



การสื่อสารข้อมูลดิจิทัลด้วยเส้นใยนำแสง

รฟ.

ค 592ก

2536

นายธิปไตย ตันท์ประพันธ์

นายพงษ์พันธ์ ศรีจิตติ

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....

วัน,เดือน,ปี.....

61255506X

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2536

DIGITAL DATA COMMUNICATION BY OPTICAL FIBER

MR. THIPPATAI TANPRAPHAN

MR. PONGPAN SORNJITTI

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 การสื่อสารข้อมูลดิจิทัลด้วยเส้นใยนำแสง
โดย นายธิปไตย ตันท์ประพันธ์
 นายพงษ์พันธ์ ครจิตติ
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา อ.ดร. ปรีชา ยุกาพิน

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง อนุมัติให้นำรายงานโครงการพิเศษฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตร์บัณฑิต

.....
(ผศ. ปรีชา เทียนสมประสงค์) หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ

.....
(อ.ดร.ปรีชา ยุกาพิน) ประธานกรรมการ

.....
(อ.สุน จำงประยูร) กรรมการ

.....
(อ.วิชาญ กนกนทา) กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสื่อสารข้อมูลดิจิทัลด้วยเส้นใยนำแสง
โดย	นายธิปไตย ตันท์ประพันธ์ นายพงษ์พันธ์ ศรีจิตติ
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ.ดร. ปรีชา ยุนาพิน
ปีการศึกษา	2536

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการทดลองการสื่อสารข้อมูลแบบดิจิทัลระหว่างไมโครคอมพิวเตอร์ 2 เครื่องโดยใช้การสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมซึ่งใช้เส้นใยนำแสงเป็นตัวกลางในการรับส่งข้อมูล โดยใช้ไดโอดเปล่งแสงกำลังสูงย่านอินฟราเรดเป็นแหล่งกำเนิดแสงและข้อมูลจะถูกส่งทางพอร์ตอนุกรม EIA RS 232-C ผ่านเส้นใยนำแสงแบบมัลติโหมด สำหรับภาครับจะใช้ PIN โฟโตไดโอดเพื่อแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าโดยข้อมูลจะมีการเข้ารหัสแบบ NRZ ซึ่งข้อดีของการสื่อสารข้อมูลด้วยเส้นใยนำแสงนั้นก็คือสามารถที่รับส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วที่สูงกว่าสายทองแดงธรรมดา และมีแถบความถี่ใช้งานที่มากกว่าซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้กับการส่งสัญญาณที่ใช้การมัลติเพล็กซ์ ดังนั้นแนวทางในการพัฒนาโครงการพิเศษนี้ต่อไปคือสามารถทำได้ในรูปแบบของ LAN โดยมีเส้นใยนำแสงเป็นตัวกลาง

กิติกรรมประกาศ

ในการจัดทำโครงการงานพิเศษ เรื่องการสื่อสารข้อมูลติดต่อด้วยเส้นใยนำแสงนี้ ถ้าหากว่าเป็นประโยชน์แล้ว ผู้เสนอโครงการงานพิเศษขอกราบขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่อบรมเลี้ยงดูและสนับสนุนทางด้านการศึกษามาโดยตลอด และอาจารย์ผู้ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา และเพื่อน ๆ ที่คอยสนับสนุน เพื่อให้โครงการนี้สำเร็จไปด้วยดี ดังรายนามต่อไปนี้

ดร. ปรีชา ยุกาพิน อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้โอกาสผู้จัดทำได้ทำโครงการงานพิเศษนี้ ตลอดจนได้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางและวิธีการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ

อ. อนุพงศ์ สรวงประภา ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา

อ. วิจิต ดิริโชติ ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางแก้ไขปัญหา

อ. วิชาญ กกกนกทา ที่ได้เอื้อเฟื้อเครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องพิมพ์

อาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ แก่ผู้จัดทำมาตลอดระยะเวลาสี่ปี

คุณ ชาญวิทย์ เดชอัศววง ที่ให้คำปรึกษาทางด้านวงจรต่าง ๆ

คุณ บุญชัย พจนาลสมมาน ที่ให้คำปรึกษาทางการส่งข้อมูล

คุณ กิตติชัย อภินทนาพงศ์ และ คุณ เสริมชัย เกียรติยศนากุล ที่ให้คำปรึกษา

คุณ ทรงวิทย์ เจริญรวชวัฒนา ที่ให้คำปรึกษาทางด้านโปรแกรม

คุณ ภัทริยา ฐาปนพาหะ และ คุณ ไพลีสู ตั้งกิจศิริ ที่เอื้อเฟื้อเครื่องพิมพ์และสถานที่

ตลอดจน เพื่อน ๆ ทุกท่านที่มีได้กล่าวถึงในที่นี้ ที่ทำให้โครงการสำเร็จลงได้ด้วยดี

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อโครงการงานพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อโครงการงานพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีของแสงและเส้นใยนำแสง	7
การเกิดแสง	7
กลไกการเกิดแสง	7
กฎพื้นฐานของแสง	9
การเบี่ยงเบนของแสง	11
การแทรกสอดของแสง	13
การป้อนแสงเข้าสู่เส้นใยนำแสง	13
ชนิดของเส้นใยนำแสง	15
บทที่ 3 เลเซอร์สารกึ่งตัวนำ	18
เงื่อนไขของการเป็นเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ	23
Heterojunction Laser	25
วัสดุ โครงสร้าง ของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ	27
GaAlAs/GaAs Laser	28
InGaP/GaAsP Laser	31
ลักษณะของแสงเลเซอร์และเทคนิคการใช้งาน	31
โหมดของเลเซอร์	31

Axial Modes	31
Longitudinal-Transverse Modes	34
เลเซอร์โหมดเดี่ยว	35
The Quality Factor	37
อุปกรณ์รับแสงแบบ Photo Current	38
Photo Diode	38
Photo Transistor	40
อุปกรณ์รับแสงที่ใช้กับการสื่อสาร	42
ความไวตามความยาวคลื่นแสงที่ใช้งาน	42
ความเร็วในการตอบสนอง	42
ความไวในการตรวจจับ	43
เงื่อนไขอื่น ๆ	43
Avalanche Photo Diode	44
บทที่ 4 การสื่อสารข้อมูล	
การสื่อสารข้อมูลแบบขนาน	45
การสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม	45
รูปแบบการติดต่อสื่อสารแบบอนุกรม	46
การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัส	48
การสื่อสารข้อมูลแบบซิงโครนัส	48
การตรวจจับข้อมูลที่ผิดพลาดในการสื่อสารแบบอะซิงโครนัส	49
ความเร็วในการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม	50
การเข้ารหัสแบบดิจิทัล	51
Pulse Amplitude Modulation	51
Pulse code Modulation	53
ระบบ NRZ	54
ระบบ RZ	55
ระบบ Manchester	55

แบบจำลองการสื่อสารแบบ RS-232 C	55
ข้อกำหนดทางไฟฟ้า	57
ขาขั้วต่อ RS-232 C และหน้าที่ของมัน	58
ข้อจำกัดของ RS-232 C	61
ระยะทาง	61
อัตราการส่งข้อมูล	61
สัญญาณรบกวน	61
บทที่ 5 การทดลองสื่อสารข้อมูล	
วงจรเข้ารหัสและวงจรับแสง	63
วงจรับแสงและถอดรหัส	63
วิธีการทดลอง	64
ผลการทดลอง	66
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	73
บรรณานุกรม	74
ภาคผนวก ก วงจรที่ใช้	ก-1
ภาคผนวก ข ข้อมูลจำเพาะ	ข-1
ภาคผนวก ค คำศัพท์ที่เกี่ยวข้อง	ค-1
ประวัติผู้เขียน	จ-1

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	ค่าดัชนีหักเหของสารชนิดต่าง ๆ	9
ตารางที่ 2.2	การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสง	16
ตารางที่ 4.1	หน้าที่ของสายและความหมายของโวลต์เตจที่กำหนดให้	57
ตารางที่ 4.2	การกำหนดขั้วต่อของ RS-232C	59

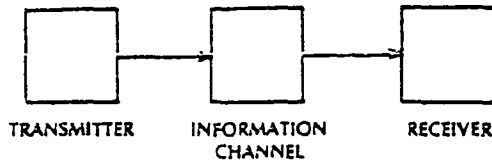
สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 ระบบพื้นฐานของการสื่อสาร	1
รูปที่ 1.2 ตัวอย่างตัวกลางชนิดต่าง ๆ	2
รูปที่ 1.3 บล็อกไดอะแกรมแสดงระบบสื่อสารเบื้องต้น	2
รูปที่ 1.4 ความผิดพลาดในการส่งข้อมูลแบบดิจิทัล	4
รูปที่ 2.1 ชื่อเรียกและชนิดต่าง ๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	8
รูปที่ 2.2 แสดงแสงตกกระทบ สะท้อน และทะลุผ่านระหว่างสองตัวกลาง	10
รูปที่ 2.3 แสดงการขยายกว้างของแสงเมื่อผ่านรูเล็ก	11
รูปที่ 2.4 แสดงการกระจายของแสงออกจากเส้นใยนำแสง	12
รูปที่ 2.5 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยนำแสง	14
รูปที่ 2.6 ลักษณะการเดินทางของแสงภายในคอร์ของเส้นใยนำแสง แต่ละชนิด	17
รูปที่ 3.1 แผนภูมิแถบพลังงานของสารชนิดต่าง ๆ	19
รูปที่ 3.2 (ก) สารกึ่งตัวนำที่เป็น N-type	20
(ข) สารกึ่งตัวนำที่เป็น P-type	20
รูปที่ 3.3 แผนภูมิแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิด N และ P	21
รูปที่ 3.4 แผนภูมิพลังงานของ PN junction ที่เติมสารเจือ ความเข้มข้นปานกลาง	22
รูปที่ 3.5 (ก) หัวต่อพีเอ็นที่มีสารเจือความเข้มข้นสูงเมื่อ ไม่มีการไบแอสตรง	23
(ข) หัวต่อพีเอ็นที่มีสารเจือความเข้มข้นสูงเมื่อไบแอส	23
รูปที่ 3.6 โครงสร้างพื้นฐานของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ	25
รูปที่ 3.7 สเปกตรัมของแสงที่เปล่งจากเลเซอร์และ LED ซึ่งทำงานต่ำกว่า Threshold Current	25
รูปที่ 3.8 แผนภูมิแถบพลังงานของ Double Heterojunction Laser เมื่อเทียบกับ Homojunction Laser	27

รูปที่ 3.9	โครงสร้างของ GaAlAs/GaAs Laser	28
รูปที่ 3.10	เตาปลูกผลึก GaAs แบบ Liquid Phase Epitaxy (LPE)	29
รูปที่ 3.11	โครงสร้างของ InGaAs/InP Laser ที่เป็นแบบ Distributed Feedback โดยมีชั้นผลึกอยู่ภายใน	30
รูปที่ 3.12	การเกิด Axial mode ในเอาท์พุทของเลเซอร์ที่มีแควิตี L	33
รูปที่ 3.13	วิธีทำโหมดเดี่ยวของเลเซอร์โดยใช้แควิตีสั้น ๆ ซึ่งยาวกว่า Linewidth ของเลเซอร์เล็กน้อย	35
รูปที่ 3.14	วิธีการใช้ Etalon ในการทำเลเซอร์โหมดเดี่ยว	36
รูปที่ 3.15	โครงสร้างโฟโตไดโอดชนิดต่าง ๆ	38
รูปที่ 3.16	แสดง quantum efficiency ของโฟโตไดโอด ส่วนใหญ่จะขึ้นกับความยาวคลื่น	40
รูปที่ 3.17	หลักการทำงานของ phototransistor	41
รูปที่ 3.18	แสดงแบบจำลองของโฟโตไดโอด	44
รูปที่ 4.1	การสื่อสารข้อมูลแบบขนาน	45
รูปที่ 4.2	แสดงการส่งข้อมูลแบบ Simplex	47
รูปที่ 4.3	แสดงการส่งข้อมูลแบบ Half Duplex	47
รูปที่ 4.4	แสดงการส่งข้อมูลแบบ Full Duplex	47
รูปที่ 4.5	แสดงรูปแบบของการสื่อสารแบบอะซิงโครนัส	48
รูปที่ 4.6	บล็อกไดอะแกรมของระบบ PAM	52
รูปที่ 4.7	การผสมสัญญาณแบบ PAM	52
รูปที่ 4.8	บล็อกไดอะแกรมของระบบ PCM	53
รูปที่ 4.9	รูปคลื่นของสัญญาณการผสมแบบ PCM	54
รูปที่ 4.10	การเข้ารหัสแบบ NRZ และ NZ	54
รูปที่ 4.11	การเข้ารหัสแบบ MANCHESTER	55
รูปที่ 4.12	แสดง RS-232C Female Connector	56
รูปที่ 4.13	แสดงแบบจำลองวงจรสื่อสารที่ใช้ RS-232C	56
รูปที่ 4.14	วงจรอินเทอร์เฟส RS-232C	58
รูปที่ 5.1	การจัดอุปกรณ์การทดลองด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณ	64
รูปที่ 5.2	การจัดอุปกรณ์การทดลองด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์	65

บทนำ

ในระบบพื้นฐานที่สุด ที่ใช้ในการสื่อสารนั้นอย่างน้อยที่สุดจะต้องประกอบด้วย ส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ประการคือ ภาคล่ง ตัวกลาง และภาครับ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1.1 ระบบพื้นฐานของการสื่อสาร

