยให้สามารถส่งข้อมูลได้พร้อมกันหลายช่อง ด้วยระบบที่มีอัตราการส่งข้อมูลรวมสูงมาก อัตราการส่งข้อมูลของระบบมัลติเพล็กซ์ (MUX) สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{อัตราการส่ง MUX} = \text{จำนวนช่อง} \times \text{อัตราการส่งแต่ละช่อง} \dots\dots (3.6)$$

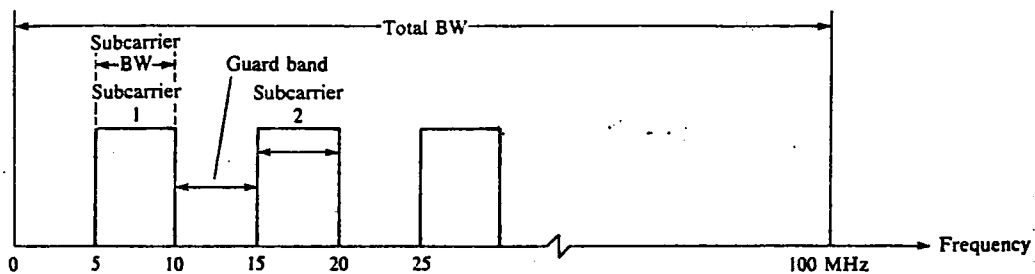
ตัวอย่างเช่น เราต้องการส่งข้อมูลจำนวน 8 ช่องสัญญาณพร้อมกันโดยในแต่ละช่องสัญญาณมีอัตราการส่งข้อมูล 1,000 ไบต์ต่อวินาที หรือ 8,000 บิตต่อวินาที สามารถใช้ระบบมัลติเพล็กซ์ชนิด TDM ที่มีอัตราการส่งข้อมูล $8 \times 8,000 = 64$ กิโลบิตต่อวินาทีได้

3.7.2 ระบบการแบ่งความถี่ (FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING ; FDM)

เป็นระบบมัลติเพล็กซ์ ที่แบ่งช่วงความถี่ของสัญญาณส่งออกเป็นช่วงความถี่ย่อย เพื่อทำหน้าที่เป็นพาหะย่อยของข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณ ดังแสดงด้วยบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงบล็อกไดอะแกรมของ FDM



รูปที่ 3.14 แสดงช่วงคลื่นพาหะย่อยในแต่ละช่องสัญญาณของ FDM

สมมติว่า ระบบเส้นใยนำแสงมีช่วงของแบนด์วิดท์หรือความถี่มากที่สุดที่จะใช้ส่งสัญญาณได้เป็น 100 MHz เราอาจแบ่งช่วงความถี่ย่อยที่มีขนาด 5 MHz (รูปที่ 3.14) ช่วงความถี่ย่อยนี้จะถูกใช้

สำหรับการมอดูเลตสัญญาณอินพุตในแต่ละช่อง ระยะระหว่างแต่ละความถี่ย่อยในแต่ละช่วง จะถูกกันด้วยช่วงความถี่ป้องกัน หรือการ์ดแบนด์ (Guardband) เพื่อกันมิให้สัญญาณข้อมูลมีการปะปนกัน สัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้วทั้งหมดจะถูกจัดเรียงเป็นระเบียบ และถูกส่งรวมกันในรูปของสัญญาณแสงในเส้นใยนำแสง

ในระบบ FDM สัญญาณอินพุตอาจต้องทำการผสมสัญญาณหรือมอดูเลตถึง 3 ขั้นตอนกล่าวคือ ขั้นตอนแรกเป็นการเข้ารหัสสัญญาณอินพุตที่เป็นอนาล็อกให้เป็นดิจิทัล (เช่นระบบ PAM, PCM) จากนั้นสัญญาณที่เข้ารหัสแล้วจะถูกมอดูเลตกับคลื่นพาหะย่อยแบบ AM หรือ FM ในขั้นตอนที่สองและขั้นตอนสุดท้ายเป็นการรวมสัญญาณทั้งหมดที่ถูกมอดูเลตในแต่ละช่องสัญญาณเข้าด้วยกันเพื่อให้แหล่งกำเนิดแสงใช้ส่งเป็นข้อมูลได้

ที่ภาครับของระบบ FDM โฟโตดีเทกเตอร์จะแปลงสัญญาณแสงทั้งหมดที่ได้รับได้ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าของคลื่นความถี่ที่ส่งออกมา แล้วผ่านเข้าไปในวงจรกรองความถี่ที่เหมาะสม จากตัวอย่างข้างต้นอาจใช้วงจรกรองในช่วงความถี่ 5-10 MHz, 15-20 MHz เป็นต้น ข้อมูลสัญญาณที่ถูกกรองแล้วจะถูกดีมอดูเลตเพื่อทำกลับคืนสู่รูปสัญญาณเดิมอีกครั้งหนึ่ง ในแต่ละช่องสัญญาณของมัน ก่อนนำไปใช้งานต่อไป

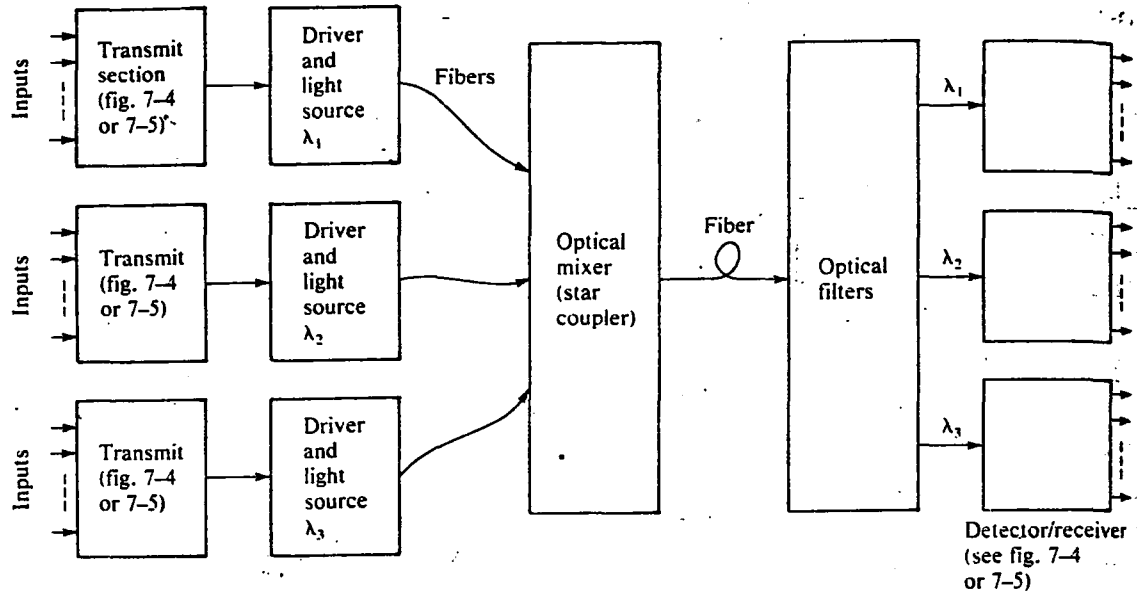
ปัญหาการใช้งานระบบ FDM จะเกิดขึ้นในขณะที่มีการผสมคลื่นพาหะย่อยทั้งหมดเข้าด้วยกัน โดยใช้อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เพราะสามารถทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่เรียกว่า คอสstalk (Crosstalk) ขึ้นได้ง่าย การแก้ไขทำได้ด้วยวิธีทางออปติก โดยการสร้างสัญญาณแสงของข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณก่อนจากนั้นทำการรวมสัญญาณด้วยอุปกรณ์ทางแสงที่เรียกว่า "ออปติคอลลคัปเปอเรอร์" ทำให้ได้สัญญาณแสงรวมส่งไปยังผู้รับ ลักษณะของสัญญาณแสงนี้อาจใช้ระดับความเข้มแสงช่วยกำหนดชนิดของข้อมูลได้

3.7.3 ระบบแบ่งความยาวคลื่น (WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING ; WDM)

เป็นระบบมัลติเพล็กซ์ที่ใช้คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันเป็นพาหะนำข้อมูลโดยแสงทั้งหมดจะถูกรวมกันก่อนส่งออกด้วย ออปติคอลลคัปเปอเรอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ซึ่งคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นค่าหนึ่ง สามารถบรรจุข้อมูลได้หนึ่งชุด และข้อมูลแต่ละชุดนี้อาจเป็นข้อมูลจำนวนมากที่มาจากหลายช่องสัญญาณก็ได้ เพราะการจัดระบบข้อมูลสามารถเลือกใช้ระบบ TDM หรือ FDM ก็ได้ มาทำการมอดูเลตกับคลื่นแสงที่เป็นตัวนำส่งข้อมูล และเนื่องจากสัญญาณคลื่นแสงที่มีค่าความยาวคลื่นต่างกันย่อมให้สีที่ต่างกัน บางครั้งระบบ WDM จะถูกเรียกว่า ระบบการผสมสีของแสง

ที่ภาครับ ข้อมูลแสงจะถูกแยกออกในแต่ละช่วงของความยาวคลื่น ด้วยวงจรกรองแบบออปติคอลล สัญญาณแสงที่ถูกแยกแล้วจะถูกดีมอดูเลตและถอดรหัสด้วยวิธีที่เหมาะสมกับขบวนการทางอิน

พูด (ในลักษณะของ TDM หรือ FDM) ระบบ WDM นี้เป็นเทคนิคใหม่ที่เพิ่งถูกนำมาใช้ เพราะสามารถส่งข้อมูลจำนวนมากมหาศาลได้ เท่าที่ปรากฏในปัจจุบัน WDM สามารถใช้กับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันไม่เกิน 3 ค่าเท่านั้น



รูปที่ 3.15 แสดงการทำงานของระบบ WDM

บทที่ 4

การออกแบบวงจรที่ใช้ในโครงการ

ในส่วนของวงจรที่ใช้ในโครงการนี้ สามารถแบ่งเป็นส่วนสำคัญได้ 2 ส่วนใหญ่ ๆ ดังนี้

1. วงจรทางภาคส่ง (Transmitter Circuit)
2. วงจรทางภาครับ (Receiver Circuit)

โดยวงจรและหลักการการทำงานของทั้ง 2 ส่วนนั้น สามารถอธิบายได้โดยง่ายในรูปแบบของบล็อกไดอะแกรมดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทนำ ซึ่งจะกล่าวประกอบไปกับหลักการการทำงานของวงจรต่าง ๆ ในหัวข้อต่อไป

4.1 วงจรทางภาคส่ง

4.1.1 วงจรปรีแอมพลิไฟร์

โดยทั่วไป ไมโครโฟนจะแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบอิมพีแดนซ์สูง (20 KOhm) เอาท์พุทสูง (20mv) และแบบอิมพีแดนซ์ต่ำ (200 Ohm) เอาท์พุทต่ำ (2mv) ในแบบแรกนั้นไม่ค่อยนิยมใช้แม้จะมีเอาท์พุทสูง ซึ่งจะทำให้สร้างวงจรขยายได้ง่าย แต่เพราะมีปัญหาในเรื่องไวต่อสเตรย์แม็กเนติกฟิลด์ (Stray Magnetic Field) เนื่องจากมีอิมพีแดนซ์ที่สูง ส่วนแบบอิมพีแดนซ์ต่ำจะแบ่งออกเป็นแบบไม่สมดุล ซึ่งจะมีสาย 2 สาย โดยสายหนึ่งจะต่อลงกราวด์ อีกสายเป็นสายนำสัญญาณ และแบบสมดุล ซึ่งจะมี 3 สาย โดยเป็นกราวด์หนึ่งสาย ส่วนอีก 2 สายเป็นสายสัญญาณ ซึ่งจะนำไปต่อลักษณะคิฟเฟอเรนเชียลอินพุท ทำให้สามารถลดสัญญาณรบกวนที่รับมาระหว่างผ่านสายนำสัญญาณได้ แบบที่ใช้ในวงจรจะเป็นแบบอิมพีแดนซ์ไม่สมดุล โดยวงจรปรีแอมป์จะใช้ LF 357 ต่อในระบบอินเวอร์ตติ้ง (Inverting) และใช้ไฟเลี้ยงเดี่ยว (Single Supply) สามารถปรับอัตราขยายได้ตั้งแต่ 1-100 เท่า ซึ่งมีลักษณะของวงจรดังรูปที่ 4.1

C_1 จะเป็นตัวกำหนดจุดคัทออฟที่ความถี่ต่ำของสัญญาณของอลดีโอ f_1 (ที่ -3 dB)

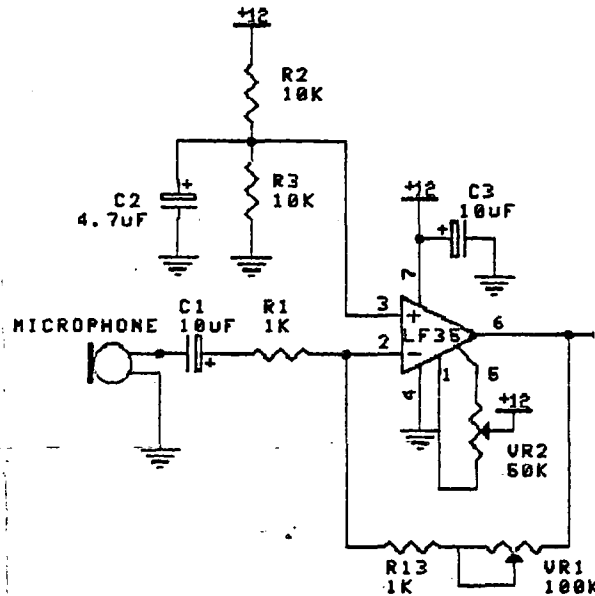
เลือกให้ $C_1 = 10 \mu\text{F}$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } f_1 &= 1/(2\pi * R_1 * C_1) \dots\dots\dots (4.1) \\ &= 1/(2\pi * 1000 * 10 * 10^{-6}) \\ &= 15.9 \text{ Hz} \end{aligned}$$

ค่าของ C_2 จะเป็นตัวผ่านสัญญาณเอซีไปสู่ภาคต่อไป จะมีค่าขึ้นกับจุดคัทออฟที่ความถี่ต่ำและค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรภาคถัดไป เราสามารถประมาณค่าตัว C ได้โดยให้มีค่าใหญ่ ๆ ในที่นี้ให้ค่า

$$C_2 = 10 \mu\text{F}$$

ค่าของ R_2 และ R_3 ทำตัวเป็น Voltage Divider เพื่อไบแอสตัวไอซีให้สามารถใช้ไฟเลี้ยงเดียวได้



รูปที่ 4.1 แสดงวงจรปรีแอมป์

4.1.2 วงจร PULSE FREQUENCY MODULATION ; PFM

ในส่วนของวงจรนี้จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณ PFM ออกมาโดยจะใช้แอมพลิฟายเออร์หรือค่าคิกซ์ของสัญญาณออดิโอ ที่เข้ามาทางอินพุทไปควบคุมความถี่พาหะให้เกิดการสั่น (Oscillation) ไปมารอบ ๆ ความถี่ของพาหะ ในที่นี้เราใช้ LM 566 ซึ่งเป็น IC Voltage Controlled Oscillator (VCO) ลักษณะของวงจร แสดงดังรูปที่ 4.2

ที่ขา 5 ของ LM 566 จะต้องไบแอสไว้ให้มีค่า V_c เพื่อให้จะให้ไอซีสามารถทำงานได้โดย V_c มีค่าเท่ากับ $3/4 V_{cc} < V_c < V_{cc}$

จากวงจรจะได้ว่า $R_5 / (R_4 + R_5) V_{cc} > 3/4 V_{cc}$

เลือกค่า $R_4 = 6.8K, R_5 = 47K$

ดังนั้นขา 5 จะถูกไบแอส $V_c = 10.48 V$

ค่าความถี่กลาง f_o (Frequency Center) จะถูกกำหนดโดยสมการ

$$f_o = 2 (V_{cc} - V_c) / (R_1 * C_1 * V_{cc}) \dots\dots\dots(4.2)$$

เมื่อ V_c คือ ค่าคิกซ์ที่เกิดขึ้นที่ขา 5

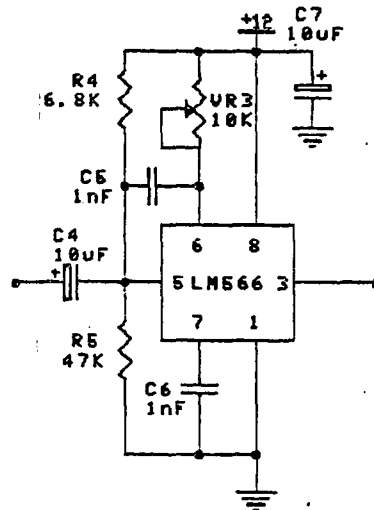
C_1 คือ ตัวเก็บประจุที่ต่อระหว่าง ขา 7 กับ กราวนด์