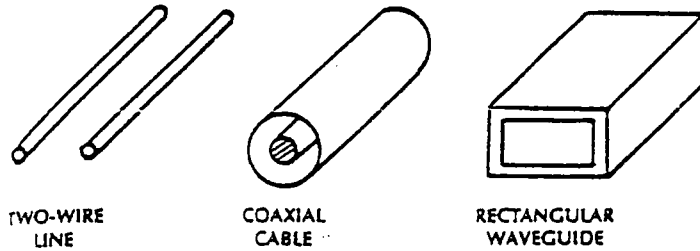
โดยที่ภาคล่งก็จะทำหน้าที่แปลงข้อมูลที่เข้ามา เช่น สัญญาณเสียง สัญญาณภาพหรือข้อมูลใด ๆ ก็ต้องให้อยู่ในรูปแบบ ที่เหมาะสมสำหรับการส่งในตัวกลางชนิดต่าง ๆ กัน และตัวกลาง ก็ทำหน้าที่เป็นตัวนำข้อมูลจากภาครับให้ไปสู่ภาคล่ง เราสามารถแบ่งตัวกลางที่ใช้ในการสื่อสารได้เป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ

1. ตัวกลางแบบไม่มีทิศทาง (Unguide channels) ตัวอย่างที่ใช้อธิบายตัวกลางแบบนี้ได้ดีที่สุดก็คือบรรยากาศรอบ ๆ ตัวเรานั่นเอง เพราะว่ามันสามารถทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายไปได้ในทุก ๆ ทิศทาง มิได้เจาะจงว่าต้องแพร่กระจายไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ซึ่งในปัจจุบันเราก็ใช้ประโยชน์จากตัวกลางที่เป็นบรรยากาศ อาทิเช่น คลื่นไมโครเวฟที่ใช้รับส่งสัญญาณจากดาวเทียม หรือคลื่นวิทยุย่านต่าง ๆ เป็นต้น

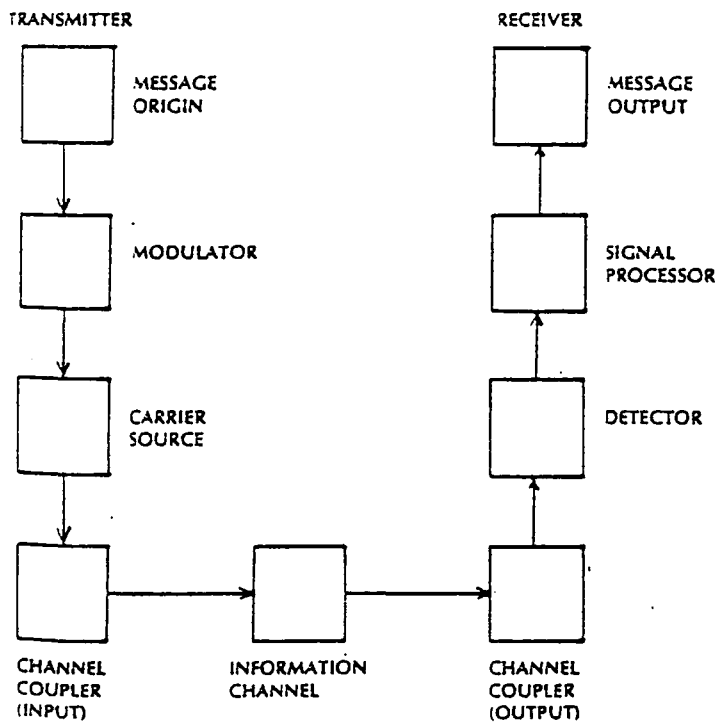
2. ตัวกลางแบบมีทิศทาง (Guide Channels) ในที่นี้ก็คือสายนำสัญญาณชนิดต่าง ๆ นั้นเอง ดังตัวอย่างในรูปที่ 2 ซึ่งเส้นใยนำแสงก็จัดอยู่ในตัวกลางชนิดนี้ด้วยเช่นกัน ถึงแม้ว่าตัวกลางชนิดนี้จะมีราคาสูงกว่าแบบที่กล่าวมาแล้วแต่ว่ามีข้อดี เช่น มีความเป็นส่วนตัวทำให้สามารถรักษาข้อมูลที่เป็นความลับได้ดีกว่าแบบแรก ข้อดีอีกข้อหนึ่งก็คือตัวกลางชนิดนี้จะไม่ขึ้นอยู่กับสภาพดินฟ้าอากาศ ดังนั้นไม่ว่าสภาพอากาศจะเป็นเช่นไรก็ไม่มีผลกระทบต่อตัวกลางชนิดนี้จึงทำให้การติดต่อสื่อสารเป็นไปได้ง่ายเรียบร้อย

ส่วนตัวรับนั้นก็จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่มาจากตัวกลางชนิดที่ได้กล่าวมาแล้ว ทั้งสอง

ประเภทให้กลายเป็นสัญญาณขาเข้าที่ถูกส่งมาจากตัวส่ง ดังนั้นเราจึงได้ข้อมูลตามที่เราต้องการ สำหรับระบบสื่อสารที่มีรายละเอียดมากขึ้น ซึ่งสามารถแสดงได้ดังบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 3 ซึ่งแต่ละบล็อกจะแสดงถึงการทำงานในแต่ละหน้าที่ที่ประกอบกันเป็นระบบซึ่งเราจะอธิบายถึงแต่ละหน้าที่อย่างย่อ ๆ โดยจะเน้นในระบบที่เกี่ยวข้องกับเส้นใยนำแสง ซึ่งที่จริงแล้ว บล็อกไดอะแกรมนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับตัวกลางทุก ๆ ชนิดเพราะว่าล้วนก็มาจากพื้นฐานเดียวกันทั้งสิ้น



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างตัวกลางชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 1.3 บล็อกไดอะแกรมแสดงระบบสื่อสารเบื้องต้น

แหล่งกำเนิดสัญญาณ (Message Origin) ก็คือแหล่งให้กำเนิดสัญญาณแบบต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นแบบอนาลอกหรือดิจิทัล ตัวอย่างเช่น ไมโครโฟนหรือกล้องโทรทรรศน์ เป็นต้น ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณเสียงหรือสัญญาณภาพให้กลายเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าหรือหากเป็นการส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ สัญญาณข้อมูลนั้นจะอยู่ในรูปสัญญาณดิจิทัลซึ่งทำให้สะดวกในการนำไปใช้งานมากขึ้น

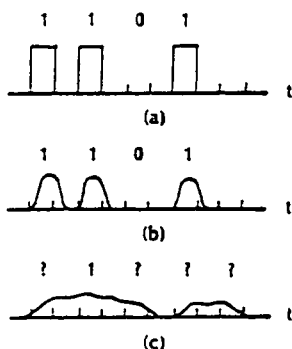
เครื่องผสมสัญญาณ (Modulator) หน้าที่หลักของเครื่องผสมสัญญาณนั้นมีอยู่ 2 ประการด้วยกันคือ ประการแรกมันทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณทางไฟฟ้าชนิดต่างๆ ให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมต่อการส่งเข้าไปสู่ตัวกลาง ประการที่สองก็คือมันจะทำการผสมสัญญาณทางไฟฟ้าเข้าไปกับคลื่นพาหะที่กำเนิดขึ้นเองจากเครื่องกำเนิดคลื่นพาหะ รูปแบบของการผสมสัญญาณที่เห็นกันทั่ว ๆ ไปนั้นจะมีอยู่ 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ แบบอนาลอกและแบบดิจิทัล โดยที่แบบอนาลอกนั้นรูปคลื่นที่ออกมาจะมีความต่อเนื่อง และมีลักษณะเหมือนกับที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแต่อาจจะมีการขยายสัญญาณให้มีความแรงมากพอที่จะส่งไปกับคลื่นพาหะได้ อีกชนิดหนึ่งก็คือ การผสมแบบดิจิทัลซึ่งจะเป็นการส่งสัญญาณแบบดิสคริตซึ่งจะมีเฉพาะการ "เปิด" หรือ "ปิด" เท่านั้น ซึ่งสถานะเหล่านี้เราจะเรียกว่าเป็นเลขไบนารี ซึ่งการผสมสัญญาณแบบดิจิทัลนี้สามารถใช้กับสัญญาณอนาลอกได้ด้วยเช่นกันโดยอาศัย A/D Converter และ D/A Converter เพื่อแปลงสัญญาณอนาลอกและดิจิทัลไปมา ซึ่งการผสมสัญญาณแบบดิจิทัลนี้เทคนิคที่นิยมใช้กับระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง

แหล่งกำเนิดคลื่นพาหะ (Carrier Source) ในการส่งด้วยคลื่นวิทยุ นั้นคลื่นพาหะจะถูกกำเนิดโดยวงจรออสซิลเลเตอร์เพื่อกำเนิดความถี่ต่าง ๆ แต่ในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงนั้นพาหะที่สำคัญจะใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงแทน ซึ่งที่นิยมใช้กันก็คือ LED หรือไดโอดเปล่งแสงและ LD หรือเลเซอร์ไดโอด ซึ่งเราจะเรียกรวมทั้งสองว่า Optic Oscillators ซึ่งรายละเอียดของแหล่งกำเนิดแสงทั้งสองแบบนี้จะกล่าวถึงโดยละเอียดในบทต่อ ๆ ไป

การเชื่อมต่อขาเข้า (Input Channel Coupler) มีหน้าที่ที่จะป้อนสัญญาณที่ผสมแล้วเข้าสู่ตัวกลางชนิดต่าง ๆ เช่นในระบบการส่งคลื่นวิทยุ การเชื่อมต่อในที่นี้ก็คือสายอากาศนั่นเอง เพราะว่าตัวกลางในกรณีนี้ก็คือบรรยากาศ แต่ในระบบที่ใช้ตัวกลางแบบมิตติทาง เช่นสายโคแอกเซียล การเชื่อมต่อก็ทำได้ไม่ยากเพียงแค่ต่อคอนเนกเตอร์เท่านั้น แต่ในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงนั้นการเชื่อมต่อจะยากกว่าในระบบอื่น ๆ มาก เพราะว่า

ขนาดของเส้นใยนำแสงมีขนาดเล็กมาก ๆ และลำแสงที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงชนิดต่าง ๆ นั้น จะมีการกระจาย (dispersion) ออกไป ทำให้การเชื่อมต่อทำได้ยากมาก ซึ่งประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ เช่น ค่า Numerical aperture (NA) ของเส้นใยนำแสงแต่ละชนิดหรือขนาดของคอร์ของเส้นใยนำแสงก็มีผลต่อการเชื่อมต่อมาก หากว่าคอร์มีขนาดใหญ่ขึ้นเท่าใดการเชื่อมต่อก็จะง่ายขึ้นเท่านั้น และขั้นตอนการเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงนี้เป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญในการวางระบบสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงเพราะว่าการสูญเสียในระบบจะมีค่ามากเท่าใดก็จะขึ้นอยู่กับขั้นตอนนี้

ตัวกลางในการส่งข้อมูล (Information Channel) ในที่นี้จะกล่าวถึงตัวกลางที่เป็นเส้นใยนำแสงซึ่งประกอบไปด้วยชนิดที่ทำด้วยแก้วและชนิดที่ทำด้วยพลาสติก ซึ่งมีอัตราการสูญเสียในสายมากกว่าแบบแรกมาก แต่ว่าคอร์มีขนาดใหญ่และราคาถูกกว่าจึงนิยมนำไปใช้ในงานที่ไม่ต้องการระยะทางไกลนัก ส่วนเส้นใยนำแสงที่ทำจากแก้วนั้นมีอัตราการสูญเสียที่ต่ำมาก ๆ เช่น 0.2 dB/Km หมายถึงว่ากำลังของแสงภายในเส้นใยนำแสงจะลดไปเป็นครึ่งหนึ่งที่ระยะทาง 15 กิโลเมตร แต่ว่าเส้นใยนำแสงชนิดนี้มีข้อเสียกล่าวคือ ขนาดของคอร์จะมีขนาดเล็กมาก จึงทำให้การเชื่อมต่อทำได้ยาก และคุณสมบัติอีกประการหนึ่งของตัวกลางก็คือ เวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทาง ซึ่งหากค่าเวลานี้มีมากเกินไปก็จะทำให้การส่งข้อมูลนั้นผิดพลาดได้ เช่นตัวอย่างในรูปที่ 4 ความผิดพลาดของรูปคลื่นในรูปล่างสุดนั้นเกิดจากการที่ใช้อัตราการส่งข้อมูลที่มีความถี่สูงเกินไปหรือระยะทางที่ใช้มากเกินไปจนทำให้พัลส์ที่รับได้นั้นเกิดการแผ่กระจายผิดเพี้ยนไปจากรูปเดิม จนเราไม่สามารถตรวจจับได้ว่าเป็น "0" หรือ "1" ดังนั้นจึงมีข้อจำกัดคือว่าอาจจะต้องลดอัตราการส่งข้อมูลให้ช้าลงก็อาจจะแก้ข้อผิดพลาดนี้ได้



รูปที่ 1.4 ความผิดพลาดในการส่งข้อมูลแบบดิจิทัล

การเชื่อมต่อขาออก (Output Channel Coupler) ลักษณะการทำงานของ การเชื่อมต่อขาออกนี้จะ เป็นในลักษณะตรงกันข้ามกับแบบขาเข้า กล่าวคือเป็นการนำแสงออกมา จากเส้นใยนำแสงเข้าสู่ตัวรับ ซึ่งเป็นเรื่องที่ไม่ยากนักเพราะว่าพื้นที่ในการรับแสงของตัวรับมีขนาดกว้างมากเมื่อเทียบกับลำแสงที่ออกมาจากเส้นใยนำแสง ดังนั้นการเชื่อมต่อทางด้านขาออกนั้นจึงไม่ยากเท่ากับทางด้านขาเข้า