R_1 คือ ตัวต้านทานที่ต่อระหว่างขา 6 กับไฟเลี้ยง
เลือกค่าความถี่กลาง $f_o = 300 \text{ KHz}$ และเลือก $C_1 = 1 \text{ nF}$
จะได้ $R_1 = 2 * (12 - 10.48) / (300 * 10^3 * 1 * 10^{-9} * 12)$
 $= 844 \text{ Ohm}$

แต่เราจะเลือกใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ตามต้องการแต่จะไม่เกิน 1 MHz ตามที่ระบุไว้ใน Data Sheet

C_5 1 nF ที่ต่อระหว่างขา 5 และ 6 ของ LM 566 จะต่อไว้เพื่อป้องกันการออสซิลเลตที่อาจเกิดขึ้นได้ ในช่วงระหว่างที่ VCO สวิตช์

สัญญาณเอาท์พุทที่ถูกมอดดูเลตแล้วจะเป็นลักษณะพัลส์ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความถี่กลางตามระดับสัญญาณอินพุท จากนั้นจะถูกส่งไปยังวงจรรีบ (Driver) เพื่อนำไปขับ LED ต่อไป



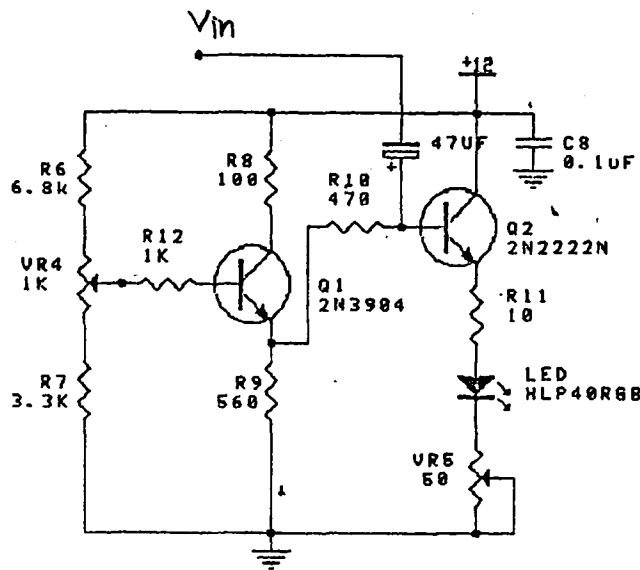
รูปที่ 4.2 แสดงวงจร Pulse Frequency Modulation

4.1.3 วงจรขับ

วงจรรีบในส่วนนี้จะทำหน้าที่รับสัญญาณที่ทำการมอดดูเลตแบบ PFM มาแล้ว มาทำการมอดดูเลตแบบอินเทนซิตี (Intensity Modulate) คือเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสง มีขนาดความเข้มของแสงเปลี่ยนไปตามแอมพลิจูด และ ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า ในวงจรนี้ใช้ LED ของ HITACHI เบอร์ HLP 40RGB เป็นตัวส่งให้ความยาวคลื่นพีค (Peak Wavelength) อยู่ในช่วง 818 นาโนเมตร และสามารถให้กำลังทางแสงได้ถึง 2.8 mW ส่วนรายละเอียดในเรื่องต่าง ๆ

ของอุปกรณ์นั้น เนื่องจากไม่สามารถหาแผ่นข้อมูลมาได้ทำให้ไม่ทราบข้อมูลที่แท้จริงที่นอกเหนือจากนี้ได้

พิจารณาวงจรขับสัญญาณอนาล็อก เราจะประมาณกระแสในวงจรที่จะต้องให้ขับตัว LED ให้อยู่ในช่วง 30-50 mA เพราะในช่วงนี้ความสัมพันธ์ ระหว่างกระแสที่ขับ LED กับกำลังแสงที่ออกจาก LED จะเป็นเชิงเส้น (Linear) และให้กำลังทางแสงออกมาได้มาก ลักษณะวงจรขับที่ใช้แสดงดังรูป 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงวงจรขับ LED ที่ใช้ในโครงการ

วงจรภาคสุดท้ายเราเลือกใช้วงจรขับกระแสแบบ Common Collector เนื่องจากไม่คำนึงถึงอัตราขยายแรงดันทางเอาต์พุต เพียงต้องการอัตราขยายกระแสที่จะขับ LED เลือกใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N 2222A เพราะสามารถตอบสนองความถี่ได้ถึง 400 MHz ให้กระแส I_c ได้สูงถึง 400 mA ส่วนวงจรภาคแรกคือ วงจรขยายซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนกระแสไบแอสได้จากตัวต้านทานปรับค่าได้ V_{R4} ทำให้กระแสอิมิตเตอร์ I_{E1} ที่ควบคุมกระแสเบส I_{B2} เปลี่ยน ซึ่งจะมีผลทำให้ระดับกระแสดีซี I_{dc} (I_{E2}) ที่ไบแอส LED เพื่อให้ on อยู่ตลอดเวลาเปลี่ยนแปลงได้ การออกแบบภาคส่งเลือก I_{dc} ให้มีค่าประมาณ 40 mA โวลเตจที่ตกคร่อม LED มีค่าประมาณ 1.5 V ส่วน V_{R5} ที่ต่อกับขาคาโอดของ LED ทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดกระแสที่ไหลผ่านตัว LED ไม่ให้มีค่ามากเกินไปซึ่งอาจจะทำ LED เกิดความเสียหายได้ส่วนตัวเก็บประจุ 47 μF จะทำหน้าที่คัปปลิงสัญญาณ PFM ที่ถูกส่งมาจากวงจรมอดูเลต จากวงจรสามารถคำนวณหากระแสที่ผ่าน LED ได้ดังนี้

ให้ $V_{R4} = 1K$ หา V_{TH}

$$V_{TH} = \frac{3.3 + 1}{3.3 + 1 + 6.8} \times 12$$

$$= 4.65 \text{ V}$$

หา V_{E1} โดยสมมติให้ I_{B1} มีค่าน้อยมาก สามารถตัดทิ้งได้

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

$$= 4.65 - 0.7$$

$$= 3.95 \text{ V}$$

หา I_{dc} ที่ไบแอสตัว LED และให้ I_{B2} มีค่าน้อยมาก, $V_R = 30 \text{ Ohm}$

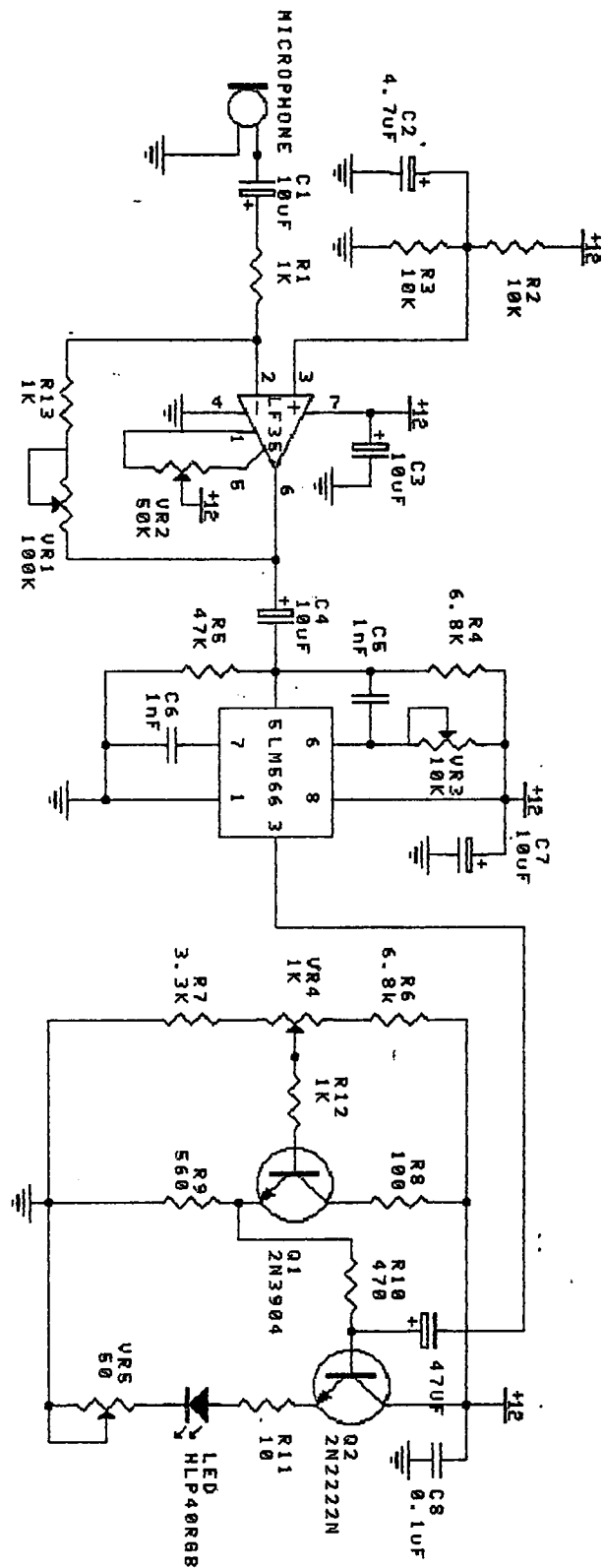
$$I_{dc} = V_{E1} - V_{BE2} - V_{LED}$$

$$= 3.95 - 0.7 - 1.5$$

$$\frac{10+30}{}$$

$$= 43.75 \text{ mA}$$

วงจรที่สมบูรณ์ทางภาคส่งจะแสดงดังในรูป 4.4

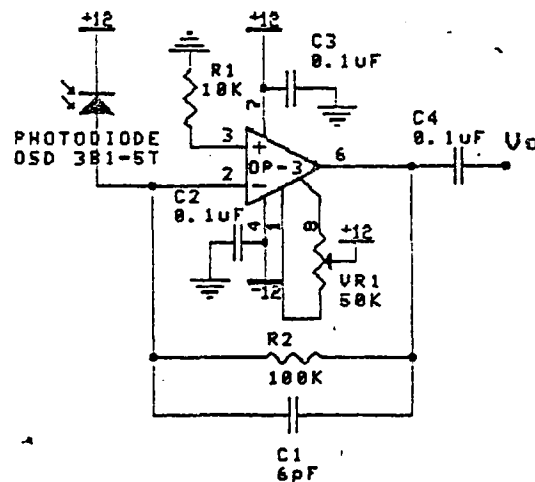


รูปที่ 4.4 แสดงวงจรทางภาคส่งที่ใช้ในโครงการ

4.2 วงจรทางภาครับ

4.2.1 ภาคก่อนขยายแบบทรานส์อิมพีแดนซ์ (TRANSIMPEDANCE)

พิจารณาการออกแบบทางภาครับ สิ่งแรกที่จะต้องคำนึงถึงคือระดับพลังงานต่ำสุดที่ภาครับสามารถรับได้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น คุณสมบัติของโฟโตไดโอด แบนด์วิธของระบบ ระดับ Signal-to-Noise Ratio ของระบบ ในการออกแบบวงจรที่ใช้ในโครงการนี้จะใช้ฟิโอสเต็ม โฟโตไดโอด ทำงานอยู่ในโหมดโฟโตคอนดักทีฟ (Photoconductive) คือให้รีเวิร์สไบแอส (Reverse Bias) โวลเตจแก่ไดโอด และ ทำการต่อวงจรแบบทรานส์อิมพีแดนซ์ หรือ วงจรแปลงกระแสเป็นสักรี (Current-to-Voltage) ข้อดีของวงจรแบบนี้คือมีคุณสมบัติของสัญญาณรบกวนต่ำ เนื่องจากมีการป้อนกลับโดยใช้ความต้านทาน R_f มีการใช้งานได้ในย่านความถี่ที่สูงกว่าแบบอื่น มีความต้านทานเอาต์พุตน้อย ทำให้ภาคขยายต่อมาไม่ต้องดึงกระแสจากภาคก่อนขยายมากซึ่งจะลดสัญญาณรบกวนไปได้มากและไม่จำเป็นต้องมีวงจรอีควอลไลเซอร์ (Equalizer) เพื่อปรับแต่งสัญญาณ ลักษณะของวงจรที่ใช้ในโครงการนี้แสดงดังรูป 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงวงจรภาคก่อนขยาย

โฟโตไดโอดที่ใช้เป็นแบบ PIN เบอร์ OSD 3B1-5T ซึ่ง PIN ที่ใช้ไม่มีรายละเอียดการใช้งาน เนื่องจากเป็นอุปกรณ์เฉพาะที่ทำการสั่งซื้อมาแต่ไม่มีรายละเอียดให้มาด้วย PIN ไดโอด จะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณความเข้มของแสงที่รับได้ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งอยู่ในรูปกระแสมีค่าไม่กี่ไมโครแอมป์ ขาแอนดของ PIN จะต่อเข้ากับ IC เบอร์ OP-37 ซึ่งเป็นออปแอมป์ Low-Noise Precision High-Speed มีเกนแบนด์วิธโปรดักต์ 63 MHz มีค่า CMRR 114 dB เวก

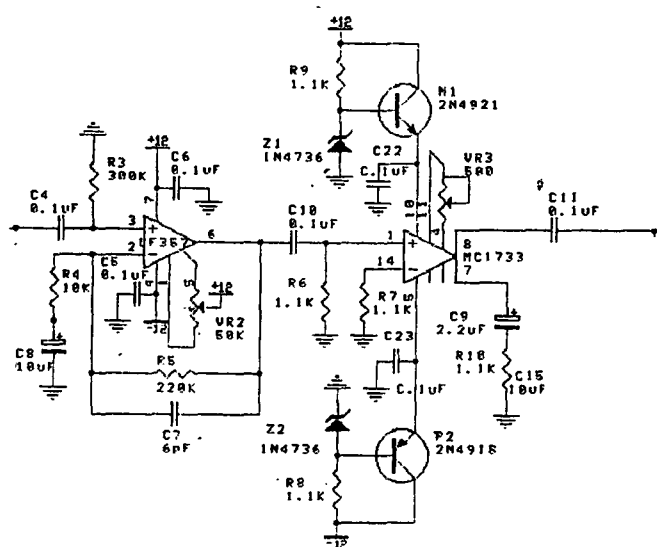
สามารถคำนวณหาโวลเตจเอาต์พุทของภาคก่อนขยายได้ดังสมการ

$$V_o = I_o * R_p \dots\dots\dots(4.3)$$

ตัวต้านทาง 10K ที่ต่อเข้ากับขานอนอินเวิร์ทตั้ง ต่อไว้เพื่อช่วยให้กระแสอินพุทไบแอสของ วงจรมีความสมดุล ตัวเก็บประจุ 6 PF ที่ต่อขนานกับ R_p เพื่อให้วงจรขยายมีเสถียรภาพจาก การเกิดออสซิลเลชันส่วนตัวเก็บประจุ 0.1 μF ที่ทำการดีคัปปลิ่งระหว่างไฟเลี้ยงของวงจรจะช่วย บายพาสสัญญาณรบกวนที่มาจากไฟเลี้ยงให้ลดกราวนด์

4.2.2 วงจรขยายสัญญาณ

ในวงจรภาคก่อนขยายนั้น เราไม่สามารถทำให้เกนของวงจรสูงมาก เนื่องจากวงจรขยาย ส่วนแรกต้องคำนึงถึงสัญญาณรบกวน เพราะกระแสที่รับจาก PIN โฟโตไดโอดธรรมดาแล้วมีค่าต่ำ มาก จึงต้องแบบวงจรขยายภาคหลังให้มีเกนการขยายสูงอยู่ในระดับที่ต้องการเพื่อที่จะให้วงจรใน ภาคถัดไปคือภาคดีมอดคูเลต สามารถที่จะทำการล็อคความถี่หรือโวลเตจที่เข้ามาทางขาอินพุทได้ ในการออกแบบและสร้างวงจรขยายส่วนหลัง ประกอบด้วยภาคขยาย 2 ส่วน ดังแสดงในรูป 4.6



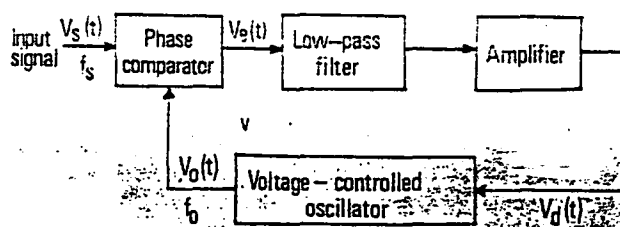
รูปที่ 4.6 แสดงวงจรขยายสัญญาณ

ภาคขยายส่วนแรกใช้โอปแอมป์เบอร์ LF 357 ซึ่งทำงานได้ในย่านความถี่สูงใช้ขยายได้ใน ช่วงกว้าง ๆ ลักษณะของวงจรจะต่อเป็นแบบนอนอินเวิร์ทตั้ง มีอัตราขยายประมาณ 23 เท่า มี Cut-Off Low Frequency ที่ความถี่ 16 HZ ส่วนภาคขยายสเตทถัดไปใช้ไอซีเบอร์ MC 1733 ซึ่งมีลักษณะเป็นดิฟเฟอเรนเชียลแอมป์มีคุณสมบัติที่ดีคืออัตราขยายสูง (เลือกได้ 10, 100, 400 เท่า) แบบด์วิธกว้าง (40 MHz ขึ้นไป) การขยายสัญญาณในวงจรนี้จะต่อเป็นแบบซิงเกิ้ลเอนด์ (Sin

gle End) และใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ 500 Ohm ต่อเข้ากับขา Gain Select ของตัวไอซีซึ่งทำให้สามารถปรับอัตราได้ตั้งแต่ 10-400 เท่า และจากข้อกำหนดของตัวไอซีที่ใช้ไฟเลี้ยงได้ไม่เกินบวกลบ 8 โวลต์ จึงใช้ทรานซิสเตอร์และซีเนอร์ไดโอดต่อเข้าด้วยกัน 2 ชุดเพื่อจ่ายไฟเลี้ยงให้กับไอซีมีค่าประมาณ 6 โวลต์

4.2.3 วงจรคิมอดคูลูเลต

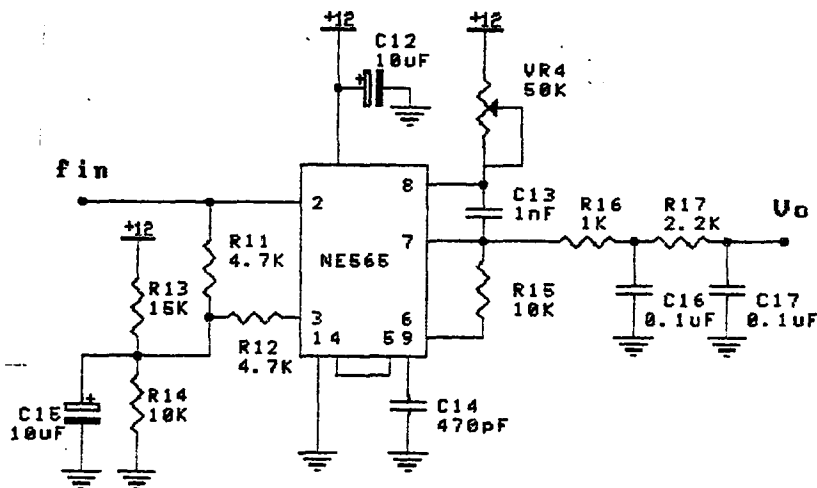
ในภาคนี้จะทำหน้าที่คิมอดคูลูเลตสัญญาณ Pulse Frequency Modulation ที่ถูกขยายมาแล้วจากภาคขยาย สัญญาณที่ผ่านการคิมอดคูลูเลตแล้ว จะได้สัญญาณออกมาในรูปสัญญาณอนาล็อกที่มีความถี่รูปร่างเหมือนกับสัญญาณอนาล็อกในภาควงจรส่ง ในวงจรนี้ใช้ไอซีเฟสล็อกคูลู NE 565 เป็นตัวคิมอดคูลูเลต ซึ่งจะอธิบายหลักการทำงานเบื้องต้นของมันดังนี้ เฟสล็อกคูลู (Phase Lock Loop ; PLL) คือระบบที่มีการป้อนความถี่กลับประกอบด้วย Phase Detector, Low Pass Filter, Error Amplifier และ Voltage Controlled Oscillator แผนภาพของระบบเฟสล็อกคูลูอย่างง่าย แสดงดังในรูปที่ 4.7 การวิเคราะห์ระบบโดยทางคณิตศาสตร์จะไม่ขอล่าไว้ในที่นี้ อย่างไรก็ตามหลักการทำงานเบื้องต้นสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 4.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมของเฟสล็อกคูลู

ขณะที่ยังไม่มีสัญญาณเข้าไปในระบบ แรงดันควบคุม $V_u(t)$ จะเท่ากับศูนย์ VCO จะทำงานโดยการตั้งความถี่ไว้ที่ f_o ซึ่งเรียกว่า Free-Running Frequency ถ้าสัญญาณเข้าไปในระบบ Phase Comparator จะทำการเปรียบเทียบเฟสและความถี่ของสัญญาณอินพุตกับ VCO และผลิตแรงดันคลาดเคลื่อน $V_u(t)$ ซึ่งสัมพันธ์กับความแตกต่างของเฟสและความถี่ของสัญญาณทั้ง 2 แรงดันคลาดเคลื่อนนี้จะถูกกรองและขยายส่งไปควบคุม VCO ในกรณีนี้แรงดันควบคุม $V_u(t)$ จะไปบังคับความถี่ VCO ให้เปลี่ยนไปในทิศทางที่จะลดความถี่ที่ต่างกันระหว่าง f_o และ สัญญาณที่เข้ามาถ้าความถี่สัญญาณที่เข้ามาใกล้เคียงกับ f_o จากการป้อนกลับของ PLL ทำให้ PLL ซึ่งโคจรใน หรือ Lock กับสัญญาณที่เข้ามา ขณะที่ทำการ Lock นั้นความถี่ VCO จะเท่ากับสัญญาณอินพุต

แต่เฟสยังต่างกันอยู่ ความแตกต่างของเฟสมีความจำเป็นต่อการผลิตแรงดันคลาดเคลื่อนที่จะคอยไปปรับความถี่ VCO จากค่า Free-Running ให้เท่ากับความถี่ที่เข้ามา f_{in} ดังนั้น PLL จะยังคงรักษาสภาพการ Lock การที่ระบบสามารถที่จะปรับตัวได้เองทำให้ PLL สามารถติดตามความถี่ที่เปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เข้าไป ให้อยู่ในสภาพ Lock เช่นเดิม ช่วงความถี่ซึ่ง PLL สามารถติดตามการ Lock กับสัญญาณที่เข้ามาเรียกว่า "Lock Range" ค่าของมันจะขึ้นอยู่กับแรงดันคลาดเคลื่อนโดยจะไม่ขึ้นอยู่กับ Band Edge ของฟิลเตอร์ ช่วงความถี่นี้จะมากกว่าช่วงความถี่ที่ PLL สามารถทำการ Lock อย่างแท้จริงกับสัญญาณอินพุต ช่วงความถี่ดังนี้เรียกว่า "Capture Range" ของระบบ ช่วง Capture Range นี้จะขึ้นอยู่กับ Band Edge ของฟิลเตอร์และ Closed Loop Gain (K_v) ของระบบทั้งหมด โดยมีผลเกี่ยวข้องกับ Selectivity ของวงจร PLL และยิ่งช่วยเพิ่มความปลอดภัยเกี่ยวกับสัญญาณทางด้าน Outband Signal ที่จะมารบกวนได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 4.8 แสดงวงจรดีมอดคูเลตสัญญาณ PFM

รูปที่ 4.8 เป็นวงจรดีมอดคูเลตที่ใช้ในโครงการนี้ สัญญาณเอาท์พุทจากวงจรขยายจะถูกนำไปป้อนเข้าทางขา 2 ของ NE 565 สัญญาณที่ดีมอดคูเลตแล้วจะออกมาทางขา 7 ผ่านวงจร Low Pass Filter 2 ชุด ที่มีความถี่คัตออฟ f_c เท่ากับ 10 KHz และ 4.5 KHz สัญญาณที่ได้มาจะเป็นสัญญาณแอนะล็อก และจะนำไปขยายอีกครั้งในภาคถัดไป

วงจรเฟสล็อกคูลูปที่ใช้ เราสามารถกำหนดความถี่กลาง (Center Frequency) ที่ใช้ในวงจร ซึ่งได้จากสมการที่กำกับมาให้ในแผ่นรายละเอียดข้อมูล

1

$$f_o = \frac{1}{(3.7 * R_o * C_o)} \dots\dots\dots(4.4)$$

เมื่อ f_o คือ ความถี่ของ VCO โดยไม่มีสัญญาณเข้ามา

C_o คือ ตัวเก็บประจุที่ต่อกับขา 9 และกรานด์

R_o คือ ตัวต้านทานที่ต่อระหว่างขา 8 กับ ไฟเลี้ยง

เลือกใช้ $C_o = 470$ pF และ R_o เป็นตัวต้านทานปรับค่าได้ 50 Kohm ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนเลือกความถี่กลางที่สอดคล้องกับความถี่ของสัญญาณที่เข้ามาได้

ค่าล็อกเรนจ์ (Lock Range) หรือค่าช่วงที่จะล็อกความถี่อยู่จะคำนวณได้จาก

$$f_L = \pm \frac{8f_o}{V_{cc}} \dots\dots\dots(4.5)$$

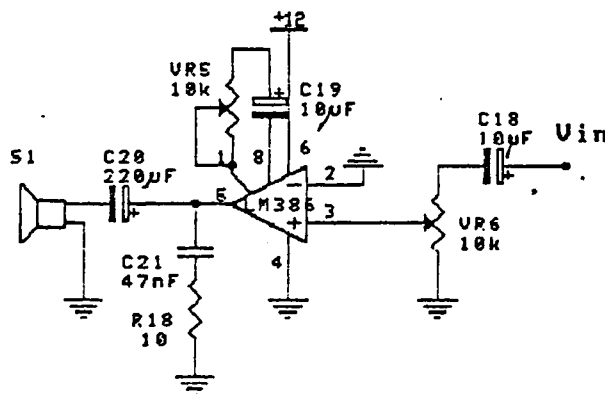
และช่วงความถี่ที่เริ่มจะเข้าล็อกหรือแคปเจอร์เรนจ์ (Capture Range) โดยก่อนหน้านั้นยังไม่เกิดการล็อก จะคำนวณโดย

$$f_c = (\pm 1/2\pi) * \sqrt{(2\pi f_L)/T} \dots\dots\dots(4.6)$$

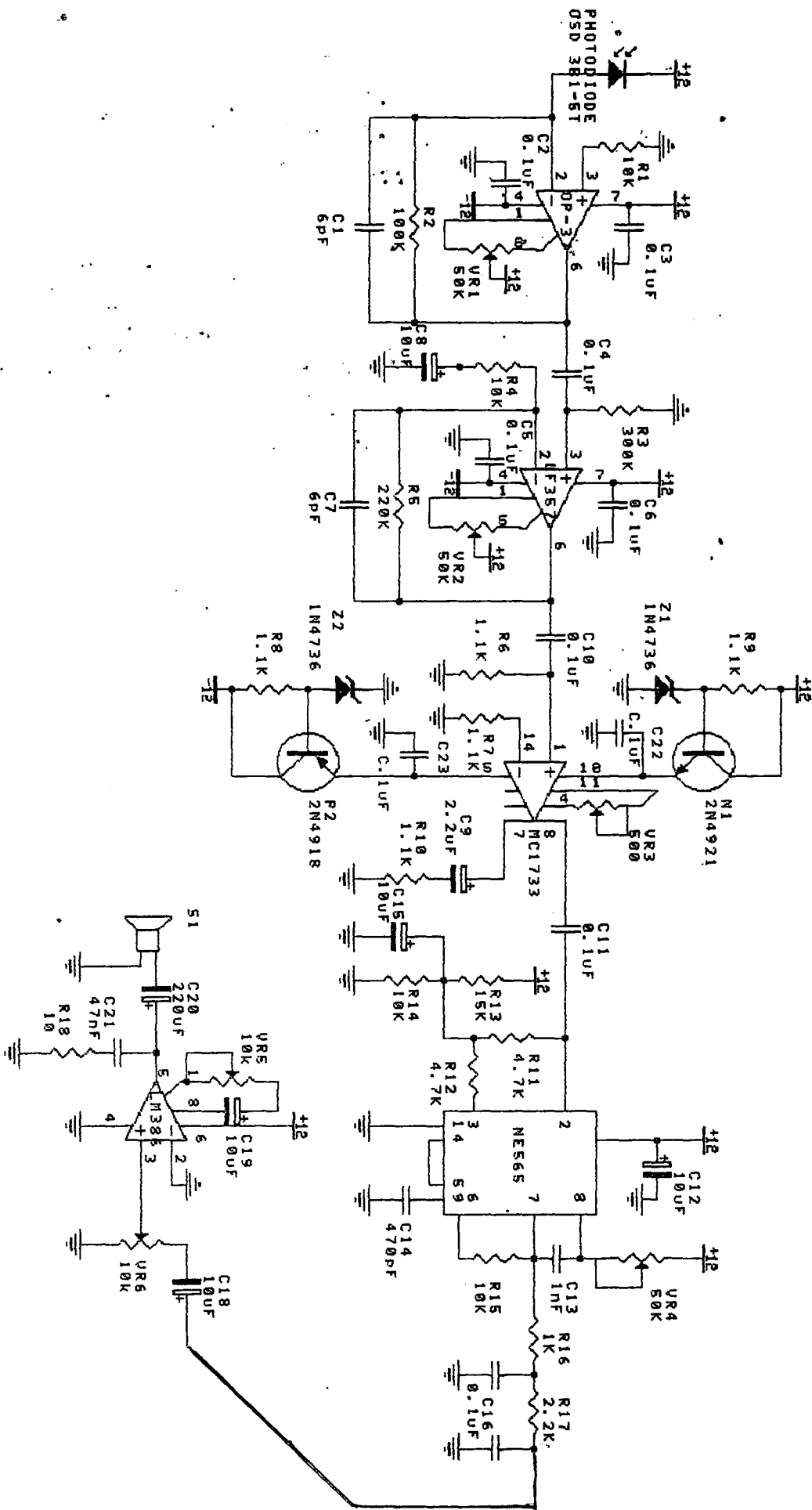
โดยที่ T คือ ค่าคงที่ทางเวลาที่ขา 7

4.2.4 วงจรภาคขยายเสียง

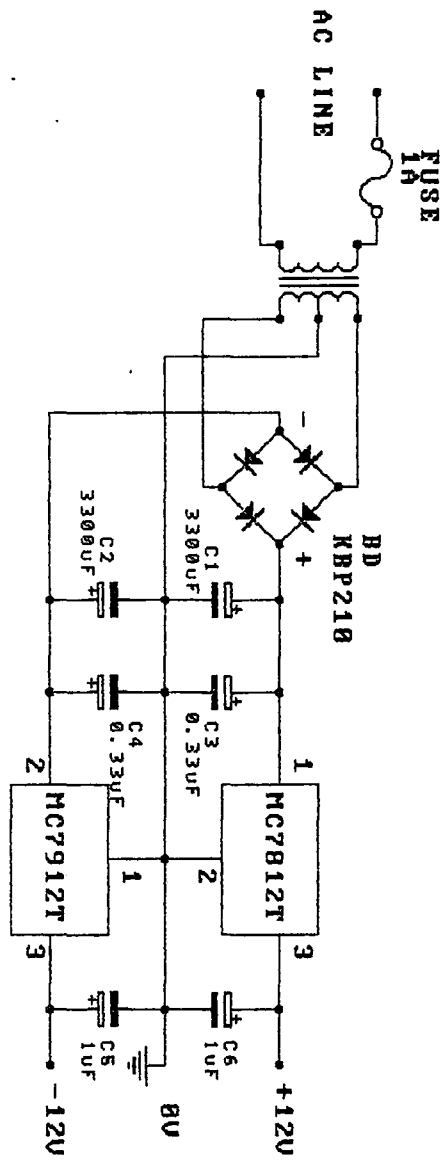
ในที่นี้ใช้ไอซีเบอร์ LM388 ลักษณะการต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 3.9 วงจรขยายเสียงนี้สามารถปรับอัตราขยายได้ตั้งแต่ 20-200 เท่า