ตัวรับแสง (Detector) ในการที่ข้อมูลถูกแยกออกมาจากคลื่นพาหะนั้นมีชื่อเรียก เฉพาะว่า การตีโมดูเลชั่น ซึ่งหากเป็นความถี่คลื่นวิทยุนั้นก็จะต้องใช้วงจรที่ทำขึ้นมาสำหรับ หน้าทีนี้โดยเฉพาะ แต่ว่าในเทคนิคของเส้นใยนำแสงนั้นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้แปลงสัญญาณแสงที่มีความเข้มต่าง ๆ กันให้กลายเป็นกระแสไฟฟ้าค่าต่าง ๆ กันไปแปรผันตามความเข้มของแสงที่ตกกระทบก็คือตัวรับแสง ซึ่งคุณสมบัติของตัวรับแสงชนิดต่างกันนั้นก็จะมีคุณสมบัติต่างกันไป ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในบทต่อ ๆ ไป แต่ว่าตัวรับแสงที่ดีควรมีคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ดังนี้คือ มีขนาดเล็ก มีความไวในการตอบสนองสูง อายุการใช้งานยาวนาน ใช้พลังงานน้อย และราคาไม่สูงเกินไป ด้วยเทคโนโลยีทางด้านสารกึ่งตัวนำที่พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ทำให้ตัวรับแสงที่มีคุณสมบัติดังกล่าวสามารถหาได้ไม่ยากนัก

เครื่องประมวลผลสัญญาณ (Signal Processor) ในระบบการส่งข้อมูลแบบอนาลอก การประมวลผลสัญญาณจะหมายถึงการขยายสัญญาณและกรองเอา เฉพาะสัญญาณที่ต้องการออกไปเท่านั้น ซึ่งการกรองสัญญาณที่ถูกต้องตามหลักการจะช่วยให้ค่าอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (S/N ratio) มีค่าสูงขึ้นซึ่งจะทำให้คุณภาพของสัญญาณนั้นดีขึ้น แต่ในระบบดิจิทัลนั้น การประมวลผลสัญญาณจะเป็นเพียงแต่การตัดสินใจว่าเป็นลอจิก "1" หรือ "0" เท่านั้น แต่ว่าสัญญาณรบกวนก็เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้เช่นกัน ดังนั้นการประมวลผลก็อาจจะมีโอกาสผิดพลาดได้โดยเราจะเรียกอัตราการผิดพลาดนี้ว่า Bit Error Rate (BER) ซึ่งค่า BER นี้ควรที่จะมีค่าน้อย ๆ เพราะว่าถ้าหากมีความผิดพลาดมากก็จะทำให้ข้อมูลที่ส่งมานั้นมีความผิดพลาดมากซึ่งจะเกิดขึ้นในกรณีที่ใช้อัตราการส่งไม่เหมาะสม กล่าวคือ สูงเกินไปจนทำให้เกิดความเพี้ยนของสัญญาณดังได้กล่าวมาแล้วหรือเกิดจากในกรณีที่ส่งในระยะทางไกลมาก ๆ จนทำให้สัญญาณอ่อนเกินไป

สัญญาณขาออก (Message Output) เราจะแบ่งการพิจารณาสัญญาณที่ได้ออกเป็น 2 ชนิด ชนิดแรกก็คือ สัญญาณที่ไม่สามารถรับรู้ได้จะต้องมีอุปกรณ์ทรานส์ดีวเซอร์เพื่อแปลงให้เป็นสัญญาณที่เรารับรู้ได้ เช่น หากเป็นคลื่นเสียงก็ต้องมีลำโพงเป็นตัวแปลงก่อนที่จะ

เป็นเสี่ยงให้เราได้ยินหรือสัญญาณภาพจะต้องผ่านหลอดรังสีคาโทด (CRT) ก่อนเพื่อแปลงเป็นสัญญาณภาพให้ผู้ชมได้ชม ส่วนชนิดที่สองนั้นเป็นสัญญาณขาออกที่สามารถนำมาใช้ได้ทันที เช่นการส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ซึ่งสัญญาณขาออกที่ได้นั้นจะเป็นสัญญาณดิจิทัลซึ่งสามารถนำมาประมวลผลใช้งานได้ทันที

บทที่ 2

ทฤษฎีของแสงและเส้นใยนำแสง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของแสง ที่เราพบเห็นได้ในชีวิตประจำวันเช่นการสะท้อน การหักเห และการเลี้ยวเบนของแสง ซึ่งเป็นหลักการที่สำคัญของการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง และจะกล่าวถึงชนิดของเส้นใยนำแสง

การเกิดแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง แสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้ (Visible light) จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น $0.4\mu\text{m} - 0.7\mu\text{m}$ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไปตามช่วงของความยาวคลื่น และช่วงความถี่ดังแสดงในรูปที่ 2.1

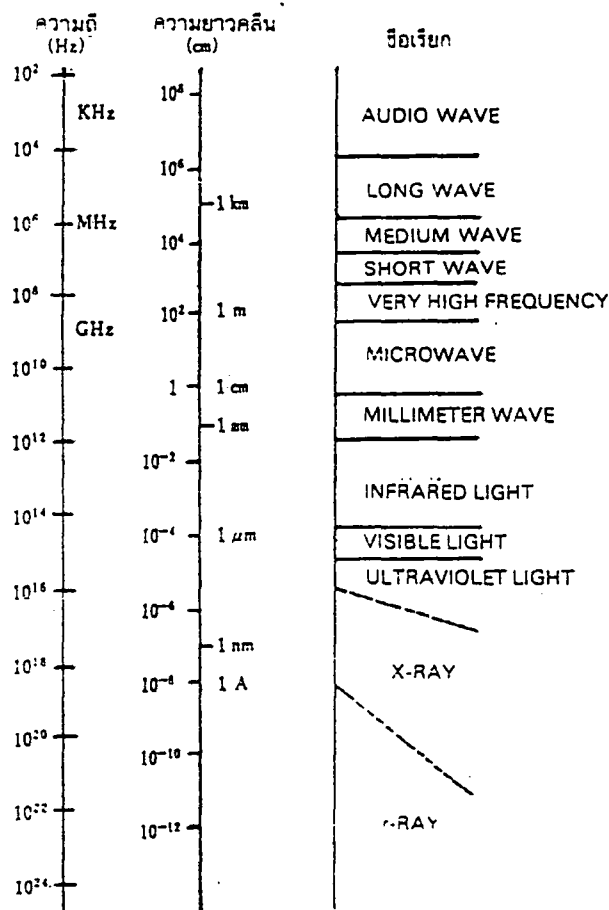
แสงของดวงอาทิตย์หรือแสงของหลอดไฟที่เข้ามาเข้าตาเรานั้นเราสามารถกล่าวได้ว่ามีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงแสงที่ตามองเห็นป็นอยู่ ถ้าหากแสดงแสงนี้ด้วย frequency spectrum แล้วจะเห็นว่ามีความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ ป็นอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ ในทางตรงกันข้ามแสงที่ได้จากเลเซอร์ หรือ LED ที่ใช้กับการสื่อสารเส้นใยนำแสงเป็นแสงที่มีสีเดียว มีสเปคตรัมเพียงเส้นเดียว หรือมีสเปคตรัมแคบมาก

กลไกการเกิดแสง

อะตอม โมเลกุลหรือสารกึ่งตัวนำที่มีอะตอม, โมเลกุล รวมตัวกันอยู่เป็นผลึกนั้นต่างก็มีคุณสมบัติที่จะดูดแสงปล่อยแสง ที่มีความยาวคลื่นเฉพาะของสารแต่ละชนิด กลไกอันนี้อธิบายได้ด้วยทฤษฎีควอนตัม และพลังงานภายในของอะตอม โมเลกุล สารกึ่งตัวนำมีค่าต่าง ๆ หลายค่า เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากระดับพลังงาน E_2 ไประดับพลังงาน E_1 มันจะดูดหรือปล่อยแสงที่มีความถี่เป็นสัดส่วนกับผลต่างของระดับพลังงาน $E_2 - E_1$ สำหรับกลไกการปล่อยแสงนี้ หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือ ลักษณะการปล่อยแสงนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

1. การปล่อยแสงแบบการกระตุ้นให้ปล่อยแสงออกมาโดยการกระตุ้นด้วยแสงจากภายนอกทำให้อะตอมที่อยู่ในระดับพลังงานสูงเคลื่อนที่ไปยังระดับพลังงานต่ำและปล่อย

แสงออกมา มีเฟสและความถี่เหมือนกันกับเฟสและความถี่ของแสงที่กระตุ้นเข้าไป
เลเซอร์จะมีวิธีการปล่อยแสงแบบนี้



รูปที่ 2.1 ชื่อเรียกและชนิดต่าง ๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

- การปล่อยแสงแบบธรรมชาติ เกิดจากอะตอมที่อยู่ระดับพลังงานต่ำได้รับพลังงานจากภายนอกทำให้มันเคลื่อนที่ไปอยู่ในระดับพลังงานสูง แต่อยู่ได้ไม่นานอะตอมเหล่านั้นจะเคลื่อนที่ลงมาอยู่ในระดับพลังงานต่ำอย่างเดิมอีก ซึ่งเป็นไปตามธรรมชาติ และขณะที่อะตอมเคลื่อนที่จากระดับพลังงานสูงมายังระดับพลังงานต่ำมันจะปล่อยแสงออกมามีความถี่เป็นสัดส่วนกับผลต่างของพลังงานทั้งสองระดับนั้น การปล่อยแสงของ LED จัดอยู่ในพวกนี้ และสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะปล่อยแสงที่มี

ความถี่เฉพาะของมัน กรณีที่อะตอมและโมเลกุลจำนวนมากปล่อยแสงออกมาแบบ
 ธรรมชาตินั้น เฟสของแสงแต่ละความถี่จะเป็นอิสระไม่สัมพันธ์กันและกัน และ
 ความถี่ที่ เช่นกันจะแตกต่างกันออกไปทำให้เกิดแถบของสเปกตรัมที่มีความกว้างค่า
 หนึ่งสำหรับแสงของดวงไฟ หลอดนีออนก็เช่นกันปล่อยแสงแบบธรรมชาติออกมาโดย
 ได้รับพลังงานความร้อน และเนื่องจากพลังงานมีค่ากว้างมากทำให้มีสเปกตรัมของ
 แสงกว้าง

กฎพื้นฐานของแสง มีกฎพื้นฐานดังนี้

1. ในสุญญากาศ แสงจะเดินทางด้วยความเร็ว $c = 3 \times 10^8$ m/s ส่วนในตัว
 กลางอื่น ๆ นั้น แสงจะเดินทางช้าลง ตามสูตร

$$v = c/n$$

เมื่อ n คือ ค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง

โดยความเร็วของแสงจะมีค่าเข้าใกล้ c เมื่อเดินทางในอากาศและก๊าซ นั่นคือ n
 มีค่าประมาณ 1 ส่วนในน้ำจะมีค่า n เท่ากับ 1.33 ส่วนค่า n ในตัวกลางต่าง ๆ แสดง
 ดังตารางที่ 2.1

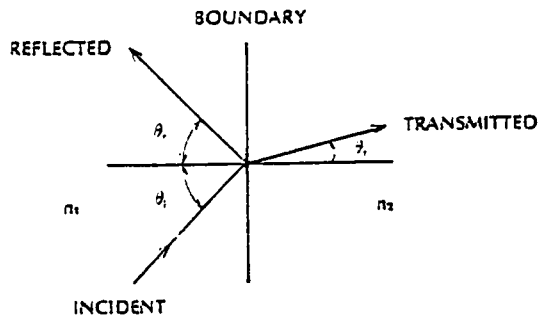
Material	Index of Refraction
Air	1.0
Carbon dioxide	1.0
Ethyl alcohol	1.36
Water	1.33
Fused silica	1.46
Glass	~1.5
Polystyrene	1.59
Silicon	3.5
Germanium	4.0
Sapphire	1.8
Calcite	1.6
Sodium chloride	1.54
Magnesium fluoride	1.38
Zinc sulfide	2.3
Gallium arsenide	3.35
Aluminum gallium arsenide	3.6

ตารางที่ 2.1 ค่าดัชนีหักเหของสารชนิดต่าง ๆ

2. แสงจะเดินทางเป็นเส้นตรงยกเว้นเมื่อมีการเปลี่ยนตัวกลาง

3. ตรงรอยต่อระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด มุมตกกระทบจะเท่ากับมุมสะท้อนดังแสดงดัง

รูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงแสงตกกระทบ สะท้อน และทะลุผ่านระหว่างสองตัวกลาง

$$\theta_r = \theta_i$$

เมื่อ θ_r คือมุมตกกระทบ และ θ_i คือมุมสะท้อน

4. จะได้อะไรของสเนลล์ (Snell 's law)

$$\sin \theta_t / \sin \theta_i = n_1 / n_2$$

เมื่อ θ_t คือมุมการการทะลุผ่าน (angle of transmission)

n_1 และ n_2 คือค่าดัชนีหักเหของบริเวณที่ตกกระทบกับบริเวณที่ทะลุผ่านตามลำดับ

เมื่อมุมตกกระทบ θ_i มีค่าถึงค่าหนึ่งแล้วจะทำให้แสงไม่สามารถเดินทางเข้าไปในตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเห n_2 ได้เลยนั่นคือเกิดการสะท้อนกลับหมดนั่นเอง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การสะท้อนกลับหมดซึ่งจะเกิดขึ้นในกรณีที่ $n_1 > n_2$ และมุมตกกระทบที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดนี้เรียกว่า มุมวิกฤติ (critical angle)