รูปที่ 4.9 แสดงวงจรภาคขยายเสียง



รูปที่ 4.10 แสดงวงจรทางภาคแรกที่ใช้ในโครงการ

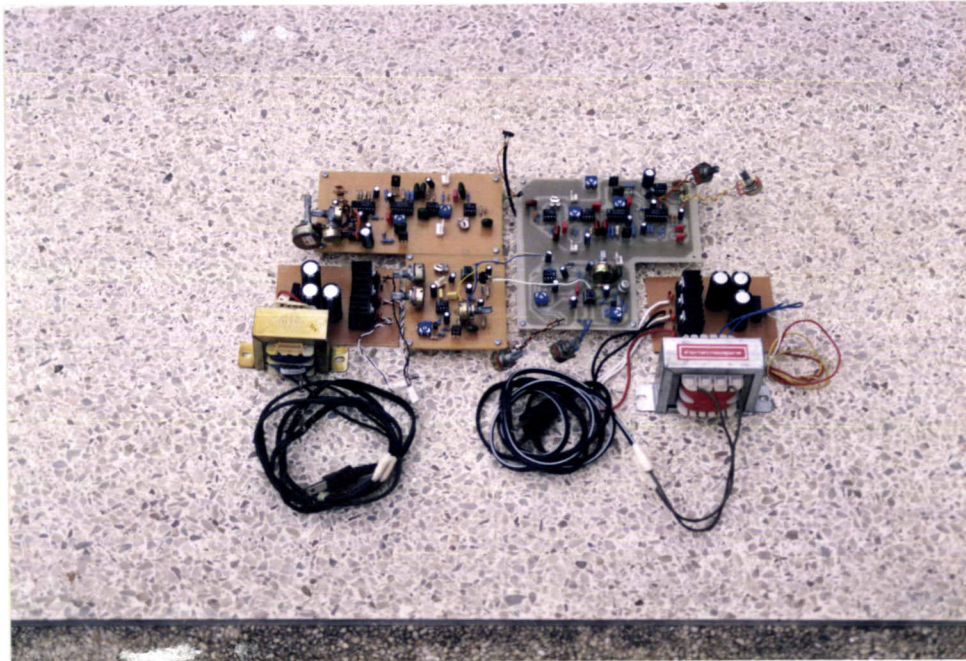


รูปที่ 4.11 แสดงวงจรจ่ายไฟกระแสตรง บวก ลบ 12 โวลต์

บทที่ 5

การดำเนินงานและผลการทดลอง

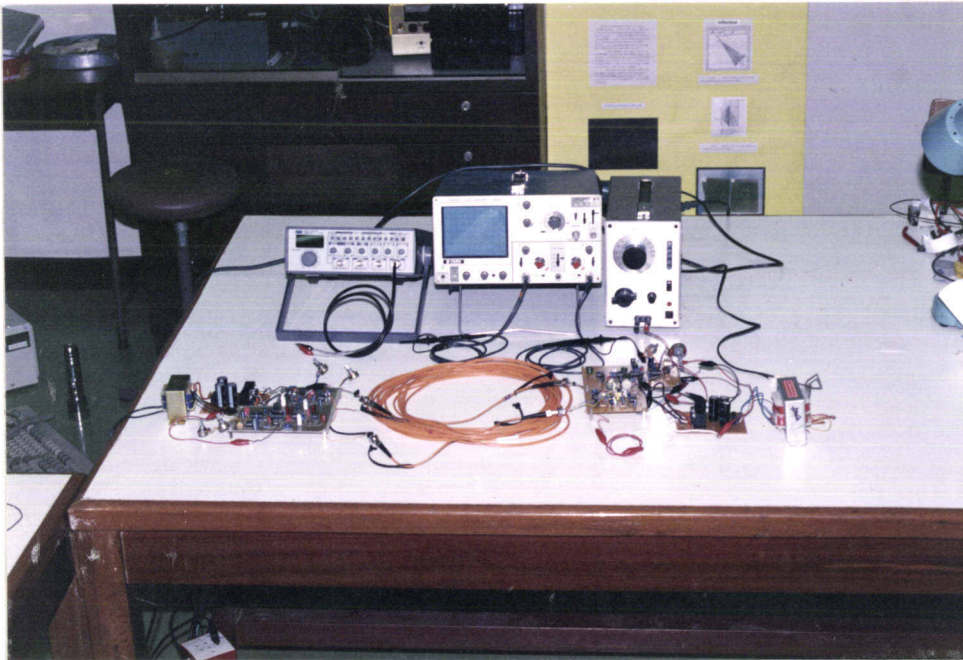
ในบทที่ 5 นี้ จะกล่าวถึงการทดสอบการทำงานของวงจรทางภาคส่ง และวงจรทางภาครับ ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรหลายวงจรดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 โดยทำการทดลองต่ออุปกรณ์ทั้งภาคส่งและภาครับเข้ากับเส้นใยนำแสงซึ่งมีชุด ST Connector เป็นตัวเชื่อมต่อกันระหว่าง LED กับเส้นใยนำแสง และตัว Detector



รูปที่ 5.1 แสดงวงจรต้นแบบทางภาคส่งและภาครับ 2 ชุด



รูปที่ 5.2 แสดงเส้นใยนำแสงและชุด ST Connector ที่ใช้ในโครงการ



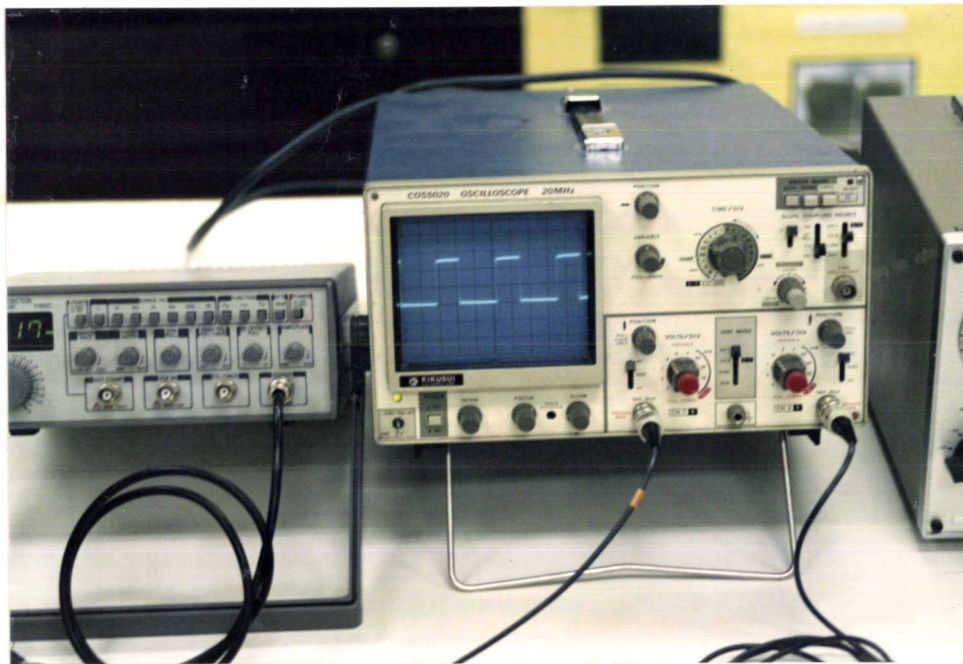
รูปที่ 5.3 แสดงการจัดอุปกรณ์ทั้งหมดรวมไว้ด้วยกัน

5.1 วงจรทางภาคส่ง

5.1.1 ผลการทดลองวงจรทางภาคส่ง

เมื่อทำการต่ออุปกรณ์ทั้งหมดดังรูปที่ 5.3 เสร็จเรียบร้อยแล้ว ทำการทดสอบวงจร โดยให้ระดับกระแสที่ไหลผ่าน LED มีค่า 40 mA และมีศักย์ที่ตกคร่อมประมาณ 1.5 โวลต์ โดยทำการปรับแต่งจากตัวต้านทานปรับค่าได้ VR_4 และ VR_5 จากนั้นทำการหาค่าความถี่ที่ออกมาจากขา 3 ของ LM566 ให้มีความถี่กลาง f_0 ประมาณ 300 KHz ซึ่งหาได้จากการเปลี่ยนแปลงของ Control Voltage ที่ขา 5 (จากการปรับแต่งของ VR_3) ซึ่งจากการทดสอบดูพบว่าเมื่อ Control Voltage มีค่ามากขึ้นจะทำให้ความถี่ที่ออกมาจาก VCO มีค่าน้อยลง (ขณะที่ยังไม่มีสัญญาณอินพุตเข้ามา) และเมื่อ Control Voltage มีค่าน้อยจะทำให้ความถี่มีค่าสูงขึ้น ทำการปรับ VR_3 เพื่อให้ได้ความถี่ 300 KHz จากนั้นวัดรูปคลื่นโดยใช้ออสซิลโลสโคปตรวจดู ซึ่งสามารถแสดงดังในรูปที่

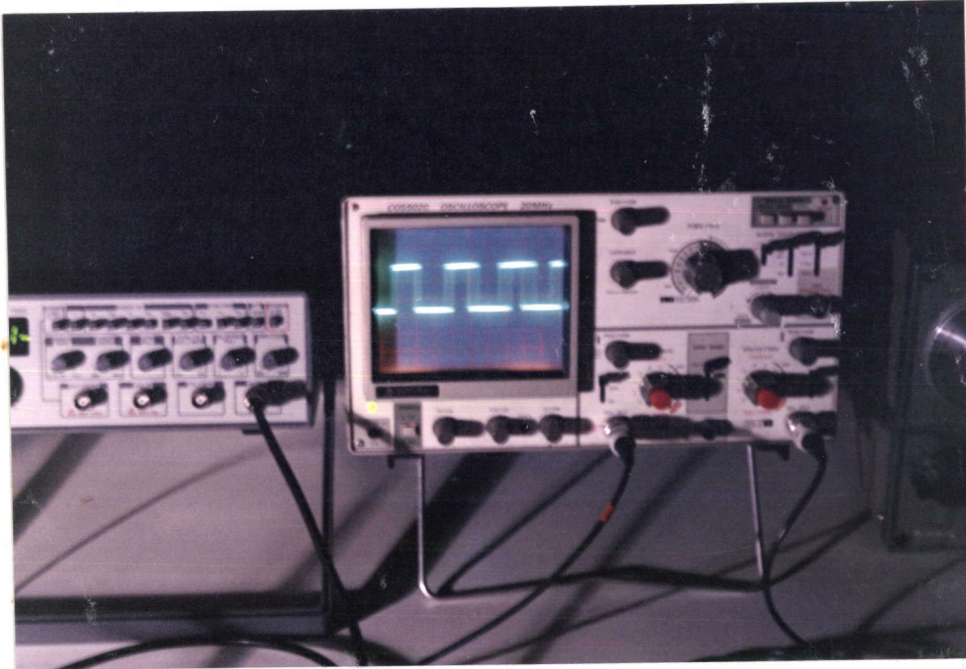
5.4



รูปที่ 5.4 แสดงลักษณะรูปคลื่นที่ความถี่ 300 KHz ในขณะที่ยังไม่มีสัญญาณอินพุตเข้ามา

จากรูปจะเห็นว่า ลักษณะรูปคลื่นที่ได้จะเป็นพัลส์มีขนาดประมาณ $5 V_{p-p}$ เมื่อเราทำการทดสอบโดยป้อนสัญญาณอินพุตเข้าที่วงจรปรับแอมพลิจูด โดยใช้ความถี่ 4500 Hz ซึ่งเป็นความถี่ที่ไม่เกิดความถี่เสียงมนุษย์ จากนั้นทำการปรับอัตราขยายของสัญญาณที่จะนำไปมอดูเลตกับความถี่

พาหะ 300 KHz ให้อยู่ในระดับที่จะไม่ทำให้สัญญาณที่ออกมาจาก VCO เกิดการโอเวอร์มอดูเลต (Overmodulated) ทำการตรวจดูลักษณะของรูปคลื่นที่ขาเอาต์ของ LED จะได้รูปคลื่นที่มีลักษณะแสดงดังในรูปที่ 5.5

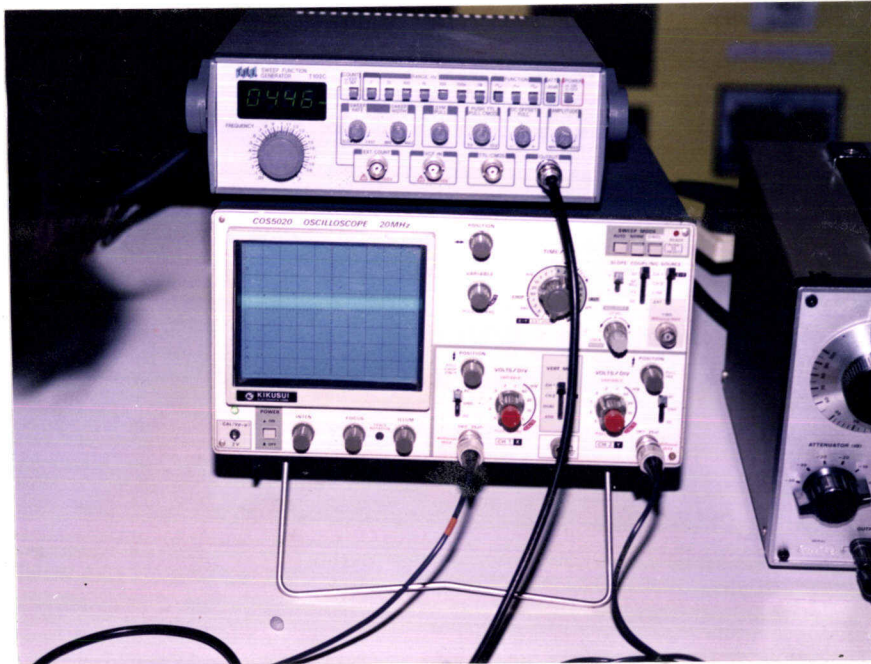


รูปที่ 5.5 แสดงลักษณะรูปคลื่นพาหะ 300 KHz ที่ทำการมอดูเลตทางความถี่กับสัญญาณ Sine 4500 Hz

5.2 วงจรทางภาครับ

5.2.1 ผลการทดลองค้นหา NOISE ของวงจร เมื่อไม่มีแสงมาตกกระทบบนที่ PIN โดโอด

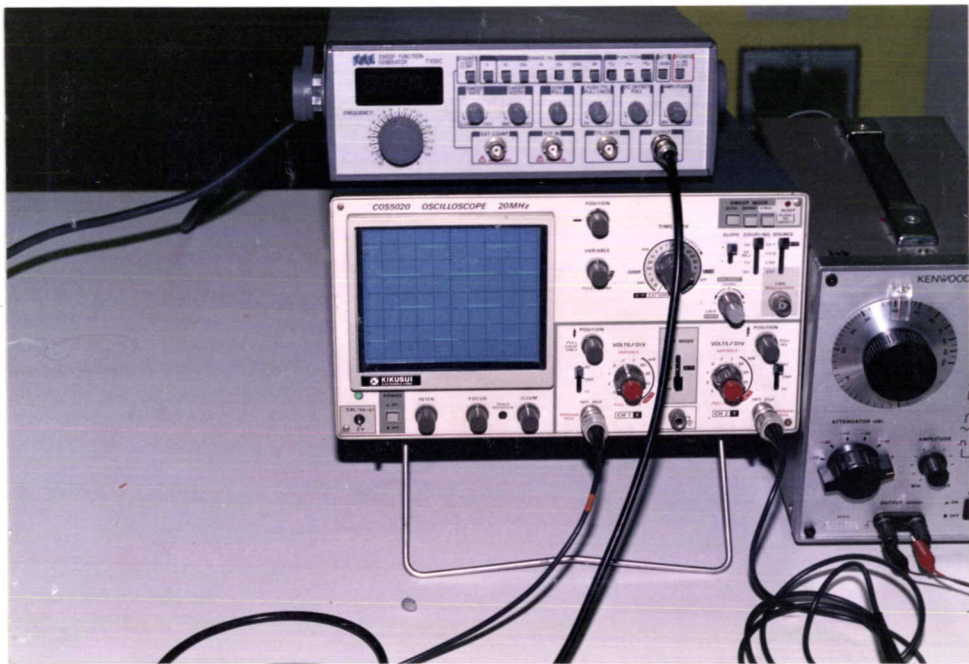
ในด้านวงจรรับเมื่อเราทำการ Reverse Bias และไม่มีแสงมาตกกระทบบนที่ PIN โดโอด จะทำให้ PIN โดโอด ให้กระแสรั่วไหลออกมาค่าหนึ่งซึ่งเรียกกระแสนี้ว่า Dark Current มีค่าประมาณ 2-5 nA ซึ่งค่ากระแสนี้จะคือ Shot Noise ของตัว PIN จากนั้นจะถูกขยายโดยวงจรขยาย ซึ่งวงจรขยายเองนั้นก็จะมี Shot Noise และ Thermal Noise อยู่ภายในตัววงจรของมันเอง ซึ่งสุดท้ายแล้วจะทำให้มี Noise เกิดขึ้นที่เอาต์พุตของวงจรขยายอยู่ที่ระดับหนึ่ง จากการทดลองจะพบว่า Noise ที่เกิดขึ้นตรงเอาต์พุตของวงจรขยายมีค่าที่ประมาณ 50 mV ดังแสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แสดง Noise ของวงจรภาครับเมื่อไม่มีแสงมาตกกระทบบน PIN โดโอด

5.2.2 ผลการทดลองของวงจรขยายสัญญาณเมื่อมีแสงตกกระทบบน PIN โดโอด

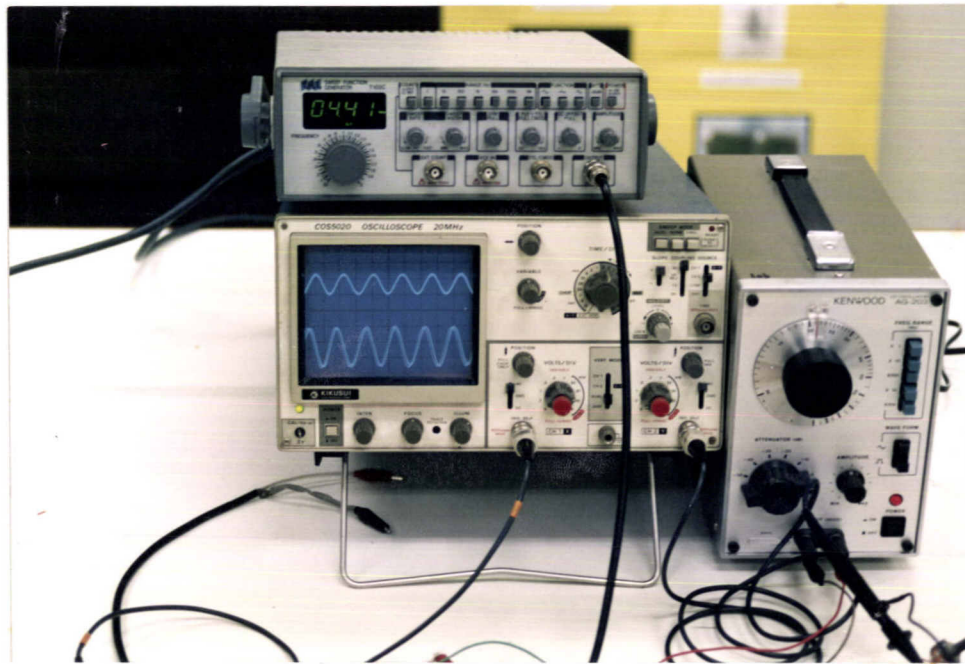
หลังจากที่ทำการแปลงสัญญาณคลื่นมอดูเลตทางความถี่ (สัญญาณไฟฟ้า) เป็นสัญญาณแสงและส่งผ่านเข้าไปในเส้นใยนำแสงแล้ว สัญญาณแสงที่ออกมาอีกปลายด้านหนึ่งของเส้นใยนำแสง จะถูกแปลงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าโดย PIN โดโอด ที่ภาครับ ซึ่ง PIN จะให้สัญญาณออกมาอยู่ในรูปกระแสไม่กึ่งโมดิรแอมป์ จากนั้นจะถูกแปลงเป็นโวลเตจด้วยวงจรภาคก่อนขยาย แต่เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากเอาต์พุตของวงจรภาคก่อนขยายมีขนาดเล็กมาก สัญญาณจะถูกนำไปขยายอีกครั้งโดยวงจรขยายสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณที่ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยสัญญาณที่ได้จะมีลักษณะเหมือนกับสัญญาณในวงจรทางภาคส่ง แต่จะกลับเฟสกัน 180 องศา ซึ่งรูปของสัญญาณเมื่อนำมาเปรียบเทียบกันจะเป็นดังรูปที่ 5.7 โดยรูปสัญญาณข้างบนเป็นของทางภาคส่งและข้างล่างเป็นของทางภาครับ



รูปที่ 5.7 แสดงรูปสัญญาณคลื่นมอดคูเลตทางความถี่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระหว่างทางภาคส่ง และภาครับโดยผ่านเส้นใยนำแสง

5.2.3 ผลการทดลองของวงจรมอดคูเลต

สัญญาณมอดคูเลตทางความถี่ที่ออกมาจากเอาต์พุตของวงจรขยายจะถูกนำมาเข้าวงจรมอดคูเลต โดยใช้เฟสล็อคลูปเป็นตัวมอดคูเลตความถี่สัญญาณ Sine ที่พสมกับสัญญาณพาหะ 300 KHz ที่ส่งจากวงจร เราสามารถทำการปรับช่วงความถี่ของเฟสล็อคลูป ให้ไปล็อกสัญญาณมอดคูเลตทางความถี่ที่เข้ามาทางขาอินพุตได้ โดยทำการปรับตัวต้านทานปรับค่าได้ VR₄ เมื่อเฟสล็อคลูปทำการล็อกได้แล้ว จะให้สัญญาณออกมาซึ่งมีรูปร่างเหมือนกับสัญญาณที่เข้ามาทางอินพุตของวงจรส่ง ซึ่งก็คือสัญญาณ Sine ที่มีความถี่ 4500 Hz จากนั้นจะนำไปขยายสัญญาณอีกครั้งโดยวงจรขยายสัญญาณอลดิโอ ซึ่งเราสามารถแสดงรูปของสัญญาณ Sine โดยนำมาเปรียบเทียบกับได้ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 แสดงรูปสัญญาณคลื่น Sine ที่ความถี่ 4500 Hz โดยรูปคลื่นข้างบนเป็นสัญญาณอินพุตทางด้านวงจรส่ง ส่วนข้างล่างเป็นเอาต์พุตที่ได้จากวงจรขยายสัญญาณออกดีโอสของวงจรรับ

5.2.4 ผลการทดลองสัญญาณเสียง

หลังจากที่ต่อวงจรต่างๆในภาคส่งและภาครับเข้ากับเส้นใยนำแสงดังรูปที่ 5.3 แล้ว ทำการทดลองส่งเสียงเข้าที่อินพุตของวงจรภาคส่งทั้ง 2 ด้าน และทำการมอดูเลตแบบ Pulse Frequency Modulation จากนั้นนำไปที่รับ LED เพื่อเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นแสง ซึ่งเป็นการมอดูเลตแบบ Intensity โดย LED จะให้ความเข้มแสงมากขึ้นหรือน้อยตามสัญญาณอินพุตที่เข้ามา แสงที่ออกจาก LED จะถูกนำผ่านเข้าเส้นใยนำแสง ซึ่งเส้นใยนำแสงที่ใช้ในโครงการนี้มีมีความยาว 10 เมตร แสงที่เป็นพาหะตัวนำสัญญาณเสียงของแต่ละด้านจะเดินทางไปในเส้นใยนำแสงแต่ละเส้น แสงที่ออกจากปลายอีกข้างหนึ่งของเส้นใยนำแสงในแต่ละเส้น จะไปตกกระทบ PIN ไดโอดซึ่งเราทำการ Reverse Bias และจะเปลี่ยนระดับกำลังงานแสงที่รับได้เป็นสัญญาณไฟฟ้าดั้งเดิม จากนั้นจะถูกนำไปขยายและทำการดีมอดูเลตเพื่อจัดความถี่พาหะ 300 KHz ออกไป ซึ่งจะทำได้สัญญาณออกดีโอส สัญญาณนี้จะถูกนำไปขยายอีกครั้งและจะถูกขับเข้าสู่ลำโพง และ

จะได้เสียงออกมาเหมือนเดิม ซึ่งจากการทดลองพบว่าเสียงที่ได้ออกมาจากวงจรภาครับในแต่ละด้าน มีความชัดเจน คมชัด เหมือนกับเสียงที่เราให้เข้าไปทางด้านอินพุตของวงจรส่ง แต่คุณภาพของเสียง ความใส หรือความไพเราะ อาจจะด้อยกว่าเนื่องจากมันมี Noise จากความถี่สูงหรือ Noise ที่เกิดขึ้นภายในวงจรเข้ามาปะปนบ้างเล็กน้อย ทำให้คุณภาพเสียงที่ได้จากวงจรรับ จะสู้เสียงที่มาจากแหล่งกำเนิดเสียงจริง ๆ ของมันไม่ได้ (เช่น เทป, วิทยุ, ไมโครโฟน)

5.2.5 ผลการทดลองหาอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SIGNAL to NOISE RATIO)

จากการทดลองเราเปิดเครื่องรับโดยทำการปิดเครื่องส่ง ซึ่งทำให้ไม่มีแสงมาตกกระทบที่ PIN ไดโอดปรากฏว่าที่เล้าก่อกของวงจรมีสัญญาณออกมาประมาณ 50 mV ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวน เราสามารถหาอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนได้จาก

$$\begin{aligned} \text{SIGNAL/NOISE} &= 20 \log (V_s / V_n) \\ &= 20 \log (6 \text{ V} / 80 \times 10^{-3} \text{ V}) \\ &= 37.50 \text{ dB} \end{aligned}$$

V_s คือ ค่าศักย์ของสัญญาณที่ออกมาที่รับได้หลังจากทำการเปิดเครื่องส่ง = 6 V

V_n คือ ค่าศักย์ของสัญญาณรบกวนที่รับได้หลังจากทำการปิดเครื่องส่ง = 80 mV

ค่าที่ได้แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าไม่สูงมากนัก เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนมาก

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

หลักการสื่อสารสองทางด้วยเส้นใยนำแสงที่ทำขึ้นมาในโครงงานนี้ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการสื่อสาร ซึ่งใช้สัญญาณเสียงเป็นข่าวสารข้อมูล และทำการมอดดูเลตแบบ Pulse Frequency Modulation สัญญาณที่ผ่านการมอดดูเลตแล้วจะถูกนำไปขับ LED โดยมีเส้นใยนำแสงเป็นตัวกลางในการนำพาหะข้อมูล การทำงานของการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงจะเป็นการสื่อสารแบบคู่เพิล็กซ์ คือสามารถส่งและรับสัญญาณเสียงได้ภายในเวลาเดียวกัน โดยวงจรที่ใช้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

6.1 วงจรภาคส่ง

จะทำการแปลงเสียงเป็นสัญญาณไฟฟ้า และทำการขยายสัญญาณให้ได้อยู่ในระดับที่วงจรภาคถัดไป คือภาคมอดดูเลตสามารถทำการมอดดูเลตสัญญาณได้ แต่จะต้องไม่เกินระดับที่จะทำให้เกิดการโอเวอร์มอดดูเลต (Overmodulate) ในส่วนนี้จะใช้ VCO เป็นตัวผสมสัญญาณเสียงเข้ากับความถี่พาหะ 300 KHZ สัญญาณที่ได้ออกมาจะเป็นแบบ Pulse Frequency Modulation จากนั้นจะนำไปขับ LED เพื่อแปลงเป็นสัญญาณแสงและนำเข้าสู่เส้นใยนำแสง

6.2 วงจรภาครับ

แสงที่ออกมาจากเส้นใยนำแสงจะตกกระทบกับ PIN ไดโอด ซึ่ง PIN จะแปลงสัญญาณแสงเป็นกระแส ซึ่งมีค่าไม่กีไมโครแอมป์ จากนั้นกระแสจะถูกแปลงให้เป็นโวลเตจโดยวงจรภาคก่อนขยาย และนำโวลเตจที่ได้ไปขยายอีกครั้งโดยวงจรขยาย สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากเอาต์พุตของวงจรขยายนั้น จะมีลักษณะเหมือนเดิมกับสัญญาณมอดดูเลตทางความถี่ในวงจรภาคส่ง จากนั้นสัญญาณนี้จะถูกนำไปคิมมอดดูเลต ซึ่งในที่นี้ใช้เฟสล็อคลูปเป็นตัวคิมมอดดูเลต เอาท์พุทที่ได้ออกมาจากเฟสล็อคลูปคือสัญญาณออไดโอ จากนั้นจะนำไปขยายอีกครั้งโดยวงจรขยาย และนำไปขับลำโพงซึ่งจะได้เสียงออกมาดังเดิม

6.3 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลที่ได้จากการทดลอง ผลที่ได้ยังไม่ดีนักแต่ก็เป็นที่น่าพอใจเนื่องจากการออกแบบวงจร

การเลือกใช้อุปกรณ์ยังไม่ดีพอ หรือการใช้ความถี่ที่เข้ามาเกือวข้องซึ่งเป็นคลื่นพาหะที่มีค่าประมาณ 300 KHz ซึ่งเป็นความถี่สูงพอควร ซึ่งทำให้เกิด Noise ที่เกิดจากความถี่สูงทางด้านวงจรส่งเข้าไปในไฟเลี้ยงและเข้าไปกวนในวงจรรับที่อยู่ด้านเดียวกัน ซึ่งจะทำให้สัญญาณเสียงที่ได้ออกมาจะมีเสียงซ่าออกมาบ้างเล็กน้อย

สำหรับแนวทางการแก้ไขปัญหา ก็คืออาจจะเพิ่มวงจร Band Pass Filter เข้าไปในส่วนวงจรภาครับ เพื่อกรองเอาเฉพาะย่านความถี่ที่ต้องการ และลดสัญญาณรบกวนหรือสัญญาณที่มีความถี่นอกเหนือไปจากย่านความถี่ที่ต้องการ หรืออาจจะเปลี่ยนเป็นใช้การส่งแบบดิจิตอลหรือแบบ Pulse Code Modulation (PCM) ซึ่งการส่งแบบ PCM นี้เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการสื่อสารโทรศัพท์ทั่ว ๆ ไป วิธีนี้มีข้อดีคือ สามารถลดสัญญาณรบกวนของระบบลงไปได้มาก คุณภาพของสัญญาณที่ได้กลับคืนมาดี และมีอัตราการส่งข้อมูลที่ไม่สูงมากนัก (ประมาณ 64 Kbs)

ในการนำเอาอุปกรณ์ในโครงงานนี้ไปใช้ประโยชน์ในการสื่อสาร ถ้าต้องการให้มีคุณสมบัติที่ดีจริง ๆ จะต้องพัฒนาอีกหลายด้าน ซึ่งควรจะเอาอุปกรณ์นี้มาพัฒนาต่อไปเพื่อให้ได้คุณภาพที่น่าพอใจมากยิ่งขึ้น เช่น สามารถส่งสัญญาณภาพ เสียง ข้อมูลไปมาได้พร้อมกัน หรือทำการส่งแบบมัลติเพล็กซ์แบบต่าง ๆ ซึ่งในโครงงานนี้อาจถือได้ว่าเป็นพื้นฐานของการสื่อสารในระบบเส้นใยนำแสง ซึ่งในอนาคตระบบนี้มีแนวโน้มที่จะเข้ามาแทนที่ระบบการสื่อสารแบบเก่า ซึ่งจะทำให้การสื่อสารในประเทศไทยก้าวหน้าทัดเทียมกับประเทศอื่น ๆ ได้

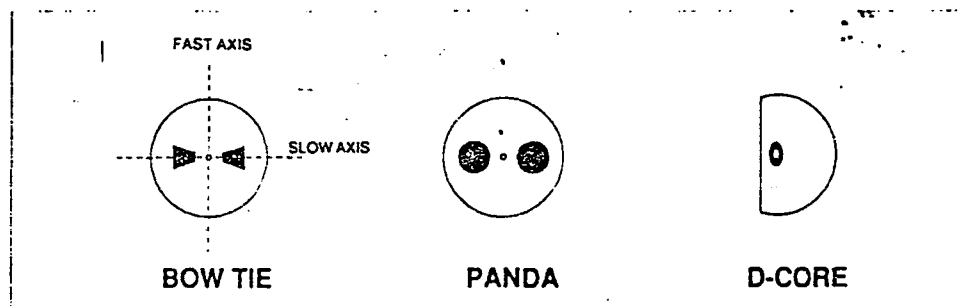
ภาคผนวก ก.

TYPES OF FIBERS

There are numerous types of optical fibers available commercially. A very brief summary of some of the key fibers is given below.

- Step-Index fibers have a core diameter of 50 to 1000 μm . They are low cost, easy to use, but are limited in bandwidth. *(They are not generally used for data transmission)*
- Graded-Index fibers have core diameters of 50, 62.5, 100 and 200 μm . They have good bandwidth capabilities ranging up to ~ 800 MHz/Km and are easy to work with.
- Singlemode fibers have core diameters from 3.5 to 10 μm , depending on the wavelength to be used. They support only one guided mode in the fiber and are capable of very high bandwidths *(chromatic dispersion limits the bandwidth)*. Typical cladding diameter is 125 μm , although 80 μm cladding is also available.
- Polarization-preserving fibers are basically singlemode or few mode waveguides. These fibers can hold the polarization state of light launched into them if the proper orientation of the source is maintained. Applications include fiber gyroscopes, fiber interferometers and coherent communications. Three types of polarization preserving fibers are shown below.

Cross-section of three types of Polarization Preserving Fibers.



- A number of special fibers *(such as dispersion shifted fibers, doped fibers and fluorocarbon based fibers)* are available for specialized and R&D applications.

FIBER PARAMETERS

Information on performance characteristics of the optical fibers is usually provided by the manufacturers in terms of their geometrical, optical and environmental parameters.

A listing of some of the basic optical fiber parameters is given below.