ดังนั้นถ้าให้มุมวิกฤตเป็น θ_c ในกรณีนี้มุมหักเห $\theta_c = 90^\circ$ องศา ดังนั้น

$$\sin \theta_c = \sin 90^\circ = 1$$

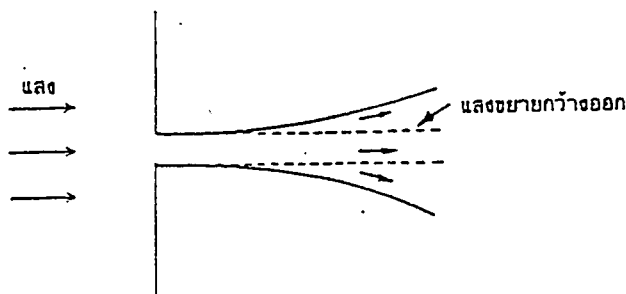
กฎของสเนลล์ ในกรณีเกิดการสะท้อนกลับหมดจะเป็นไปดังสมการ

$$\sin \theta_c = n_2/n_1$$

การเลี้ยวเบนของแสง(Diffraction)

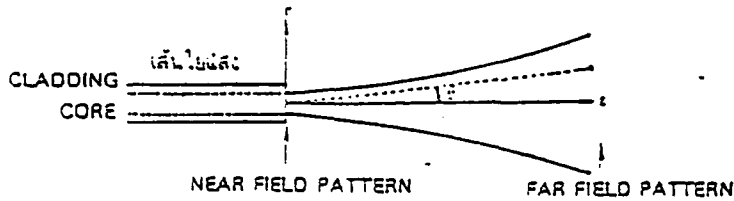
ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของแสงนี้ คือเมื่อแสงผ่านรูเล็ก ๆ แล้วจะมองเห็นมัน ขยายกว้างออกตามรูปที่ 2.3 สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือแบบ Fraunhofer diffraction pattern และ Fresnel diffraction pattern สำหรับแบบแรกนั้นสมมติว่า ให้แหล่งกำเนิดและจุดที่มองดูแสงอยู่ห่างจากจุดที่เกิดการเบี่ยงเบนเป็นระยะอนันต์ และทำการอธิบายปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของคลื่นระนาบ ส่วนแบบหลังนั้นสมมติให้แหล่งกำเนิดแสงหรือจุดที่มองดูแสงอย่างใดอย่างหนึ่งมีระยะทางจำกัด และอธิบายปรากฏการณ์ของคลื่นทรงกลม (spherical wave)

ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของแสงนี้เกิดขึ้นกับแสงที่ปล่อยออกมาจาก เส้นใยนำแสงด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.4 ในกรณีนี้รูปแบบของแสงที่เกิดจากการเบี่ยงเบนและปล่อยออกไปนั้น ถ้าเป็นรูปแบบของแสงตรงจุดที่อยู่ใกล้ปลายที่ปล่อยแสงออกมา เรียกว่า near field pattern (NFP)



รูปที่ 2.3 แสดงการขยายกว้างของแสงเมื่อผ่านรูเล็ก

ที่จุดที่อยู่ห่างจากปลายที่ปล่อยแสงออกไปมาก ๆ นั้นเรียกว่า far field pattern (FFP) ดังนั้น NFP จึงจัดอยู่ในพวก Fresnel diffraction pattern ส่วน FFP จัดอยู่ในพวก Fraunhofer diffraction pattern นอกจากนั้นเนื่องจาก NFP เป็นรูปแบบของแสงที่อยู่ใกล้ปลายของเส้นใยนำแสงมาก จึงแสดงด้วยฟังก์ชันของระยะทาง r รัศมีของเส้นใยนำแสงและ FFP เป็นรูปแบบของแสงที่อยู่ไกลจากปลายของเส้นใยนำแสงมากจึงแสดงด้วยฟังก์ชันของ θ (มุมที่ขยายกว้างออก เนื่องจากการเบี่ยงเบนของแสง)



รูปที่ 2.4 แสดงการกระจายของแสงออกจากเส้นใยนำแสง

นอกจากนั้นถ้าตรวจดูค่าสัมประสิทธิ์ของขนาดการสะท้อนกลับ Γ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของขนาดของแสงที่สะท้อนกลับต่อขนาดของแสงที่ตกกระทบจะพบว่าค่าสมบูรณ์ (absolute value) ของ Γ เป็น 1 และมีการเปลี่ยนแปลงของมุมซึ่งกำหนดจากมุมที่ตกกระทบ θ_i หมายความว่า ขณะที่เกิดการสะท้อนกลับหมดนั้น ขนาดของแสงที่สะท้อนกลับจะมีขนาดเท่ากับแสงที่ตกกระทบ แต่เฟสของแสงที่เกิดขึ้นนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปมีค่าเท่ากับค่ามุมเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ของขนาดการสะท้อนกลับ การเปลี่ยนแปลงของเฟสของแสงที่เกิดขึ้นจากการสะท้อนกลับตรงบริเวณรอยต่อของตัวกลาง 2 ชนิดนี้ เรียกว่า GOOS-HAENCHEN shift ปริมาณการเปลี่ยนแปลงเฟส $\phi_1 = \phi_2$ จะมีค่าเท่ากับ 0 แต่เมื่อ ϕ_1 เท่ากับ 90 องศา ϕ_2 จะเท่ากับ 180 องศา นั่นคือ เมื่อมุมตกกระทบมีค่าใกล้เคียงกับมุมวิกฤตินั้นจะ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องจากการสะท้อนกลับหมด แต่กรณีที่มีมุมตกกระทบมีค่ามากกว่ามุมวิกฤติแล้วเฟสจะเปลี่ยนแปลงไป 180 องศา นั่นคือเกิดการกลับเฟสนั่นเอง

การแทรกสอดของแสง (Light Interference)

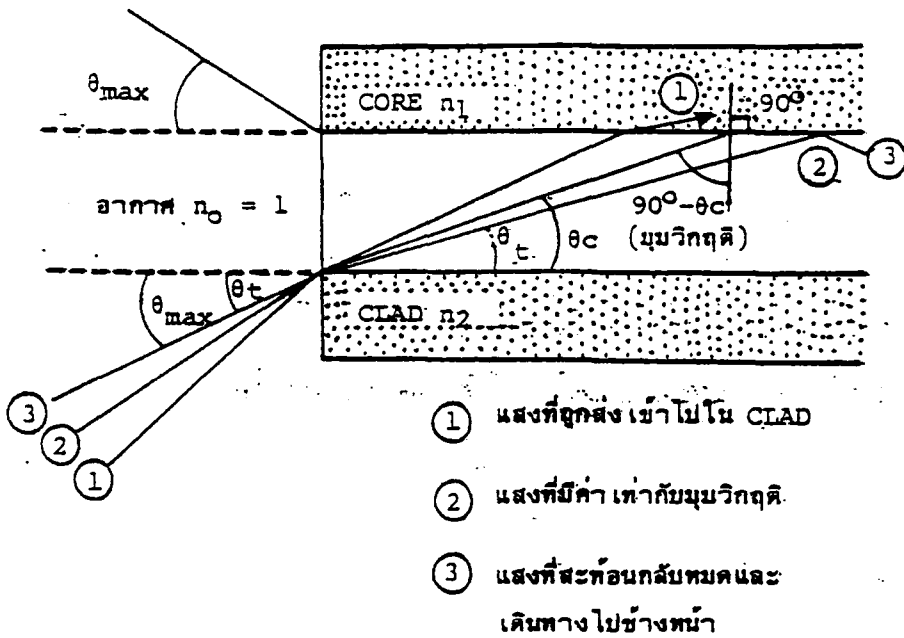
เส้นใยนำแสงเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีความนำไฟฟ้าเป็นศูนย์ แสงที่เดินทางในเส้นใยนำแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถแสดงได้ด้วยสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell) สมการนี้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ (differential equation) โดยการใช้เงื่อนไขที่รอยต่อที่กำหนด จากโครงสร้างของเส้นใยนำแสงมาสู่การแก้ปัญหาของสมการ ซึ่งสามารถแสดงลักษณะการเดินทางของแสงในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ และจะมีเฉพาะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นไปตามเงื่อนไข phase matching ที่กำหนดเงื่อนไขตรงรอยต่อเท่านั้นที่เข้าไปใน core และเดินทางไปได้ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้เรียกว่า propagation mode

phase matching สามารถอธิบายให้เข้าใจได้ด้วยปรากฏการณ์การรบกวนของแสงที่สะท้อนไปมาที่รอยต่อของคอร์และแคลดดิ้ง ซึ่งปรากฏการณ์การรบกวนของแสง คือปรากฏการณ์ที่คลื่นจำนวนหนึ่งมีผลต่อกันและกัน ถ้าตรงจุดที่เฟสเหมือนกันจะเสริมกันทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และถ้าตรงจุดที่เฟสต่างกันจะหักล้างกันทำให้มีขนาดเล็กลง

ลำแสงต่าง ๆ ที่สะท้อนกลับไปมาระหว่างรอยต่อของคอร์และแคลดดิ้ง และเดินทางในเส้นใยนำแสงนั้น ลำแสงที่รบกวนกันและเสริมกันนั้นกลายเป็น propagation mode ส่วนลำแสงที่รบกวนกันและหักล้างกันนั้นจะไม่เป็น propagation mode (ไม่เดินทางในเส้นใยนำแสง) ดังนั้นแสงที่เดินทางในเส้นใยนำแสงสามารถแสดงด้วยกลุ่มของลำแสงที่เป็นไปตามเงื่อนไขของ phase matching

การป้อนแสงเข้าสู่เส้นใยนำแสง

เนื่องจากว่าแสงที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงนั้นจะกระจายกว้างออก เนื่องจากปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของแสง ในการที่จะป้อนแสงเข้าไปในคอร์ที่มีขนาดเล็กมากนั้นต้องใช้เลนส์เพื่อทำการรวมแสง แต่แสงที่รวมนั้นไม่ใช่ว่าจะถูกป้อนเข้าไปในเส้นใยนำแสงได้ทั้งหมด แสงที่มีมุมตกกระทบที่เหมาะสมเท่านั้นจึงจะสามารถเข้าไปในเส้นใยแสงได้ดังรูปที่ 1.5 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยนำแสง จากรูปจะเห็นว่าจุดป้อนแสงของเส้นใยนำแสงนั้นจะเป็นจุดต่อของตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงต่างกัน 3 ชนิด



รูปที่ 2.5 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยนำแสง

ตัวกลางทั้ง 3 ชนิดนี้คือ อากาศ คอร์ของเส้นใยนำแสงและแคลคดิ่งของเส้นใยนำแสง ถ้าให้ค่าดัชนีหักเหของแสงของตัวกลางทั้ง 3 ชนิดเป็น n_0 ($n_0 = 1$), n_1 และ n_2 ตามลำดับ จะเกิดการหักเห การสะท้อนกลับของแสงที่รอยต่อของอากาศกับคอร์และของคอร์กับแคลคดิ่ง ในที่นี้ให้มุมรับแสงของเส้นใยนำแสงที่มีค่ามากที่สุดเป็น θ_{max} จากรูปที่ 1.2 จะเห็นว่าอย่างเช่นลำแสง 2 นั้นมุมรับแสงตรงรอยต่อของคอร์กับแคลคดิ่งนั้นมีค่าเป็นมุมวิกฤติ (critical angle) ตรงรอยต่อของอากาศกับคอร์และของคอร์กับแคลคดิ่งนั้นจากกฎของสเนลล์ จะได้ว่า

$$n_0 \sin \theta_{max} = n_1 \sin \theta_c \quad \text{---(1)}$$

$$\sin (\pi/2 - \theta_c) = \cos \theta_c = n_2/n_1 \quad \text{----(2)}$$

ดังนั้นกรณีที่มีมุมรับแสง θ_{max} มีค่าสูงสุดได้นั้น $n_1 = n_2$ จากสมการ (1) และ (2) จะได้ว่า

$$\sin \theta_{\max} = (n_1^2 - n_2^2)/n_1^2 = n_1/2\Delta \quad \text{--- (3)}$$

ในที่นี้ $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$

เรียกว่า อัตราส่วนของผลต่างของดัชนีหักเหของแสง

สำหรับ $\sin \theta_{\max}$ นี้ทางด้านแสงจะเรียกว่า NUMERICAL APERTURE (NA)

หมายถึงขนาดของการเปิดรับให้แสงผ่าน และใช้เป็นตัวแสดงเงื่อนไขการป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสง นอกจากนี้ยังถือเป็นตัวประกอบพื้นฐานอันหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเชื่อมต่อแสงระหว่างต้นกำเนิดแสงกับเส้นใยนำแสงด้วย ยกตัวอย่างเช่นสมมติว่าเส้นใยนำแสงมี $n_1 = 1.475$ และ $n_2 = 1.46$ (ค่าอัตราส่วนผลต่างของดัชนีหักเหของแสง = 1%) ในกรณี NA = 0.21

ชนิดของเส้นใยนำแสง

วิธีการแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงสามารถแบ่งได้หลายวิธีคือ แบ่งตามชนิดของสารไดอิเล็กทริกที่ใช้, แบ่งตามจำนวน propagation mode, แบ่งตามลักษณะของดัชนีหักเหของคอร์ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

1. การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงตามชนิดของไดอิเล็กทริกที่ใช้

สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดคือ

1) Silica glass optic fiber ซึ่งใช้สารไดอิเล็กทริกที่เป็น silica glass ซึ่งอาจจะใช้สารอื่นเติมเข้าไปเพื่อให้ได้ค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงตามต้องการ

2) Multi component glass optic fiber จะใช้สารไดอิเล็กทริกที่เป็นแก้วหลายชนิดปนกัน โดยส่วนมากจะใช้โซดาแคลเซียม, แก้วที่มีโบรอนและซิลิกอนผสมและสารอื่น ๆ เป็นสารหลัก

3) Plastic optic fiber จะใช้สารไดอิเล็กทริกที่เป็นพลาสติก เช่นสารพอลิซิลิกอนเรซิน

สำหรับเส้นใยนำแสงที่ใช้ในข่ายการสื่อสารโทรคมนาคมมักนิยมใช้ประเภท Silica glass เพราะมีการสูญเสียและคุณสมบัติในการส่ง (Transmission Characteristic) ไม่เปลี่ยนแปลง

2. การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงตามจำนวน Propagation mode

สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

1) Single Mode optic fiber คือเส้นใยนำแสงที่มีแสงเดินทางเข้าไปได้เพียงโหมดเดียว

2) Multimode optic fiber คือเส้นใยนำแสงที่มีแสงเดินทางเข้าไปได้หลายโหมด

3. การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงตามลักษณะของดัชนีหักเห

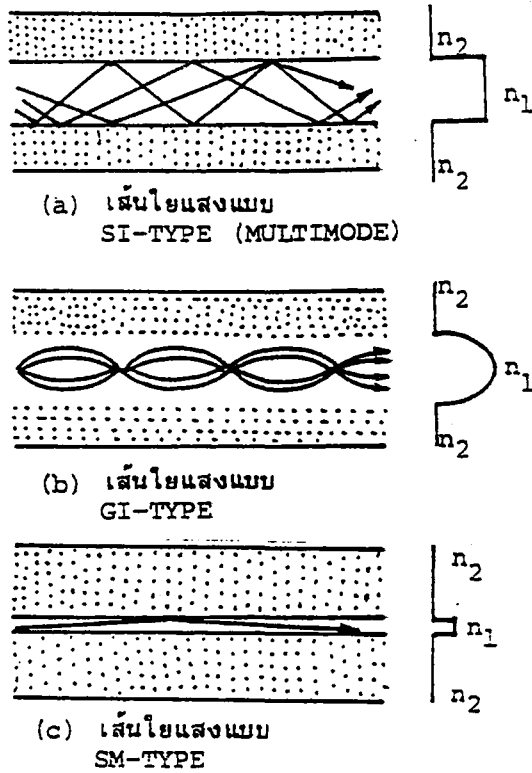
สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเห

1) Step Index optic fiber (SI) เป็นเส้นใยนำแสงที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหระหว่างคอร์และแคลดดิ้งเป็นลักษณะขั้นบันได (step)

2) Graded Index optic fiber (GI) เป็นเส้นใยนำแสงที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหระหว่างคอร์และแคลดดิ้งค่อย ๆ ลดลงทีละน้อย

แบ่งตามชนิดของสารไดอิเล็กทริก ที่ใช้	Silica glass optic fiber
	Multi component glass optic fiber
	Plastic optic fiber
แบ่งตามจำนวน propagation mode	Single Mode optic fiber
	Multimode optic fiber
แบ่งตามลักษณะของดัชนีหักเหของ คอร์	Step Index optic fiber
	Graded Index optic fiber

ตารางที่ 2.2 การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสง



รูปที่ 2.6 ลักษณะการเดินทางของแสงภายในคอร์ของเส้นใยนำแสงแต่ละชนิด

จากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่าค่าดัชนีการหักเหของ GI นั้นจะค่อย ๆ ลดลงทีละน้อยในแนวรัศมีของเส้นใยนำแสง ดังนั้นลำแสง 1 ที่มีโหมดต่ำและทิศทางในระนาบทางล้นนั้นจะสะท้อนกลับก่อนที่จะเดินทางไปถึงรอยต่อของคอร์และแคลดดิ้ง ซึ่งกล่าวได้ว่าส่วนใหญ่จะผ่านส่วนที่มีดัชนีหักเหสูงของคอร์ ส่วนลำแสงที่มีโหมดสูงและเดินทางในระนาบไถลนั้น ส่วนใหญ่จะผ่านส่วนที่มีดัชนีหักเหต่ำของคอร์ โดยความเร็วในการเดินทางของแสงนั้นจะเป็นสัดส่วนกลับกับค่าดัชนีหักเห ดังนั้นสำหรับ propagation mode 1 และ 2 นั้นโดยการเลือกลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเห (profile) ให้เหมาะสมแล้วจะทำให้เวลาที่ใช้ในการเดินทางในระนาบทางอันหนึ่งของ propagation mode 1 และ 2 มีค่าเท่ากันได้ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหที่เหมาะสมที่สุดเพื่อทำให้ผลต่างของเวลาการเดินทางระหว่าง propagation mode ต่าง ๆ มีค่าน้อยที่สุดได้นั้นจะต้องมีรูปร่างเป็นพาราโบลา

บทที่ 3

เลเซอร์สารกึ่งตัวนำ

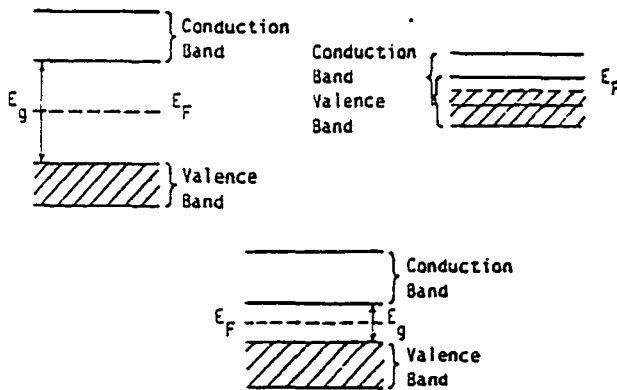
เลเซอร์สารกึ่งตัวนำเป็นเลเซอร์ที่มีราคาถูกลงและมีขนาดเล็กที่สุดทำให้สามารถผลิตได้เป็นจำนวนมากโดยใช้เทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำเช่นเดียวกับทรานซิสเตอร์และไอซี ซึ่งทำให้เลเซอร์สารกึ่งตัวนำได้มีบทบาทในชีวิตประจำวัน เช่น ในระบบเครื่องเสียงหรือภาพที่ใช้เลเซอร์ดิสก์ หรือ ระบบสื่อสารทางแสงที่ใช้เส้นใยนำแสง เป็นต้น

ในการที่จะเข้าใจการทำงานของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ เราจะต้องพิจารณาคณสมบัติของอิเล็กตรอนและการกระจายของอิเล็กตรอนในชั้นพลังงานต่าง ๆ ของสารกึ่งตัวนำ โดยอิเล็กตรอนทั้งหลาย ไม่ว่าจะเป็นอิเล็กตรอนที่ยึดติดกับอะตอมหรือเป็นอิเล็กตรอนอิสระ เช่นในสารนำไฟฟ้าต่างก็เป็นไปตามหลักของ Pauli ทั้งสิ้น กล่าวคือใน Quantum State หนึ่ง ๆ จะมีอิเล็กตรอนอยู่ได้เพียง 1 ตัวเท่านั้น หรือใน Energy State หนึ่ง ๆ จะมีอิเล็กตรอนอยู่ได้ไม่เกิน 2 ตัว ซึ่งมีสปินตรงข้ามกัน และในการกระตุ้นอิเล็กตรอนให้ขึ้นไปอยู่ในชั้นพลังงานที่สูงกว่านั้นจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อชั้นพลังงานที่สูงกว่านั้นมีที่ว่างอยู่

จากผลของกฎของ Pauli นี้เอง อิเล็กตรอนที่มีอยู่จำนวนมากในของแข็งจึงต้องกระจัดกระจายอยู่ในชั้นพลังงานต่าง ๆ ไล่ตั้งแต่ชั้นพลังงานต่ำสุดขึ้นมาจนหมดจำนวนอิเล็กตรอนที่มีอยู่ทั้งหมด จากนั้นจึงเป็นชั้นพลังงานที่ว่างไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ในระดับชั้นพลังงานสูงสุดที่เป็นเขตแดนระหว่างชั้นพลังงานที่มีอิเล็กตรอน และชั้นพลังงานที่ว่างนี้เราเรียกว่า Fermi Energy แต่เมื่ออุณหภูมิของของแข็งนั้นมีค่าสูงกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ อิเล็กตรอนบางส่วนจะสามารถรับพลังงานความร้อนนั้นกระโดดขึ้นไปอยู่ในชั้นพลังงานที่ว่างที่อยู่สูงกว่าได้ Fermi Energy จึงไม่ใช่เส้นแบ่งเขตแดนระหว่างชั้นพลังงานที่มีอิเล็กตรอนและไม่มีอิเล็กตรอนอีกต่อไป แต่จะเป็นชั้นพลังงานที่แสดงถึงความเป็นไปได้ในการมีอิเล็กตรอน 50 ต่อ 50 จากทฤษฎีแถบพลังงานของสสาร ชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนในของแข็งจะมีลักษณะเป็นแถบพลังงาน แถบพลังงานที่มีอิเล็กตรอนเต็มและอยู่ชั้นนอกสุดเรียกว่า Valence Band ส่วนแถบพลังงานที่อยู่ถัดไป ซึ่งอาจจะว่างเปล่าหรือมีอิเล็กตรอนอยู่บ้างแต่ไม่เต็ม นั้นเรียกว่า Conduction Band แถบพลังงานทั้งสองนี้จะอยู่แยกกันด้วยค่าพลังงานขนาดหนึ่งเรียกว่า Energy Gap ซึ่งหากมีค่ามากสารนั้นก็จะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นฉนวน

และหากมีค่าน้อยมากหรือไม่มีเลยเนื่องจากแถบพลังงานทั้งสองที่ซ้อนกันอยู่ สารนั้นจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นตัวนำไฟฟ้า ถ้า Energy Gap นี้มีค่าไม่มากไม่น้อยเกินไป สารนั้นจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงไว้ในแผนภูมิพลังงานของรูปที่ 2.1

ในฉนวนนั้นแม้จะมีการใส่สนามไฟฟ้าก็ไม่มีการไหล เพราะในแถบพลังงานที่เป็น Conduction Band ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลยและใน Valence Band ก็มีอิเล็กตรอนเต็มไปหมดจนไม่มีที่ว่างให้เคลื่อนที่ได้ และอิเล็กตรอนจาก Valence Band ก็ไม่สามารถกระโดดข้ามขึ้นไปสู่ Conduction Band ได้ เพราะต้องใช้พลังงานในการกระโดดข้าม Energy Gap มาก ($E_g \gg kT$) ในทางตรงกันข้ามสารนำไฟฟ้านั้นมีแถบพลังงานซึ่งซ้อนกันอยู่ Conduction Band จึงมีลักษณะเป็น Partially Filled เมื่อมีสนามไฟฟ้าเข้ามาอิเล็กตรอนจะมีอิสระในการเคลื่อนที่เพราะมีพื้นที่ว่างเป็นจำนวนมาก



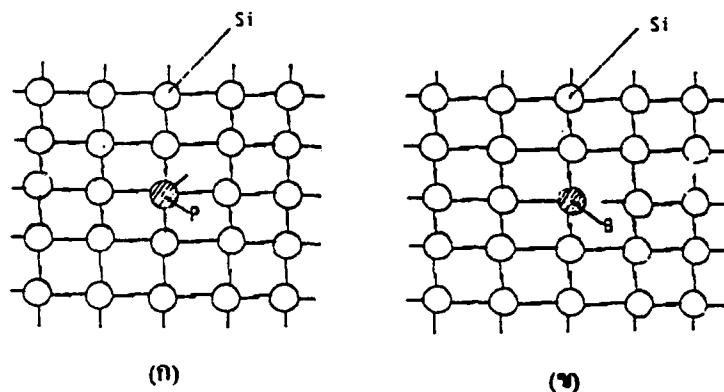
รูปที่ 3.1 แผนภูมิแถบพลังงานของสารชนิดต่าง ๆ

ถ้าแถบพลังงาน (Energy Gap) มีค่าเล็กเพียงพอที่อุณหภูมิจากความร้อนสามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ กระโดดไปสู่อแถบความนำได้ ($E_g = kT$) การนำไฟฟ้าจะอยู่ระหว่างตัวนำไฟฟ้าและฉนวน สารชนิดนี้จึงเป็นสารกึ่งตัวนำซึ่งการนำไฟฟ้ากำหนดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นขึ้นมาในแถบความนำนี้ รวมทั้งการเคลื่อนที่ของที่ว่างอิเล็กตรอนหรือโฮล (Holes) ที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์ด้วยโดยมีทิศทางเคลื่อนที่สวนทางกับอิเล็กตรอนเมื่อมีการป้อนสนามไฟฟ้า

สารกึ่งตัวนำที่ไม่มีสารเจือปนใด ๆ นั้นเรียกว่า Intrinsic Semiconductor ซึ่งมีจำนวนอิเล็กตรอนและโฮลที่นำไฟฟ้าได้เท่า ๆ กัน เพราะอิเล็กตรอนและ

โวลต์เกิดขึ้นพร้อมกันเป็นคู่ ๆ เสมอ จำนวนอิเล็กตรอนในแถบความนำ และโวลต์ในแถบวาเลนซ์นี้สามารถเพิ่มมากขึ้นได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำให้สูงขึ้น เพราะตามกฎของ Boltzman ชั้นพลังงานที่มีค่าสูงจะมีโอกาสที่จะรับอิเล็กตรอนมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