- The cladding diameter is generally 125 μm .
- Core diameters are commonly 50 μm , 62.5 μm or 100 μm for multimode fiber.
- Cladding non-circularity is usually about 3%.
- NA - Numerical aperture is defined as the sine of half the maximum angle of acceptance at which a light ray can enter and remain confined within the core of a fiber. This can be directly determined by measuring the emergence angle of light exiting the fiber or computed from $NA = \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{cladding}}^2}$.
- V - number (or normalized frequency) gives a measure of light propagation conditions in a fiber. A step index fiber becomes singlemode for a given wavelength when $V \leq 2.405$. One can calculate V using :

$$V = \frac{2\pi (NA) a}{\lambda}$$

$$= \frac{\pi\sqrt{8}}{\lambda} a n_{\text{core}} \sqrt{\Delta}$$

where:

a = fiber core radius

λ = wavelength of light

NA = numerical aperture

$$\Delta = (n_{\text{core}} - n_{\text{cladding}}) / n_{\text{core}}$$

$$= 2 \times 10^{-3} \text{ (singlemode fiber, typ.)}$$

$$= 2 \times 10^{-2} \text{ (multimode fiber, typ.)}$$

Typical NA's are: Step Index Fiber - 0.3 - 0.4

Graded Index Fiber - 0.2

Singlemode Fiber - 0.1

Thus, for the fiber to propagate only one mode, we can use $\lambda_{\text{cut-off}} = 0.58 (a/V)$ to give:

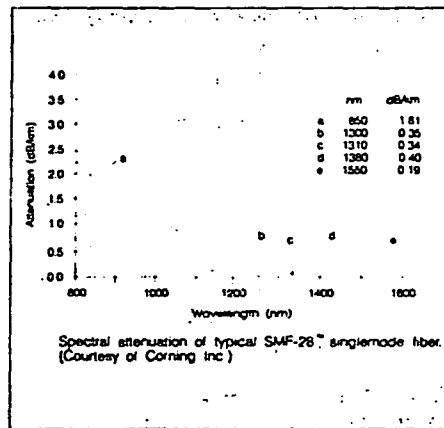
<u>Wavelength</u>	<u>Approx. Core Diameter (2a)</u>
670 nm	3.0 μm
780-850 nm	5.0 μm
1,300 nm	9.0 μm
1,550 nm	10.0 μm

- Attenuation of light in the fiber is the result of scattering by microscopic non-uniformities in the refractive index and by absorption on unwanted material in the fiber. This causes an exponential decay of optical power along the fiber described by:

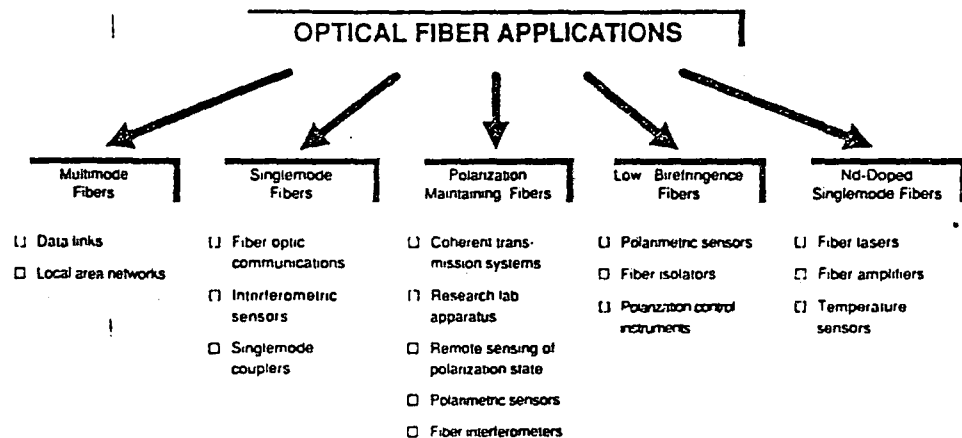
$$P(z) = P_0 \exp(-\alpha z)$$

where $P(z)$ is optical power at distance z from the input,
 P_0 is optical power at the fiber input, and
 α is the absorption coefficient (in 1/km, but often stated dB/km)

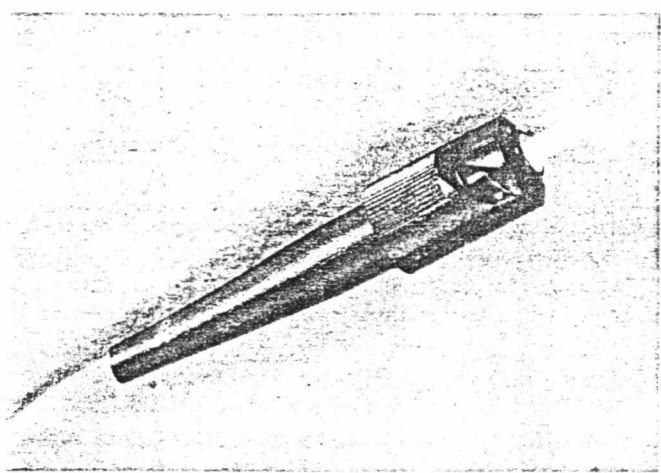
The graph below shows the typical attenuation for a singlemode fiber.



Attenuation is the amount of light power lost as light travels along a fiber, typically expressed in dB/km.



908 Series MST (ST® Style) Fiber Optic Connectors



Methode 908 Series ST® Style interconnects are optically and mechanically intermateable with AT&T ST® products and all other functional equivalents.

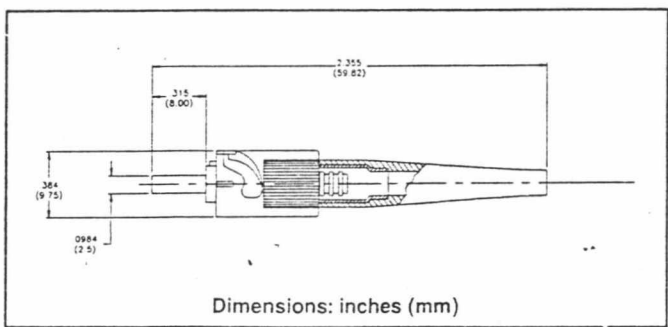
MST connectors feature a precision-molded reinforced composite polymer body construction for superior environmental toughness, corrosion and chemical resistance, and dimensional stability in comparison to conventional cast metal materials.

The MST connector rear body has a universal configuration which accommodates all tight and loose tube buffer cables and breakout kits with O.D.s from 250 microns up to 4.5 mm.

Methode offers the MST with a variety of ceramic and polymer (LCP) fiber alignment ferrules, hole sizes, and bond relief boot colors. Methode's unique universal dust cap with lanyard makes sure that protection stays with your connection throughout its service life. Whether the application is indoor, outdoor, communications networking, or biomedical, Methode has an MST to closely match your fiber size, performance requirements, and budget.

Features

- Coupling nut radial track minimizes the rotation needed to mate the connector
- Single mode and multimode versions available
- Accommodates tight and loose tube buffer cables with jacket ODs up to 4.5 mm
- Ceramic ferrules are configured for easy hand or machine PC and "Super" PC polishing
- Optional boot colors available: blue, white, red, beige (in addition to standard black, gray, and yellow boots)
- Polymer ferrule pedestal supports fiber during polishing — no epoxy bead
- Polymer ferrules are available for a variety of fiber sizes from 125 micron to 1.1 mm cladding diameter
- Standard .178", .151" hex crimp
- Tested in accordance with Bellcore TR-TSY-000326
- Universal dust cap with lanyard (fits ST, SC, and FC connectors)



- ST® Connector Termination Kit (US): 900-118-3010
- ST® Connector Termination Kit, 220V: 900-118-3014
- ST® Connector Polishing Disk: 900-118-9002
- ST® Termination Video Tape (US): 900-118-9004
- ST® Termination Video Tape (European): 900-118-9005

- Consumables Replacement Kit (100 Terminations): 900-118-9017
- "Super" PC Polishing Consumables Replacement Kit (500 Terminations): 900-118-9020

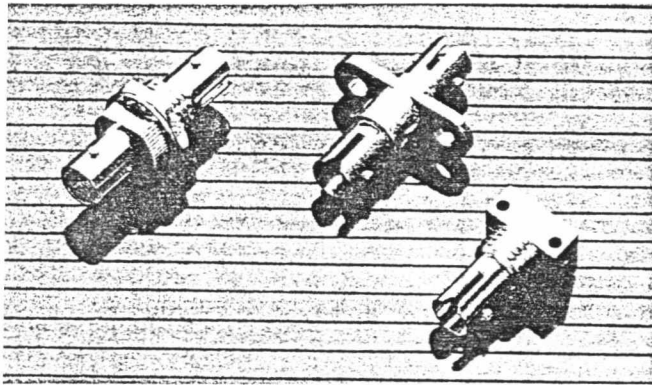
Performance Characteristics

Ferrule Type	Fiber Size (microns)	Insertion Loss (dB)		Operating Temperature (°C)	Part Number (Individually Packaged)*
		Typical	Max Increase 500 Cycles		
Ceramic (Zirconia)	9/125	<0.2	<0.1	-40 to +85	O3-002-1
Ceramic	62.5/125	<0.2	<0.1	-40 to +85	Q3-002-3
Ceramic	62.5/125+	<0.4	<0.1		Q3-503-3
Polymer	62.5/125	<0.4	<0.1	-40 to +85	R3-002-3
Polymer	62.5/125+	<0.4	<0.1		R3-002-4
Polymer	100/140	<0.3	<0.1		R3-002-5
Polymer	230	<0.3	<0.1		R3-002-6
Polymer	500	<0.3	<0.1		R3-002-7
Polymer	1,000	<0.3	<0.1		R3-002-8

*For bulk packaging, add "-B" suffix to part number. For connectors with traditional dust cap rather than universal dust cap with lanyard add "N" suffix.

®Registered trademark of AT&T

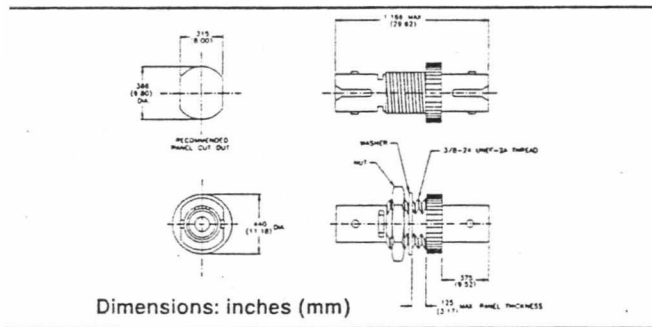
908 Series ST[®] Style Couplings and Receptacles



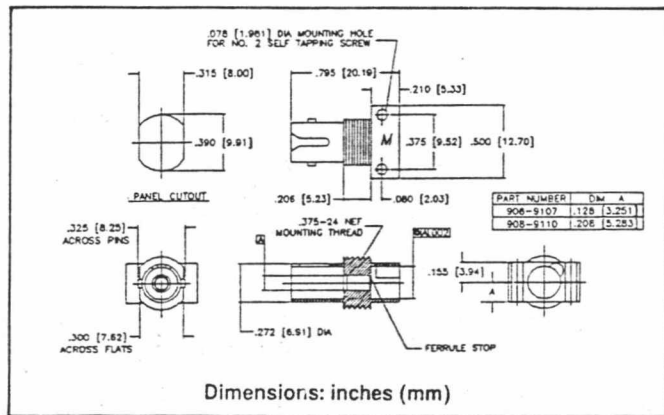
Methode Couplings are available in single mode and multimode formats. Single mode couplings employ a precision zirconia alignment sleeve and multimode couplings utilize a precision polymer alignment sleeve. Threaded couplings also include a panel nut and lock washer.

Methode device receptacles house standard TO-18, TO-46, and TO-52 active devices and can be mounted in a variety of board and panel configurations. A panel nut, lock washer, dust cap and No. 2 mounting screws are included with each receptacle.

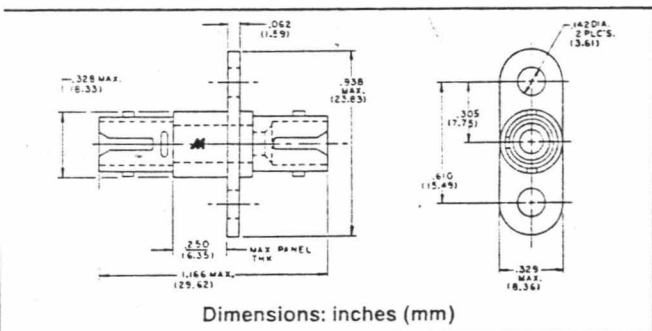
Threaded Coupling



Receptacle



Bulkhead Coupling



Receptacles

Description	Part Number*
Low profile active device receptacle	908-9107
Standard profile active device receptacle	908-9110
Device alignment ring (optional)	908-121-9050

*For 100 piece bulk packaging, add "-B" suffix to part number

Note: In-Line (no flange) Coupling not pictured



FAR EAST PTE LTD

A subsidiary of Methode Electronics Inc., U.S.A.

FIBER OPTIC PRODUCTS

37, Tuas Avenue 2 Jurong Town Singapore 2263
Tel: 8615444 (5 lines) Tlx: RS 34422 MEFEX Fax: 8614777

7444 West Wilson Avenue • Chicago, IL 60656
708/867-9600 • 800/323/6858 • FAX: 708/867-9130

ST[®] is a registered trademark of AT&T
Data contained herein is believed to be accurate as of publication date. Methode Electronics reserves the right to make changes which will improve performance without altering form or fit. Consult factory for current engineering drawings and data.

Alignment Sleeve	Material Housing (Nickel Plated)	Style	Part Number*
Polymer	Die Cast Zinc	Threaded	908-213-01
Zirconia	Die Cast Zinc	Threaded	908-113-01
Polymer	Plated Composite	Threaded	908-203-01
Zirconia	Plated Composite	Threaded	908-103-01
Polymer	Plated Composite	Bulkhead	908-202-01
Zirconia	Plated Composite	Bulkhead	908-102-01
Polymer	Plated Composite	In-line	908-101-01
Zirconia	Plated Composite	In-line	908-201-01

*For 100 piece bulk packaging, add "-B" suffix to part number.

ภาคผนวก ข.



MOTOROLA

NE565A

PHASE-LOCKED LOOP

**SILICON MONOLITHIC
INTEGRATED CIRCUITS**



PHASE-LOCKED LOOP

The NE565A is designed for general-purpose phase-locked loop applications to 500 kHz.

- Stable Center Frequency – 200 ppm/°C (Typ)
- Flexible Power Supply Range – ±5 to ±12 Volts with Small Frequency Drift – 100 ppm/% (Typ)
- Low Total Harmonic Distortion of Demodulator Output – 1.5% (Max)
- Linear Triangle Wave Output – 0.5% (Typ)
- TTL, DTL Compatible Inputs and Outputs
- Adjustable Hold In Range – ±1% to >±60%.

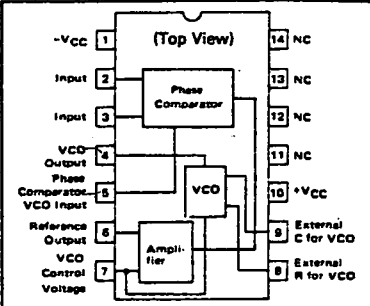
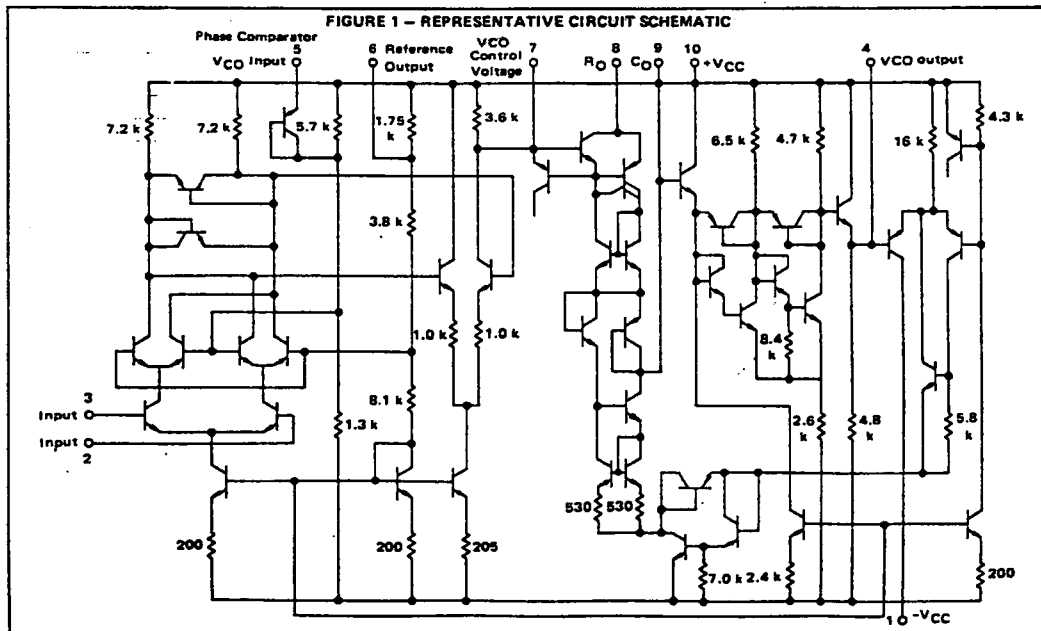


FIGURE 1 – REPRESENTATIVE CIRCUIT SCHEMATIC



MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES

6

FIGURE 3 - POWER SUPPLY CHARACTERISTICS

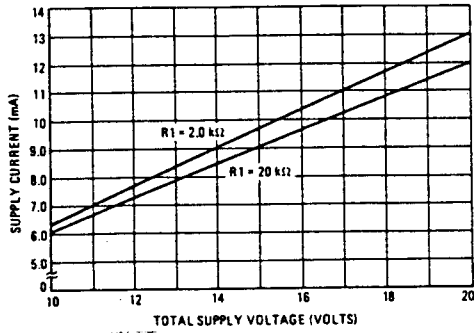


FIGURE 4 - VCO CONVERSION GAIN

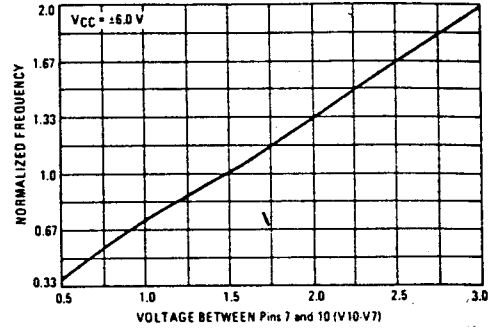


FIGURE 5 - LOCK RANGE versus INPUT VOLTAGE

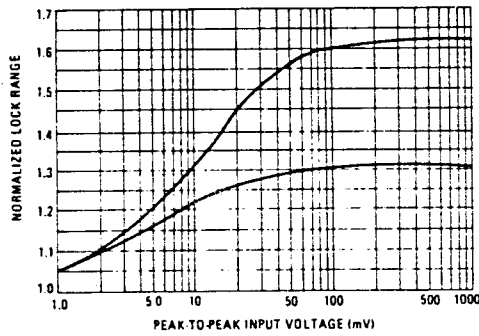


FIGURE 6 - OSCILLATOR OUTPUT WAVEFORMS

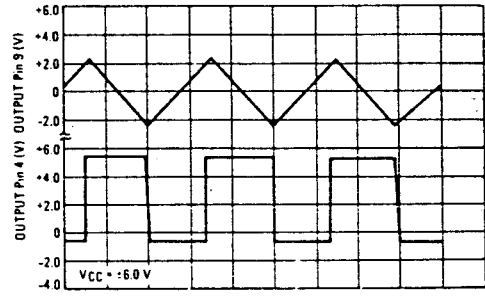


FIGURE 7 - LOCK RANGE (As a Function of Gain Setting Resistance)

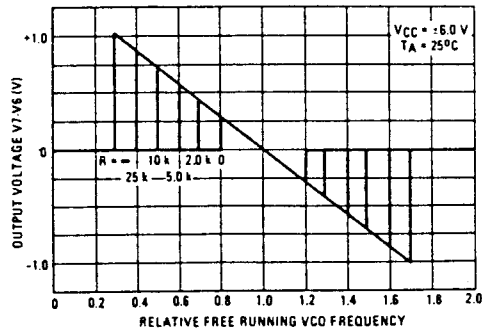
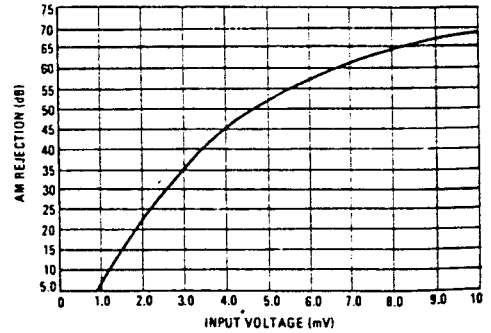


FIGURE 8 - AM REJECTION CHARACTERISTICS



6

NE565A

GENERAL APPLICATIONS INFORMATION

The following formulas are useful when designing with the NE565A:

1. Center Frequency —
$$f_0 \approx \frac{1}{3.7 R_0 C_0}$$

Where: f_0 is the frequency of the VCO without input signal. For R_0, C_0 circuit location see Figure 2.