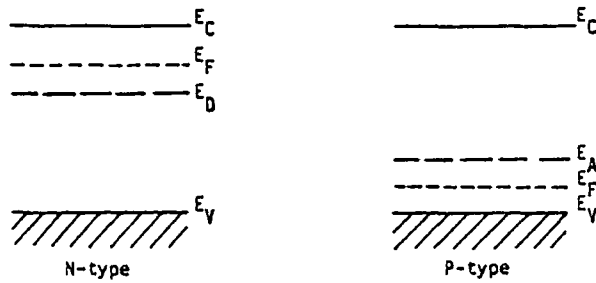
การเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนหรือโวลต์ที่นำไฟฟ้าได้นี้อาจกระทำได้โดยการเติมสารเจือลงไปในผลึกสารกึ่งตัวนำเช่น ซิลิกอน โดยปกติแล้วจะเป็นอะตอมที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัวและยึดจับกับอะตอมที่อยู่ข้างเคียง 4 อะตอมในลักษณะของพันธะโควาเลนซ์ โดยการแบ่งอิเล็กตรอนดังกล่าวนี้จึงทำให้เกิดโครงข่ายผลึกที่ยึดกันแข็งแรงและมีเสถียรภาพดีเมื่อมีการเติมสารเจือปนเข้ามาในเนื้อผลึกโดยใช้อะตอมที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว อิเล็กตรอนตัวที่เกินหนึ่งตัวนี้จะไม่สร้างพันธะโควาเลนซ์ จึงมีพลังงานในการยึดเหนี่ยวกับอะตอมต่ำกว่าอิเล็กตรอนตัวอื่น ๆ อิเล็กตรอนนี้จึงถูกกระตุ้นได้ง่ายด้วยพลังงานเพียงเล็กน้อยให้ขึ้นไปอยู่ในแถบความนำและสามารถนำไฟฟ้าได้ สารกึ่งตัวนำที่มีการเติมสารเจือปนในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า N-type Semiconductor ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ก สารเจือปนที่ใช้เรียกว่า Donors ถ้าเราเติมสารเจือปนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัวดังแสดงในรูปที่ 3.2 ข จะเกิดที่ว่างอิเล็กตรอนขึ้นเนื่องจากขาดพันธะโควาเลนซ์ไป ที่ว่างอิเล็กตรอนนี้เคลื่อนที่ได้เช่นกันจึงทำหน้าที่เป็นโวลต์และสามารถนำไฟฟ้าได้ สารกึ่งตัวนำที่เติมสารเจือปนในลักษณะนี้ว่า P-type Semiconductor และสารเจือปนที่ใช้ในกรณีนี้เราเรียกว่า Acceptors



รูปที่ 3.2 ก) สารกึ่งตัวนำที่เป็น N-Type ข) สารกึ่งตัวนำที่เป็น P-Type

เลเซอร์สารกึ่งตัวนำนั้นมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นหัวต่อพีเอ็น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำ

เอาสารกึ่งตัวนำแบบเอ็นและแบบพีมาต่อกัน สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดนี้เมื่ออยู่แยกกันจะต่างมีแผนภูมิแถบพลังงานที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 3.3 สำหรับ N-type นั้นจะมีระดับชั้นพลังงานของโคเนอรั E_C แสดงอยู่ด้วยได้ Conduction Band และ P-type ก็จะมีระดับชั้นพลังงานของแอกเซปเตอรั E_A แสดงอยู่เหนือ Valence Band เมื่อมีการเติมสารเจือปนแบบเข้มข้นปานกลางนั้นชั้นพลังงานเจือปนบางส่วนจะถูกไอออนไนซ์ ระดับพลังงานเฟอมีจึงอยู่ระหว่าง E_C และ E_D สำหรับ N-type และอยู่ระหว่าง E_A และ E_D สำหรับ P-type และอยู่ระหว่าง E_A และ E_V สำหรับ P-type

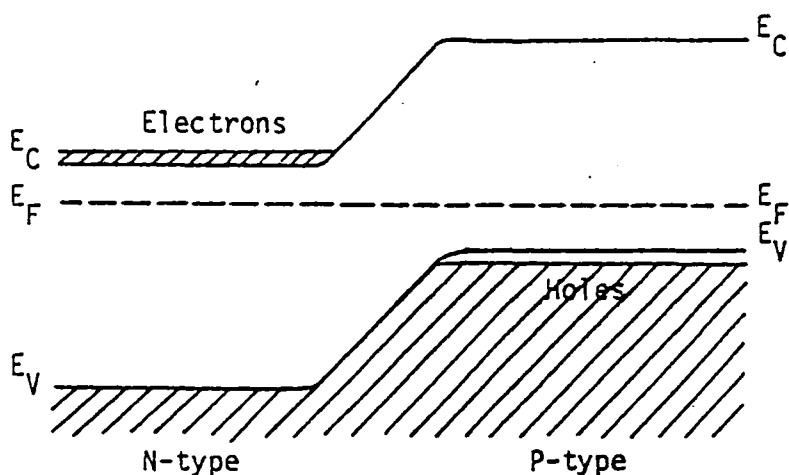


รูปที่ 3.3 แผนภูมิแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิด N และ P

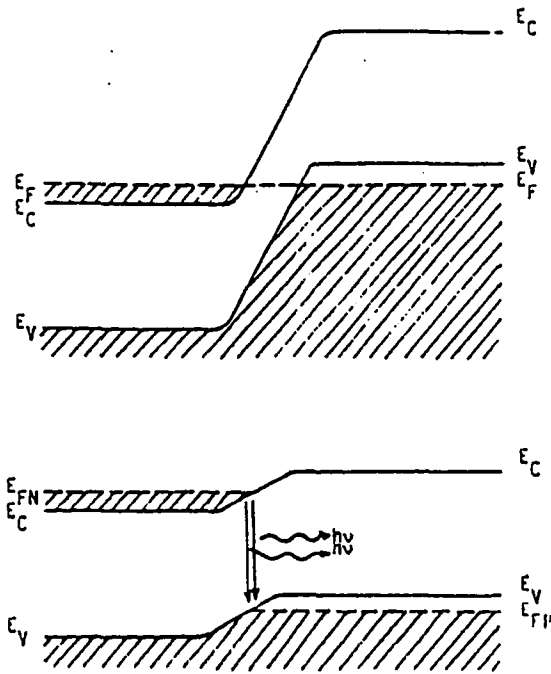
เมื่อสร้างหัวต่อพีเอ็น ตามหลักของเทอร์มิโอดนามิกส์ระดับพลังงานเหล่านี้ จะต้องมีการขยับปรับค่าให้ได้ชั้นพลังงานเฟอมีที่เท่ากันตลอดชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3.4 สำหรับหัวต่อพีเอ็นที่มีการเติมสารเจือปนเข้มข้นปานกลางนี้จะเกิดการโค้งงอของแถบพลังงานขึ้นที่หัวต่อก่อให้เกิดกำแพงศักย์ขึ้น ถ้ามีการใส่สนามไฟฟ้าแก่หัวต่อพีเอ็นในลักษณะที่ข้างเอ็นเป็น + และข้างพีเป็น - เรียกว่า Reverse Bias กำแพงศักย์ที่หัวต่อนี้จะสูงขึ้นทำให้กระแสไหลยาก แต่ถ้ามีการใส่สนามไฟฟ้าในลักษณะตรงกันข้ามคือ ข้างเอ็นเป็น - และข้างพีเป็น + เรียกว่า Forward Bias แล้ว กำแพงศักย์ที่หัวต่อจะเตี้ยลงทำให้กระแสไหลผ่านหัวต่อได้สะดวก หัวต่อพีเอ็นนี้จึงมีคุณสมบัติตัดกระแสได้

เงื่อนไขสำคัญที่ทำให้หัวต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำเกิดกลไกเลเซอร์ได้นั้น ก็คือการทำให้อิเล็กตรอนและโฮลไหลเข้าไปในหัวต่อพีเอ็นจำนวนมากพอ สำหรับการเกิดขบวนการ Recombination และการคายพลังงานออกมา ดังนั้นหัวต่อพีเอ็นสำหรับทำเลเซอร์

สารกึ่งตัวนำจะต้องเติมสารเจือปนเข้มข้นสูงมาก จนระดับพลังงานเฟอร์มิล้าเข้าไปใน Conduction Band สำหรับ N-type และล้าเข้าไปใน Valence Band สำหรับ P-type แผนภูมิแถบพลังงานของหัวต่อพีเอ็นที่เติมสารเจือปนเข้มข้นสูงนี้แสดงดังรูปที่ 3.5(ก) และเมื่อมีการทำ Forward Bias แผนภูมิแถบพลังงานจะเปลี่ยนไปดังรูปที่ 3.5(ข) โปรดสังเกตุว่าในตอนนี้มีอิเล็กตรอนและโฮลจำนวนมากเข้าไปอยู่ย่านแคบ ๆ เดียวกันที่บริเวณหัวต่อพีเอ็นแล้ว การเปล่งแสงจะเกิดในย่านแคบ ๆ ที่หัวต่อพีเอ็นนั้น เมื่อไดโอดถูกทำ Forward Bias อิเล็กตรอนใน Conduction Band จะรวมตัวกับโฮลใน Valence Band จะคายพลังงานโฟตอนออกมาเท่ากับผลต่างของชั้นพลังงานทั้งสองหรือ Energy Gap ของสารกึ่งตัวนำนั่นเอง พลังงานโฟตอนที่ปล่อยออกมาจากสารกึ่งตัวนำจะอยู่ในช่วงแสงที่ตามองเห็นหรืออินฟราเรด การเปล่งแสงนี้เกิดจากกลไกที่เรียกว่า Radiative Recombination ถ้าสามารถรักษาสภาพ Population Inversion กล่าวคือจำนวนอิเล็กตรอนใน Conduction Band มีมากกว่าโฮลใน Valence Band ให้เกิดขึ้นที่บริเวณหัวต่อตลอดเวลาแล้วก็จะเกิดการเปล่งแสงแบบถูกเร้าได้ ซึ่งเป็นที่มาของแสงเลเซอร์ สิ่งประดิษฐ์นั้นจะไม่ใช่เลเซอร์แต่จะเป็นไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode : LED) แทน ซึ่งเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่มีประโยชน์ทางการแสดงตัวเลขตัวอักษรเช่นกัน LED มักถูกออกแบบให้เปล่งแสงที่สีแดงและส้ม ในขณะที่เลเซอร์สารกึ่งตัวนำเปล่งแสงอินฟราเรด



รูปที่ 3.4 แผนภูมิพลังงานของ P-n Junction ที่เติมสารเจือปนความเข้มข้นปานกลาง



รูปที่ 3.5 (ก) หัวต่อพีเอ็นที่มีสารเจือเข้มข้นสูงเมื่อไม่มีการไบแอสตรง
 (ข) หัวต่อพีเอ็นที่มีสารเจือเข้มข้นสูงเมื่อไบแอส

เงื่อนไขของการเป็นเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ

หัวต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำอาจจะเป็นได้ทั้ง LED และเลเซอร์ซึ่งเปล่งแสงได้ทั้งคู่ เมื่อที่จะให้เป็นเลเซอร์กึ่งตัวนำได้นั้นจำเป็นต้องสร้างเงื่อนไขบางประการแก่หัวต่อพีเอ็นนี้ คือ การเพิ่มกระแสแก่หัวต่อให้พอเพียงจนเกิดสภาพ Population Inversion และใส่กระจกซึ่งทำหน้าที่ป้อนกลับพลังงาน การใส่กระจกเพื่อเป็น Optical Cavity นี้ การทำได้ง่ายกว่าเลเซอร์ชนิดอื่น ๆ มาก เพราะเนื้อสารกึ่งตัวนำมีค่าดัชนีหักเหสูงกว่าอากาศอยู่แล้ว ผิวผลึกจึงทำหน้าที่เป็นกระจกสะท้อนในตัวเองได้เป็นอย่างดี เพียงแต่นำไดโอดนั้นมา Cleaved ให้ได้ผิวผลึกที่เรียบมัน และขนานกันโดยธรรมชาติไม่ต้องขัดแย้งเลย

เลเซอร์สารกึ่งตัวนำที่พัฒนารุ่นแรก ๆ ทำงานเป็นแบบพัลส์ที่อุณหภูมิห้อง และมีค่า Threshold Current สูง เมื่อกระแสมีค่าเกิน Threshold Current การเปล่งแสงเป็นลำจะเกิดขึ้นที่บริเวณหัวต่อในทิศทางที่ตั้งฉากกับ Cleaved Surfaces ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งมีการบานออกของลำแสงอยู่เป็นลักษณะคล้ายพัดและสเปกตรัมของแสงจะแคบ