2. Loop Gain — $K_0 K_D A$

Definitions:

K_0 — VCO Conversion Gain — the conversion factor between VCO frequency and control voltage.

$$K_0 = 4.12 f_0 \text{ (units are in radians/sec/volt)}$$

Example: for VCO Sensitivity @ 10 kHz (in Hz/volt)

$$K_0 = \frac{4.12 \times 10^4}{2\pi \text{ radians}} = 6600 \text{ Hz/Volt}$$

K_D — Phase Detector Gain Factor — the conversion factor between the phase detector output voltage and the phase difference between input and VCO signals. Units are in volts/radian.

$$K_D = \frac{8.1 \cdot A}{V_{CC}}$$

Where: $A = f(R_6 \text{ to } R_7)$

$$\text{Hence: } K_D = \frac{8.1}{V_{CC}} [f(R_6 \text{ to } R_7)]$$

Where: V_{CC} is total system supply voltage, $f(R_6 \text{ to } R_7)$ is internal amplifier gain (See Figure 9). V_{CC} — total supply voltage to the circuit.

3. Lock Range — $f_L = \pm \frac{8f_0}{V_{CC}}$

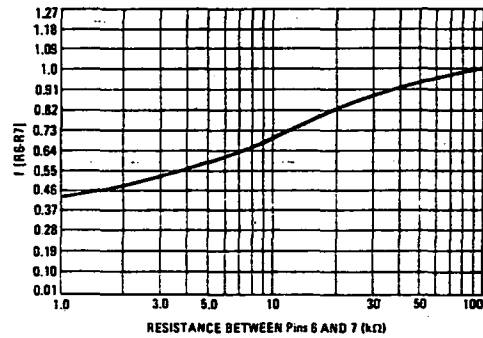
Where: f_L is the range of frequencies in the area of f_0 over which the VCO, once locked to the input signal, will remain locked.

4. Capture Range — $f_c \approx \pm \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\pi f_L}{\tau}}$

Where: f_c is that range of frequencies around f_0 over which the loop will acquire lock with an input signal initially starting out of lock.

(τ = Time Constant at Pin 7)

FIGURE 9 — INTERNAL AMPLIFIER GAIN CHARACTERISTICS





Industrial Blocks

LM566/LM566C Voltage Controlled Oscillator

General Description

The LM566/LM566C are general purpose voltage controlled oscillators which may be used to generate square and triangular waves, the frequency of which is a very linear function of a control voltage. The frequency is also a function of an external resistor and capacitor.

The LM566 is specified for operation over the -55°C to +125°C military temperature range. The LM566C is specified for operation over the 0°C to +70°C temperature range.

Features

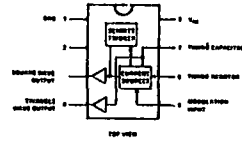
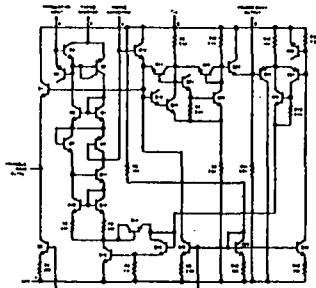
- Wide supply voltage range: 10 to 24 volts
- Very linear modulation characteristic

- High temperature stability
- Excellent supply voltage rejection
- 10 to 1 frequency range with fixed capacitor
- Frequency programmable by means of current, voltage, resistor or capacitor.

Applications

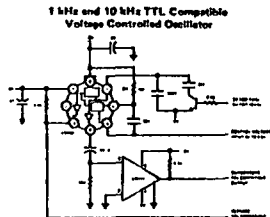
- FM modulation
- Signal generation
- Function generation
- Frequency shift keying
- Tone generation

Schematic and Connection Diagrams



Order Number LM566CN
See NS Package N008

Typical Application



Applications Information

The LM566 may be operated from either a single supply as shown in this test circuit, or from a split (±) power supply. When operating from a split supply, the square wave output (pin 4) is TTL compatible (2 mA current sink) with the addition of a 4.7 kΩ resistor from pin 3 to ground.

A .001 μF capacitor is connected between pins 5 and 6 to prevent parasitic oscillations that may occur during VCO switching.

$$f_o = \frac{2(V^+ - V_B)}{R_1 C_1 V^+}$$

where
2K < R₁ < 20K
and V_B is voltage between pin 5 and pin 1

LM566/LM566C

Absolute Maximum Ratings

Supply Voltage	±12V
Power Dissipation (Note 1)	300 mW
Differential Input Voltage	±1V
Operating Temperature Range LM565H	-55°C to +125°C
LM565CH, LM565CN	0°C to 70°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 sec)	300°C

Electrical Characteristics (AC Test Circuit, T_A = 25°C, V_C = ±6V)

PARAMETER	CONDITIONS	LM565			LM565C			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Power Supply Current			8.0	12.5		12.5		mA
Input Impedance (Pins 2, 3)	-4V < V ₂ , V ₃ < 0V	7	10			5		kΩ
VCO Maximum Operating Frequency	C ₁ = 2.7 pF	300	500		250	500		kHz
Operating Frequency Temperature Coefficient			-100	300		-200	500	ppm/°C
Frequency Drift with Supply Voltage			0.01	0.1		0.05	0.2	%/V
Triangle Wave Output Voltage		2	2.4	3	2	2.4	3	V _{pp}
Triangle Wave Output Linearity			0.2	0.75		0.5	1	%
Square Wave Output Level		4.7	5.4		4.7	5.4		V _{pp}
Output Impedance (Pin 4)			5			5		kΩ
Square Wave Duty Cycle		45	50	55	40	50	60	%
Square Wave Rise Time			20	100		20		ns
Square Wave Fall Time			50	200		50		ns
Output Current Sink (Pin 4)		0.8	1		0.8	1		mA
VCO Sensitivity	f _o = 10 kHz	6400	6600	6800	6000	6600	7200	Hz/V
Demodulated Output Voltage (Pin 7)	±10% Frequency Deviation	250	300	350	200	300	400	mV _{pp}
Total Harmonic Distortion (Pin 7)	±10% Frequency Deviation		0.2	0.75		0.2	1.5	%
DC Level (Pin 7)		4.25	4.5	4.75	4.0	4.5	5.0	V
Output Offset Voltage (V ₇ - V _B)			30	100		50	200	mV
Temperature Drift of (V ₇ - V _B)			500			500		μV/°C
AM Rejection		30	40		40	50		dB
Phase Detector Sensitivity K _D		0.6	.68	0.9	0.55	.68	0.95	V/radian

Note 1: The maximum junction temperature of the LM565 is 150°C, while that of the LM565C and LM565CH is 100°C. For operation at elevated temperatures, devices in the TO-5 package must be derated based on a thermal resistance of 150°C/W junction to ambient or 45°C/W junction to case. Thermal resistance of the dual in line package is 100°C/W.

LM565/LM565C

Absolute Maximum Ratings

Power Supply Voltage	28V
Power Dissipation (Note 1)	700 mW

LM565/LM565C



OP-37

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

Precision Monolithics Inc.

FEATURES

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

ORDERING INFORMATION †

V_{OS} MAX (mV)	PACKAGE				OPERATING TEMPERATURE RANGE
	TO-99	CERDIP 8-PIN	PLASTIC 8-PIN	LCC 20-CONTACT	
25	OP37AJ*	OP37AZ*	-	-	MIL
25	OP37EJ	OP37EZ	OP37EP	-	IND/COM
60	OP37BJ*	OP37BZ*	-	OP37BRC/883	MIL
60	OP37FJ	OP37FZ	OP37FP	-	IND/COM
100	OP37CJ*	OP37CZ	-	-	MIL
100	OP37GJ	OP37GZ	OP37GP	-	XIND
100	-	-	OP37GS††	-	XIND

* For devices processed in total compliance to MIL-STD-883, add /883 after part number. Consult factory for 883 data sheet.

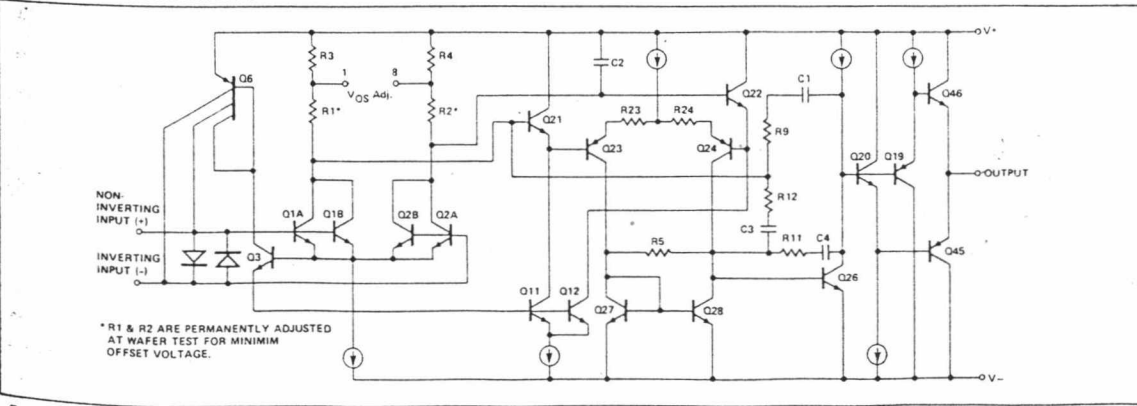
† Burn-in is available on commercial and industrial temperature range parts in CerDIP, plastic DIP, and TO-can packages. For ordering information, see 1990/91 Data Book, Section 2.

†† For availability and burn-in information on SO package, contact your local sales office.

GENERAL DESCRIPTION

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

SIMPLIFIED SCHEMATIC

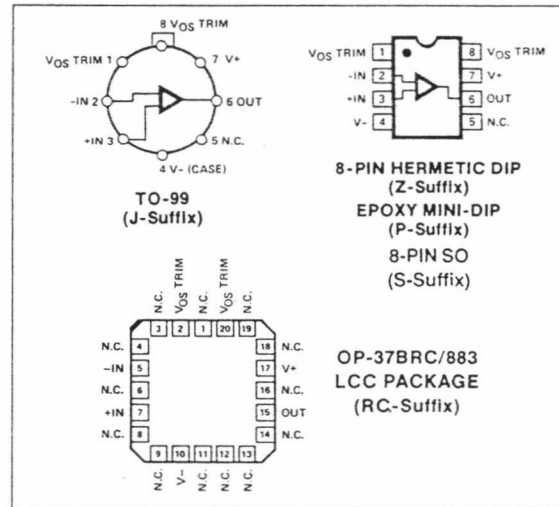


The OP-37 provides the low offset and drift of the OP-07 plus higher speed and lower noise. Offsets down to 25 μV and drift of 0.6 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ maximum make the OP-37 ideal for precision instrumentation applications. Exceptionally low noise ($e_n = 3.5\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 10Hz),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

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

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

PIN CONNECTIONS



5 OPERATIONAL AMPLIFIERS/BUFFERS

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

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

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

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Note 4)

Supply Voltage	$\pm 22V$
Internal Voltage (Note 1)	$\pm 22V$
Output Short-Circuit Duration	Indefinite
Differential Input Voltage (Note 2)	$\pm 0.7V$
Differential Input Current (Note 2)	$\pm 25mA$
Storage Temperature Range	$-65^{\circ}C$ to $+150^{\circ}C$

Operating Temperature Range

OP-37A, OP-37B, OP-37C (J, Z, RC)	$-55^{\circ}C$ to $+125^{\circ}C$
OP-37E, OP-37F (J, Z)	$-25^{\circ}C$ to $+75^{\circ}C$
OP-37E, OP-37F (P)	$0^{\circ}C$ to $+75^{\circ}C$
OP-37G (P, S, J, Z)	$-40^{\circ}C$ to $+125^{\circ}C$

Lead Temperature Range (Soldering, 60 sec)

Junction Temperature

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

NOTES:

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

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

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	OP-37A/E			OP-37B/F			OP-37C/G		
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX
Input Offset Voltage	V_{OS}	Note 1)	—	10	25	—	20	60	—	30	100
Long-Term V_{OS} Stability	$V_{OS}/Time$	Notes 2, 3)	—	0.2	1.0	—	0.3	1.5	—	0.4	2.0
Input Offset Current	I_{OS}		—	7	35	—	9	50	—	12	75
Input Bias Current	I_B		—	± 10	± 40	—	± 12	± 55	—	± 15	± 80
Input Noise Voltage	e_{np-p}	0.1Hz to 10Hz (Notes 3, 5)	—	0.08	0.18	—	0.08	0.18	—	0.09	0.25
Input Noise Voltage Density	e_n	$f_O = 10Hz$ (Note 3)	—	3.5	5.5	—	3.5	5.5	—	3.8	8.0
		$f_O = 30Hz$ (Note 3)	—	3.1	4.5	—	3.1	4.5	—	3.3	5.6
		$f_O = 1000Hz$ (Note 3)	—	3.0	3.8	—	3.0	3.8	—	3.2	4.5
Input Noise Current Density	i_n	$f_O = 10Hz$ (Notes 3, 6)	—	1.7	4.0	—	1.7	4.0	—	1.7	—
		$f_O = 30Hz$ (Notes 3, 6)	—	1.0	2.3	—	1.0	2.3	—	1.0	—
		$f_O = 1000Hz$ (Notes 3, 6)	—	0.4	0.6	—	0.4	0.6	—	0.4	0.6
Input Resistance — Differential-Mode	R_{IN}	Note 7)	1.3	6	—	0.94	5	—	0.7	4	—
Input Resistance — Common-Mode	R_{INCM}		—	3	—	—	2.5	—	—	2	—
Input Voltage Range	IVR		± 11.0	± 12.3	—	± 11.0	± 12.3	—	± 11.0	± 12.3	—
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$V_{CM} = \pm 11V$	114	126	—	106	123	—	100	120	—
Power Supply Rejection Ratio	PSSR	$V_S = \pm 4V$ to $\pm 18V$	—	1	10	—	1	10	—	2	20
Large-Signal Voltage Gain	A_{VO}	$R_L \geq 2k\Omega$, $V_O = \pm 10V$	1000	1800	—	1000	1800	—	700	1500	—
		$R_L \geq 1k\Omega$, $V_O = \pm 10V$	800	1500	—	800	1500	—	400	1500	—
		$R_L = 600\Omega$, $V_O = \pm 1V$, $V_S = \pm 4V$, Note 4	250	700	—	250	700	—	200	500	—
Output Voltage Swing	V_O	$R_L \geq 2k\Omega$	± 12.0	± 13.8	—	± 12.0	± 13.8	—	± 11.5	± 13.5	—
		$R_L \geq 600\Omega$	± 10.0	± 11.5	—	± 10.0	± 11.5	—	± 10.0	± 11.5	—
Slew Rate	$\dot{S}R$	$R_L \geq 2k\Omega$, Note 4	11	17	—	11	17	—	11	17	—
Gain Bandwidth Prod.	GBW	$f_O = 10kHz$, Note 4)	45	63	—	45	63	—	45	63	—
		$f_O = 1MHz$	—	40	—	—	40	—	—	40	—

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

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

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

- ES:
- 1. Input offset voltage measurements are performed by automated test equipment approximately 0.5 seconds after application of power. A/E grades guaranteed fully warmed up.
 - 2. Long-term input offset voltage stability refers to the average trend line of V_{OS} vs. Time over extended periods after the first 30 days of operation, excluding the initial hour of operation, changes in V_{OS} during the first 30 days are typically $2.5\mu V$ — refer to typical performance curve.
 - 3. Sample tested.
 - 4. Guaranteed by design.
 - 5. See test circuit and frequency response curve for 0.1Hz to 10Hz tester.
 - 6. See test circuit for current noise measurement.
 - 7. Guaranteed by input bias current.