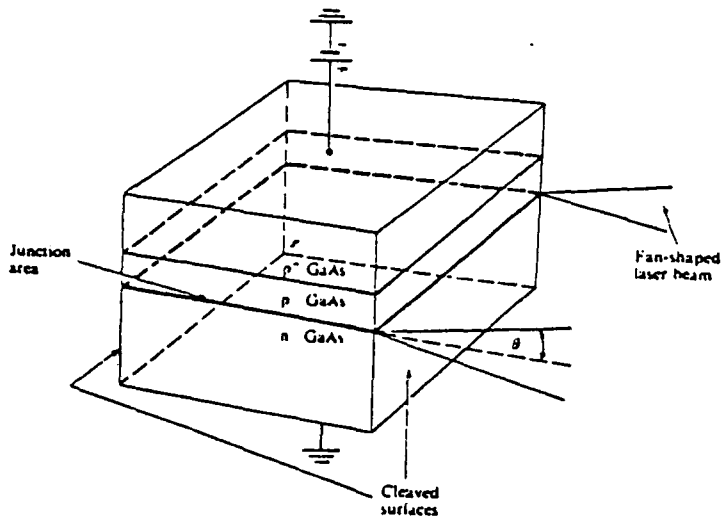
ลงมาก เมื่อเทียบกับการเปล่งแสงเมื่อกระแสมีค่าต่ำกว่า Threshold Current ซึ่งเป็นกลไกของ LED ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ค่า Threshold Current นี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของไดโอดอย่างมาก กล่าวคือที่อุณหภูมิห้อง (300 K) และที่อุณหภูมิไนโตรเจนเหลว (77 K) ค่า Threshold Current จะแตกต่างกันถึงหนึ่งหน่วย หรือที่อุณหภูมิเย็นกว่านี้จะเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเลเซอร์ได้ถึง 7 เท่าเพราะสามารถเพิ่ม Duty Factor ได้ถึง 40 เท่าแต่การ Cooling นี้มีผลต่อค่า Energy Gap ของสารกึ่งตัวนำเช่น GaAs จะมีเอาก์พทเปลี่ยนจากค่า 9000° A มาเป็น 8500° A เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การลดอุณหภูมิของเลเซอร์ให้ต่ำนี้มีความยุ่งยากทางด้านเทคนิคพอสมควร เพราะต้องใช้เครื่องมือเพิ่มเติม และทำให้ข้อดีของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำที่มีขนาดเล็กต้องเสียไป ฉะนั้นการใช้งานของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิห้อง และมี Threshold Current ต่ำยังคงเป็นเป้าหมายของการพัฒนาต่อไป

เลเซอร์สารกึ่งตัวนำมีข้อเสียอยู่อย่างหนึ่งคือ การที่มี Beam Divergence โดด เพราะการเปล่งแสงเกิดขึ้นภายในย่านหัวต่อแคบ ๆ การที่แสงถูกจำกัดตัวอยู่ในย่านแคบ ๆ นี้ ทำให้เกิด Diffraction และมีผลให้ลำแสงบานออก แสงที่มีความยาวคลื่น λ เมื่อผ่านรูขนาดกว้าง a จะมี Half-angle Diffraction ตามสูตร

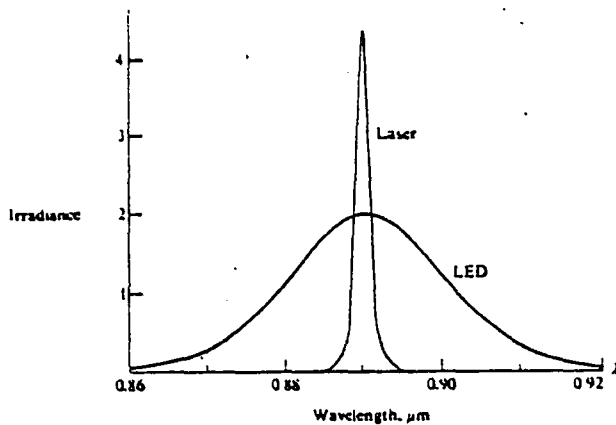
$$\sin \theta = \lambda / a$$

ตัวอย่างเช่น เลเซอร์สารกึ่งตัวนำที่ทำด้วยแกเลียมอาเซนายด์ให้แสงที่มีค่าเท่ากับ 9000° A และหัวต่อมีขนาดกว้าง 6 ไมครอน จะคำนวณได้ $\theta = 8.6^\circ$ ซึ่งนับว่าเป็นการบานออกของลำแสงที่ค่อนข้างโต ทำให้เลเซอร์สารกึ่งตัวนำมีข้อจำกัดในการใช้งานบางลักษณะที่ต้องการลำแสงที่ขนานที่ดีกว่านี้

โครงสร้างพื้นฐานของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำมีแสดงดังรูปที่ 3.6 คือมีการปลุกชั้นผลึกแบบพินฐานบนฐานผลึกแบบอื่น แล้วจึงปลุกชั้นผลึกแบบพินวกกับอีกทีหนึ่งเพื่อให้ได้ผิวสัมผัสแบบโอห์มมิกเมื่อมีโลหะมาต่อเป็นขั้วไฟฟ้า อิเล็กตรอนจะถูกฉีดเข้าไปจากย่านเอ็นสัฟตี ที่ซึ่งมันจะรวมตัวกับโฮลและเปล่งแสงออกมา เลเซอร์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างง่าย ๆ นี้เพราะทำขึ้นจากสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวจึงเรียกว่าเป็น Homojunction Laser ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำ และมีปัญหาในการนำมาใช้งานหลายประการ



รูปที่ 3.6 โครงสร้างพื้นฐานของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 3.7 สเปกตรัมของแสงที่เปล่งจากเลเซอร์ และ LED ซึ่งทำงานต่ำกว่า Threshold Current

Heterojunction Laser

เลเซอร์สารกึ่งตัวนำที่เป็น Homojunction นั้นมีข้อเสียหลายประการเมื่อเทียบกับแบบที่เป็น Heterojunction ซึ่งทำจากสารกึ่งตัวนำมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไป ในการที่จะให้เลเซอร์ทั้งสองแบบทำงานนั้น เงื่อนไขที่จำเป็นก็คือ อิเล็กตรอนที่ฉีดเข้าไปและแสงที่เปล่งออกมานั้นจะต้องถูก Confined ให้อยู่ภายในย่านหัวต่อเพื่อให้เกิดกระบวนการ sti-

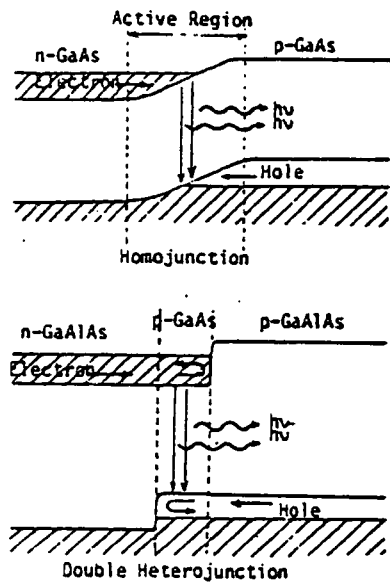
ulated Emission ที่มีประสิทธิภาพ แต่ในเลเซอร์สารกึ่งตัวนำที่เป็น Homojunction นี้ต้องใช้ Threshold Current สูงมากเพื่อให้เกิดกลไกเลเซอร์ขึ้น เพราะการ Confinement ของอิเล็กตรอนและแสงไม่ดีพอ อิเล็กตรอนที่ฉีดเข้าไปในหัวต่อมีระยะทางต่างๆ ก่อนรวมตัวกับโฮล และแสงบางส่วนก็กระจายจากหัวต่อทำให้ปริมาณการเกิด Stimulated Emission ไม่ดีเท่าที่ควร จึงมีประสิทธิผลต่ำ เนื่องจากต้องใช้ Threshold Current สูงนี้เองจึงทำให้เลเซอร์ไดโอดมีอุณหภูมิสูงต้องมีการ Cooling ซึ่งเป็นปัญหาในทางปฏิบัติเมื่อนำเอาเลเซอร์ไดโอดไปใช้งาน

ประสิทธิภาพจะสูงขึ้นและเลเซอร์ไดโอดจะมีค่า Threshold Current ต่ำลง ถ้ามีโครงสร้างเป็นแบบ Heterojunction ซึ่งทำจากสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด เช่น หัวต่อพีเอ็นที่ทำตัวแกเลียมอาเซนายด์ (GaAlAs) และแกเลียมอะลูมิเนียมอาเซนายด์ (GaAlAs) สารทั้งสองชนิดนี้มีค่าดัชนีหักเหและ Energy Gap ไม่เท่ากัน การที่หัวต่อมีความไม่ต่อเนื่องทั้งในเชิงค่าดัชนีหักเห และค่า Energy Gap เกิดขึ้นนี้เองทำให้แสงที่เปล่งออกมาและอิเล็กตรอนที่ฉีดเข้าไปในบริเวณหัวต่อถูก Confined ภายในย่านแคบ ๆ อย่างมีประสิทธิภาพ และทำให้มีค่า Threshold Current ต่ำลงด้วย Heterojunction Lasers จึงเป็นโครงสร้างที่ใช้งานจริงๆ เพราะสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้องปกติ

Heterojunction Lasers อาจมีโครงสร้างทั้งแบบ Single Heterostructure และ Double Heterostructure ตัวอย่างของโครงสร้างแบบแรกได้แก่การใช้ชั้นผลึก p^+ GaAlAs ทับบนผลึกฐาน n -GaAs โครงสร้างแบบหลังได้แก่การใช้ p^+ -GaAlAs และ n -GaAs ประกอบทั้งสองข้างของ p -GaAs ซึ่งเป็นแบบที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน

Double Heterojunction (DH) Lasers มีแผนภูมิแถบพลังงานดังแสดงในรูปที่ 3.8 เมื่อเปรียบเทียบกับ Homojunction การที่ GaAlAs มีค่า Energy Gap โดดกว่า GaAs นี้เองที่รอยต่อระหว่าง GaAlAs และ GaAs จึงเกิดกำแพงศักย์ขึ้น ทำหน้าที่สะท้อนอิเล็กตรอนและโฮลให้กลับสู่ Active Region ทำให้อิเล็กตรอนและโฮลรวมตัวกันได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ค่า Threshold Current ของเลเซอร์ที่มีโครงสร้างแบบนี้มีค่าต่ำเพียง 2000 A/cm^2 แทนที่จะเป็น 8000 A/cm^2 และ 40000 A/cm^2 สำหรับกรณี Single Heterostructure และ Homostructure ตามลำดับ เลเซอร์ที่มีโครงสร้างแบบ Double Heterostructure นี้จึงสามารถทำงานให้ลำแสงต่อเนื่องที่อุณหภูมิ

ห้อง ตัวอย่างเช่น เลเซอร์สารกึ่งตัวนำที่มีเอาก์พุท 5 มิลลิวัตต์ทำงานที่ค่าความยาวคลื่น 8200 Å ใช้ค่ากระแส Threshold เพียง 300 mA



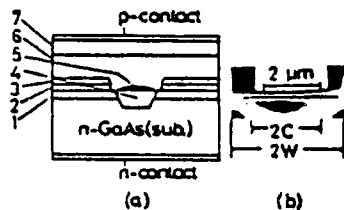
รูปที่ 3.8 แผนภูมิแถบพลังงานของ Double Heterojunction Lasers เมื่อเทียบกับ Homojunction Lasers

วัสดุ โครงสร้าง และลักษณะแบบต่างๆ ของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ

เลเซอร์สารกึ่งตัวนำได้รับการพัฒนาให้มีลักษณะสมบัติแบบต่าง ๆ ตามลักษณะของการทำงานโดยเลือกใช้วัสดุสารกึ่งตัวนำมีหลายแนวทางตามเงื่อนไขการทำงานเช่น 1) ค่าความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ ในบางกรณีต้องการให้เป็นแสงที่ความยาวคลื่นสั้นในช่วงที่ตามองเห็น เพื่อใช้งานทางด้านระบบจัดการข้อมูลทางแสง และในบางกรณีต้องการให้เป็นแสงที่ความยาวคลื่นยาวในช่วงอินฟราเรดเพื่อใช้งานทางด้านสื่อสารทางแสงโดยใช้เส้นใยนำแสง 2) ด้านความเชื่อถือได้ต้องสูงมากในบางกรณี 3) ด้านเสถียรภาพและความคมชัดของสเปกตรัมต้องดีเมื่อใช้งานทางด้านสื่อสารทางแสง 4) การมีค่า Threshold Current ต่ำ ๆ เพื่อสามารถใช้งานที่มี Duty time สูง ๆ ได้ เป็นต้น วัสดุและโครงสร้างของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำมีผลเงื่อนไขดังกล่าวโดยตรง และมีให้เลือกพัฒนามากมาย

GaAlAs/GaAs Lasers

เลเซอร์สารกึ่งตัวนำที่สามารถพัฒนาจนทำงานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้องในระยะแรกๆ ได้แก่ GaAlAs//GaAs Lasers ซึ่งใช้โครงสร้างเป็นแบบ Heterojunction เลเซอร์สารกึ่งตัวนำชนิดนี้ให้แสงที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 6800-8000 Å แล้วแต่ปริมาณส่วนผสมของอะลูมิเนียมในผลึกผสม GaAlAs แต่ค่าที่เป็นผลิตภัณฑ์จำหน่ายอยู่ในปัจจุบันมักจะเป็นเลเซอร์ที่ให้แสงที่ค่าความยาวคลื่น 7800 Å ซึ่งจัดอยู่ในจำพวกเลเซอร์ที่ให้แสงตามองเห็นได้ ตัวอย่างโครงสร้างของเลเซอร์ชนิดนี้มีแสดงดังรูปที่ 3.9

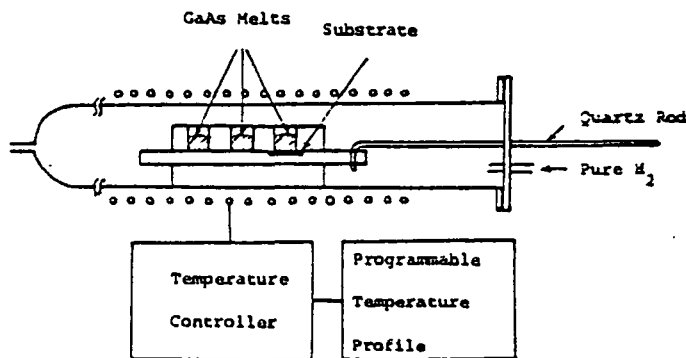


รูปที่ 2.9 โครงสร้างของ GaAlAs/GaAs Laser

จุดอ่อนของ GaAlAs/GaAs Lasers ได้แก่ตัวเนื้อสารกึ่งตัวนำเองเพราะการใช้ อะลูมิเนียมมาก ๆ ในส่วนผสมของผลึก จะทำให้เกิด Degradation ได้ง่ายและเป็น ปัญหาในด้าน Reliability ทำให้เลเซอร์มีประสิทธิภาพลดลงเมื่อใช้งานไประยะหนึ่ง สาเหตุของ Degradation ได้แก่การมี Dislocation เกิดเพิ่มขึ้นในเนื้อผลึกทำให้เกิด Optical Loss ขึ้น หากมีมากขึ้นเกินขีดจำกัดขนาดหนึ่ง เลเซอร์ก็จะหยุดทำงานได้อย่าง ไรก็ตามเลเซอร์ชนิดนี้ได้รับการพัฒนามานาน และได้แก้ไขจุดบกพร่องต่างๆ ไปพอสมควร ประกอบทั้งตลาดในเชิงการค้าของเลเซอร์ชนิดนี้สูงมาก โดยเฉพาะทางด้านเครื่องเล่น เสียงและภาพ (Audio/Video) และเครื่องพิมพ์ด้วยเลเซอร์ (Laser Printer)