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

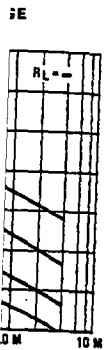
PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	OP-37A			OP-37B			OP-37C			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	V_{OS}	(Note 1)	—	30	60	—	50	200	—	70	300	μV
Average Input Offset Drift	TCV_{OS} TCV_{OSn}	(Note 2) (Note 3)	—	0.2	0.6	—	0.3	1.3	—	0.4	1.8	$\mu V/^\circ C$
Input Offset Current	I_{OS}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

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

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	OP-37E			OP-37F			OP-37G			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	V_{OS}		—	20	50	—	40	140	—	55	220	μV
Average Input Offset Drift	TCV_{OS} TCV_{OSn}	Note 2 Note 3	—	0.2	0.6	—	0.3	1.3	—	0.4	1.8	$\mu V/^\circ C$
Input Offset Current	I_{OS}		—	10	50	—	14	85	—	20	135	nA
Input Bias Current	I_B		—	± 14	± 60	—	± 18	± 95	—	± 25	± 150	nA
Input Voltage Range	IVR		± 10.5	± 11.8	—	± 10.5	± 11.8	—	± 10.5	± 11.8	—	V
Common-Mode Rejection Ratio	GMRR	$V_{CM} = \pm 10V$	110	124	—	102	121	—	96	118	—	dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_S = \pm 4.5V$ to $\pm 18V$	—	2	15	—	2	16	—	2	32	$\mu V/V$
Large-Signal Voltage Gain	A_{VO}	$R_L \geq 2k\Omega, V_O = \pm 10V$	750	1500	—	700	1300	—	450	1000	—	V/mV
Output Voltage Swing	V_O	$R_L \geq 2k\Omega$	± 11.7	± 13.6	—	± 11.4	± 13.5	—	± 11.0	± 13.3	—	V

- NOTES:
- 1. Input offset voltage measurements are performed by automated test equipment approximately 0.5 seconds after application of power. A/E grades guaranteed fully warmed up.
 - 2. The TCV_{OS} performance is within the specifications unnullled or when nullled with $R_P = 8k\Omega$ to $20k\Omega$. TCV_{OS} is 100% tested for A/E grades, sample tested for B/C/F/G grades.
 - 3. Guaranteed by design.

5 OPERATIONAL AMPLIFIERS/BUFFERS



ORDERING INFORMATION

Device	Temperature Range	Package
MC1733G	-55°C to +125°C	Metal Can
MC1733L	-55°C to +125°C	Ceramic DIP
MC1733CD	0°C to +70°C	SO-14
MC1733CG	0°C to +70°C	Metal Can
MC1733CL	0°C to +70°C	Ceramic DIP
MC1733CP	0°C to +70°C	Plastic DIP

DIFFERENTIAL VIDEO AMPLIFIER

... a wideband amplifier with differential input and differential output. Gain is fixed at 10, 100, or 400 without external components or, with the addition of one external resistor, gain becomes adjustable from 10 to 400.

- Bandwidth — 120 MHz typical @ $A_{vd} = 10$
- Rise Time — 2.5 ns typical @ $A_{vd} = 10$
- Propagation Delay Time — 3.6 ns typical @ $A_{vd} = 10$

FIGURE 1 — BASIC CIRCUIT

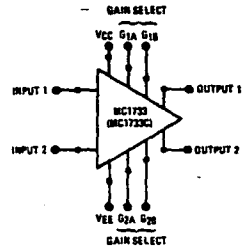


FIGURE 2 — VOLTAGE GAIN ADJUST CIRCUIT

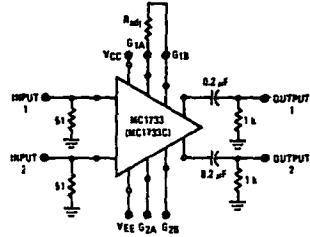
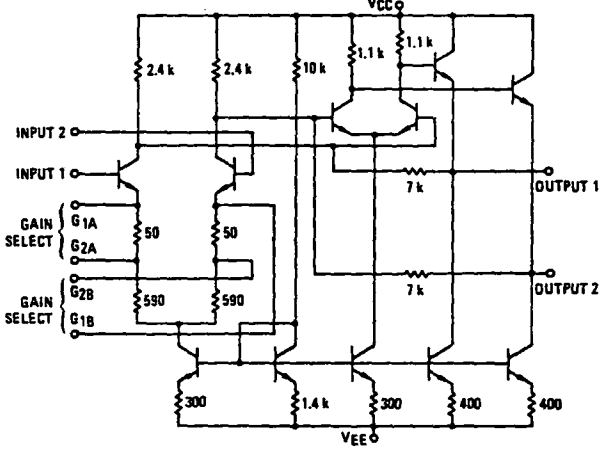


FIGURE 3 — EQUIVALENT CIRCUIT SCHEMATIC

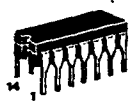
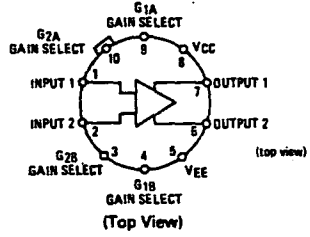


**MC1733
MC1733C**

**DIFFERENTIAL VIDEO
WIDEBAND AMPLIFIER**

**SILICON MONOLITHIC
INTEGRATED CIRCUIT**

**G SUFFIX
METAL PACKAGE
CASE 603-04
TO-100**

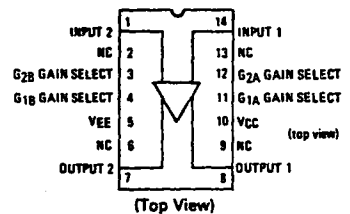


**L SUFFIX
CERAMIC PACKAGE
CASE 632-02
MO-001AA**

**P SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 646-05**



**D SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 751A-01
SO-14**



MC1733, MC1733C

3

MAXIMUM RATINGS (T_A = +25°C unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltage	V _{CC}	+8.0	Volts
	V _{EE}	-8.0	
Differential Input Voltage	V _{in}	±5.0	Volts
Common-Mode Input Voltage	V _{ICM}	±6.0	Volts
Output Current	I _O	10	mA
Internal Power Dissipation (Note 1)	P _D	500	mW
		500	
Operating Temperature Range	T _A	0 to +70	°C
		-55 to +125	
Storage Temperature Range	T _{stg}	-65 to +150	°C

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_{CC} = +6.0 Vdc, V_{EE} = -6.0 Vdc, at T_A = +25°C unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	MC1733			MC1733C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Differential Voltage Gain	A _{vd}	300	400	500	250	400	600	V/V
Gain 1 (Note 2)		90	100	110	80	100	120	
Gain 2 (Note 3)		9.0	10	11	8.0	10	12	
Gain 3 (Note 4)								
Bandwidth (R _s = 50 Ω)	BW	-	40	-	-	40	-	MHz
Gain 1		-	90	-	-	90	-	
Gain 2		-	120	-	-	120	-	
Rise Time (R _s = 50 Ω, V _O = 1 Vp-p)	t _{TLH} t _{THL}	-	10.5	-	-	10.5	-	ns
Gain 1		-	4.5	10	-	4.5	12	
Gain 2		-	2.5	-	-	2.5	-	
Propagation Delay (R _s = 50 Ω, V _O = 1 Vp-p)	t _{PLH} t _{PHL}	-	7.5	-	-	7.5	-	ns
Gain 1		-	6.0	10	-	6.0	10	
Gain 2		-	3.6	-	-	3.6	-	
Input Resistance	R _{in}	-	4.0	-	-	4.0	-	kΩ
Gain 1		20	30	-	10	30	-	
Gain 2		-	250	-	-	250	-	
Input Capacitance (Gain 2)	C _{in}	-	2.0	-	-	2.0	-	pF
Input Offset Current (Gain 3)	I _{IO}	-	0.4	3.0	-	0.4	5.0	μA
Input Bias Current (Gain 3)	I _{IB}	-	9.0	20	-	9.0	30	μA
Input Noise Voltage (R _s = 50 Ω, BW = 1 kHz to 10 MHz)	V _n	-	12	-	-	12	-	μV(rms)
Input Voltage Range (Gain 2)	V _{in}	±1.0	-	-	±1.0	-	-	V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	60	86	-	60	86	-	dB
Gain 2 (V _{CM} = ±1 V, f ≤ 100 kHz)		-	60	-	-	60	-	
Supply Voltage Rejection Ratio	PSRR	50	70	-	50	70	-	dB
Gain 2 (ΔV _s = ±0.5 V)								
Output Offset Voltage	V _{OO}	-	0.6	1.5	-	0.6	1.5	V
Gain 1		-	0.35	1.0	-	0.35	1.5	
Output Common-Mode Voltage (Gain 3)	V _{CMO}	2.4	2.9	3.4	2.4	2.9	3.4	V
Output Voltage Swing (Gain 2)	V _O	3.0	4.0	-	3.0	4.0	-	Vp-p
Output Sink Current (Gain 2)	I _O	2.5	3.6	-	2.5	3.6	-	mA
Output Resistance	R _{out}	-	20	-	-	20	-	Ω
Power Supply Current (Gain 2)	I _D	-	18	24	-	18	24	mA

LM386 low voltage audio power amplifier

general description

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

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

features

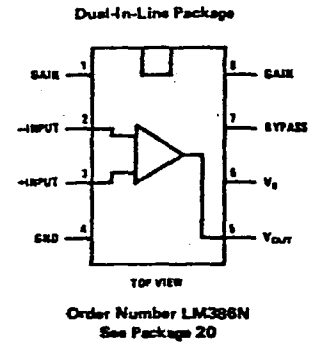
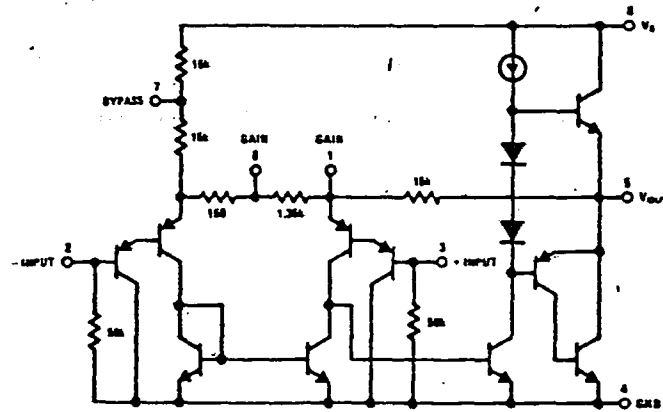
- Battery operation
- Minimum external parts
- Wide supply voltage range 4-12 Volts
- Low quiescent current drain 4 mA

- Voltage gains from 20 to 200
- Ground referenced input
- Self-centering output quiescent voltage
- Low distortion
- Eight pin dual-in-line package

applications

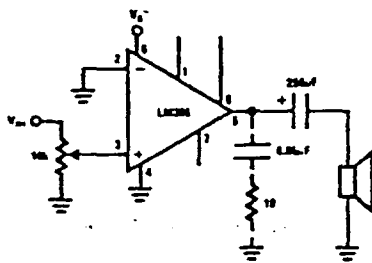
- AM-FM radio amplifiers
- Portable tape player amplifiers
- Intercoms
- TV sound systems
- Line drivers
- Ultrasonic drivers
- Small servo drivers
- Power converters

equivalent schematic and connection diagrams

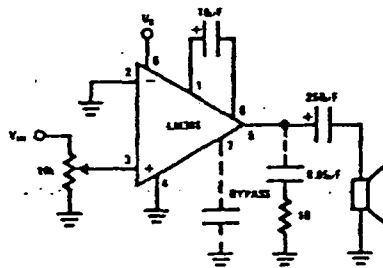


typical applications

Amplifier with Gain = 20
Minimum Parts



Amplifier with Gain = 200



absolute maximum ratings

Supply Voltage (Note 1)	15V
Package Dissipation 8 Pin DIP (Note 2)	660 mW
Input Voltage	±0.4V
Storage Temperature	-65°C to +150°C
Operating Temperature	0°C to +70°C
Junction Temperature	+150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)	+300°C

electrical characteristics $T_A = 25^\circ\text{C}$

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Operating Supply Voltage (V_S)		4		12	V
Quiescent Current (I_Q)	$V_S = 6V, V_{IN} = 0$		4	8	mA
Output Power (P_{OUT}) (Note 3)	$V_S = 6V, R_L = 8\Omega, THD = 10\%$	250	325		mW
	$V_S = 9V, R_L = 16\Omega, THD = 10\%$		500		mW
Voltage Gain (A_V)	$V_S = 6V, f = 1\text{ kHz}$ $10\mu\text{F}$ from Pin 1 to 8		26		dB
			46		dB
Bandwidth (BW)	$V_S = 6V$, Pins 1 and 8 Open		300		kHz
Total Harmonic Distortion (THD)	$V_S = 6V, R_L = 8\Omega, P_{OUT} = 125\text{ mW}$ $f = 1\text{ kHz}$, Pins 1 and 8 Open		0.2		%
Power Supply Rejection Ratio (PSRR)	$V_S = 6V, f = 1\text{ kHz}, C_{BYPASS} = 10\mu\text{F}$ Pins 1 and 8 Open, Referred to Output		50		dB
Input Resistance (R_{IN})			50		k Ω
Input Bias Current (I_{BIAS})	$V_S = 6V$, Pins 2 and 3 Open		250		nA

Note 1: Parts selected for higher absolute maximum supply voltage available on special request.

Note 2: For operating at elevated temperatures, the device must be derated based on a 150°C maximum junction temperature and a thermal resistance of 187°C/W junction to ambient.

Note 3: If oscillation exists under some load conditions, add 10 Ω and 0.05 μF series network from pin 5 to ground.

application hints

GAIN CONTROL

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

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

INPUT BIASING

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

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

เอกสารอ้างอิง

1. Joseph C. Palais, Fiber Optic Communication, 2nd.ed., Practice-Hall, Inc, 1988.
2. Henry Zanger, Cynthia Zanger, FIBER OPTIC Communication and Other Application, 1st.ed., Maxwell Macmillan, Inc, 1991.
3. Morris Tischler, Optoelectronics : Fiber Optic and Laser a Text Lab Manual 2nd.ed., Glencoe Division of Macmillan/McGraw-Hill Publishing Co., 1992.
4. Newport Corporation. "Projects in Fiber Optic Application Handbook." pp. 3-24. Newport Corporation, Fountain Valley, 1986.
5. Harold B.Killen, Fiber Optic Communications, 1st.ed., Prantice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, 1991.
6. อภินันท์ มณีฮานนท์, การสื่อสารเส้นใยนำแสง, พิมพ์ครั้งที่ 1 สถาบันเทคโนโลยีนพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2536
7. วรพงษ์ สินธิเดช, สมชาย อังคณาวิเศษกุล "การสื่อสารแบบดิจิทัลและอนาล็อกผ่านเส้นใยนำแสง" วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาตรี ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีนพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2532

ประวัติผู้เขียน

นาย สุวัฒน์ชัย วัฒนาศัยสงกุล เกิดเมื่อวันที่ 14 เมษายน 2515 ที่จังหวัดเชียงใหม่ ได้เข้ารับการศึกษาชั้นประถมศึกษา ป.1 จนถึงมัธยมศึกษา ม.6 ที่โรงเรียน มงฟอร์ตวิทยาลัย จังหวัดเชียงใหม่ จากนั้นได้ทำการสอบคัดเลือกเข้าศึกษาต่อของทบวงมหาวิทยาลัย และสามารถสอบผ่านการสอบคัดเลือก โดยได้รับการศึกษาต่อระดับปริญญาตรี ที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2533 และสามารถจบการศึกษาในระดับปริญญาตรีได้ในปีการศึกษา 2536

ประวัติการฝึกงาน

ได้ผ่านการฝึกงานที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ในระหว่างวันที่ 1 เมษายน - 31 พฤษภาคม 2536 ได้รับการอบรมและค้นคว้าในเรื่อง ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์ และไมโครโปรเซสเซอร์