จุดเด่นอีกอย่างหนึ่งของ GaAlAs/GaAs Laser ได้แก่การใช้ GaAs เป็นผลึกฐาน เพราะเทคโนโลยีของแกเลียมอาเซนายด์นี้ได้รับการพัฒนามานานรองจากซิลิกอนจึงสามารถควบคุมการผลิตได้ดี และสามารถประดิษฐ์สร้างองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น ทรานซิสเตอร์ ไดโอดบนผลึกฐานอันเดียวกันนี้ได้ จึงเป็นแนวทางในการผลิต Optoelectronic IC ออกมาใช้งานได้ Optoelectronic IC นี้คือ Integrated Circuits ที่ประกอบด้วยสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป จึงมีประโยชน์มากในการใช้งานบางรูปแบบ

เทคนิคการสร้าง GaAlAs/GaAs Lasers ได้แก่ Liquid Phase Epitaxy (LPE) ซึ่งเป็นวิธีการปลูกผลึกเป็นชั้น ๆ ซ้อนทับผลึกฐานด้วยความหนาและจำนวนตามต้องการ ภายในเตาที่มีอุณหภูมิสูง 800-900 °C โดยใช้ Graphite Boat ที่มีหลุมหลายหลุมใส่สารละลายของ GaAs และช่วยผสมของอะลูมิเนียมตลอดจนสารเจือปนชนิดต่าง ๆ ที่มีปริมาณเหมาะสม ผลึกฐานที่ติดตั้งอยู่กับแท่งกราฟไฟต์ส่วนที่เลื่อนได้ จะเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ใต้สารละลายของหลุมต่าง ๆ ในจังหวะและเวลาที่กำหนด เมื่อมีการลดอุณหภูมิให้เกิด Temperature Gradient ที่เหมาะสม ชั้นผลึกใหม่ก็จะพอกหนาขึ้นเพื่อป้องกันมิให้เกิด Oxidization โดยเฉพาะเมื่อมีอะลูมิเนียมอยู่ด้วย ก๊าซที่ไหลผ่านเตาจะต้องเป็นก๊าซไฮโดรเจนที่บริสุทธิ์สูง ตัวอย่างของเตาปลูกผลึกแบบ LPE นี้มีแสดงดังรูปที่ 3.10

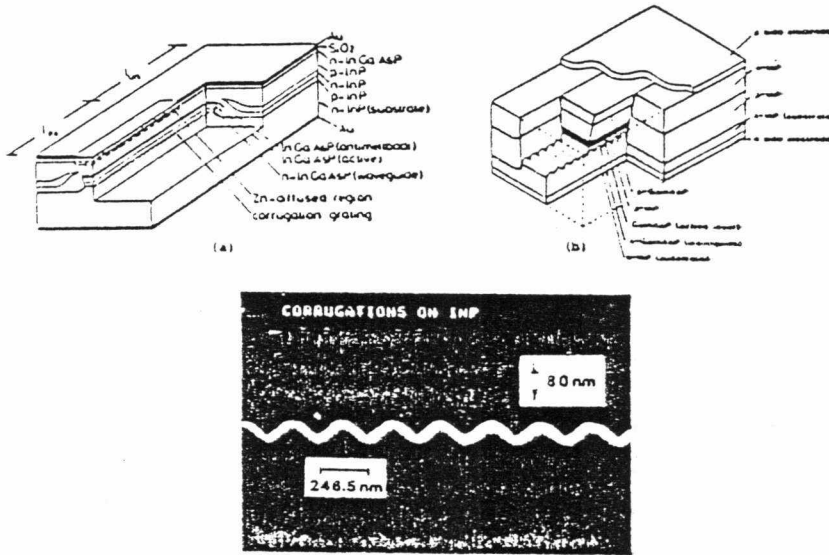


รูปที่ 3.10 เตาปลูกผลึก GaAs แบบ Liquid Phase Epitaxy (LPE)

เลเซอร์สารกึ่งตัวนำซึ่งสามารถทำงานที่ค่าความยาวคลื่น 1.3 และ 1.5 ไมครอน ซึ่งอยู่ในช่วงอินฟราเรดนี้ ได้แก่ InGaAsP/Inp เลเซอร์ชนิดนี้สร้างขึ้นโดยใช้ InP เป็นผลึกฐาน และมีชั้นผลึกผสมของ InGaAsP ปลูกทับในรูปโครงสร้างแบบ Heterojunction ที่สลับซับซ้อน เงื่อนไขการออกแบบเลเซอร์นั้นนอกจากจะให้ได้แสงที่มีค่าความยาวคลื่นตามต้องการแล้ว ยังต้องมีการกระจายของลำแสงต่ำ และมีสเปคตรัมที่คมชัดเป็นโหมดเดี่ยว (Single mode) จึงจะเหมาะสำหรับการใช้งานสื่อสารทางแสงระยะไกลและมีอัตราบิตสูงได้ โครงสร้างที่สลับซับซ้อนเพื่อให้ได้การกระจายลำแสงที่น้อยที่สุดและเป็นโหมดเดี่ยวได้แก่ การใช้โครงสร้างของชั้นผลึกที่มี Grating และมีชั้น Active region ที่บางแถบ เป็นลักษณะที่แสดงดังแสดงในรูปที่ 2.11 โครงสร้างแบบนี้เรียกว่า Distributed Feed

Back (DFB) Laser

ชั้นผลึกที่เตรียมขึ้นสำหรับระบบ InGaAsP/InP ก็ใช้เทคนิคการปลูกผลึกแบบ Liquid Phase Epitaxy เช่นเดียวกัน สำหรับชั้นผลึกที่มี Grating อยู่บนนั้นต้องนำออกมาจากเตาเพื่อทำโครงสร้างดังกล่าวโดยใช้เทคนิคทางแสงได้แก่การสร้าง Interference Pattern ด้วยแสงเลเซอร์บนชั้นผลึกที่ฉาบสารไวแสงไว้ เมื่อกัดด้วยน้ำยาเคมีที่เป็น Selective Etching ก็จะได้โครงสร้างของ Grating ตามต้องการแล้วจึงนำชั้นผลึกดังกล่าวไปปลูกชั้นผลึกอื่นๆ ทับต่อไป



รูปที่ 3.11 โครงสร้างของ InGaAsP/InP Lasers ที่เป็นแบบ Distributed Feedback โดยมีชั้นผลึก อยู่ภายใน

InGaAsP/InP Lasers นี้ได้รับการพัฒนาเพื่อการใช้งานกับการสื่อสารทางแสงโดยเฉพาะจึงมีการออกแบบในรายละเอียดที่แตกต่างกันไปแล้วแต่บริษัทผู้ผลิต ประเด็นหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบด้วยได้แก่ ค่า Threshold Current ซึ่งจะต้องมีค่าต่ำเพื่อจะได้มี Duty-time สูงขณะนี้ค่า Threshold Current ที่สร้างได้ต่ำสุดมีค่าเพียง 4.5 mA ที่อุณหภูมิห้อง จึงทำให้เลเซอร์ชนิดนี้ใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 120°C ได้ด้วย

เลเซอร์สารกึ่งตัวนำที่ทำจาก InGaP/GaAsP นี้มีโครงสร้างเป็นแบบ Hetero-junction เช่นกันโดยใช้ GaAsP เป็นพื้นฐานและปลูกผลึก InGaP ได้โดยวิธี Vapor Phase Epitaxy (VPE) เลเซอร์ชนิดนี้ให้แสงที่ตามองเห็นที่ค่าความยาวคลื่น 6710 Å โดยทำงานเป็นลำแสงต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้องนับเป็นเลเซอร์ที่ให้แสงที่มีความยาวคลื่นสั้นที่สุดในบรรดาสารกึ่งตัวนำด้วยกัน จึงเป็นเลเซอร์ที่สามารถทดแทนเลเซอร์ฮีเลียมนีออน ซึ่งมีความยาวคลื่น 6328 Å ได้ในการใช้งานในระบบจัดการข้อมูลทางแสง ข้อดีเด่นของเลเซอร์ชนิดนี้มีหลายประการ เช่น มี Sensitivity สูงต่อ Drum ที่ใช้ใน Laser Printer มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า และมี Resolution ดี

ลักษณะของแสงเลเซอร์และเทคนิคการใช้

เลเซอร์เกือบทุกชนิดที่กล่าวมาแล้วทำงานภายใต้เงื่อนไขพื้นฐาน 3 ประการ คือ 1) มี Active Medium 2) มีสภาพ Population Inversion และ 3) มีกลไกของการป้อนกลับ ในบทนี้เราจะกล่าวถึงเงื่อนไขเหล่านี้ว่ามีส่วนเกี่ยวข้องกับลักษณะของแสงเลเซอร์อย่างไร และสามารถควบคุมแสงเลเซอร์ให้ทำงานในลักษณะที่เราต้องการได้อย่างไร

โหนดของเลเซอร์

Optical Cavity ซึ่งทำหน้าที่เป็น Fabry-Perot Interferometer มีผลต่อเอาต์พุตของเลเซอร์ หากเราสังเกตจذبรูปคลื่นของแสงเลเซอร์ในเชิงความถี่จากการทดลองจะพบว่าเอาต์พุตประกอบด้วยเส้นความถี่เดี่ยว ๆ จำนวนหนึ่งซึ่งมีสเปกตรัมแคบมาก เส้นความถี่เดี่ยว ๆ เหล่านี้คืออะไร เกิดขึ้นได้อย่างไร และกระจายอยู่อย่างไร เราจะตอบคำถามเหล่านี้ได้โดยพิจารณาผลของกระจกที่ใช้เป็นแควิตี้ของเลเซอร์

Axial Modes

Optical Cavity ของเลเซอร์เป็นตัวกำหนดความถี่ที่มีค่า Q สูงมากและมี Loss ต่ำ ถ้าค่า Loss เหล่านี้เล็กกว่า Gain ในเนื้อตัวกลางก็จะเกิดเลเซอร์ขึ้นได้แต่เงื่อนไขที่ Q มีค่าสูงนี้ไม่ได้เกิดขึ้นทุก ๆ ความถี่ของแสงเลเซอร์ที่เกิดขึ้นจะมีเฉพาะบางความถี่เท่านั้นที่เข้าเงื่อนไขของการเกิดกำหนด เช่นเดียวกับเงื่อนไขของการผ่านออกไปได้ของแสงใน Fabry-Perot Interferometer ดังนั้นเอาต์พุตของเลเซอร์จึงมิได้มีรูปร่างเหมือนกับสเปกตรัมของการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง แต่จะประกอบด้วยชุดของเส้นสเปก

ตรัมที่ละเอียดอ่อนตามค่าความถี่ที่มี Q สูงภายในแควิตีของเลเซอร์นั้น

เพื่อกำหนดเงื่อนไขของค่า Q สูงในเลเซอร์ เราจะพิจารณาจาก Plane Wave ที่เคลื่อนที่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับกระจกแควิตีที่ขนานกัน 2 อันระยะทางที่เคลื่อนที่ครบรอบโดยสะท้อนกับกระจกนั้นมีค่าเท่ากับ $2L$ โดยที่ L เป็นระยะห่างของแควิตีนั้น เฟสรวมที่เปลี่ยนไปจากการเดินทางของคลื่นครบหนึ่งรอบจะเท่ากับ 2 คูณกับระยะทางที่แสงเคลื่อนที่หารด้วยค่าความยาวคลื่นตามสูตร

$$= 2 \pi \times 2L / \lambda = 4 \pi L / \lambda \quad \dots\dots 1$$

ถ้าคลื่นสะท้อนกลับมามีลักษณะเป็น 180° Out of Phase กับ คลื่นเดิม และมีขนาดเท่าเดิม จะไม่เกิด Net Field หรือ Net Energy ที่จะกระตุ้นให้เกิดการเปล่งแสงของอะตอมได้ แม้จะมีสภาพ Population Inversion อยู่พร้อมก็ตาม แต่ถ้าคลื่นมีความถี่ที่ทำให้เกิดการสะท้อนในลักษณะ In Phase ($\Delta = 2\pi q$ โดย q เป็นค่าตัวเลขเต็มหน่วย) คลื่นจะซ้อนกัน ทำให้เกิดการเพิ่มของสนามไฟฟ้าขึ้นเพราะมีเฟสเดียวกัน ทำให้มีพลังงานเพียงพอในการชักนำให้เกิด Stimulated Emission ที่ค่าความถี่นี้ หรือพูดอีกอย่างหนึ่งว่ากระจกสะท้อนที่ประกอบขึ้นเป็นแควิตีที่กำทอนได้นี้ จะทำให้แสงเกิดการสะสมพลังงานขึ้นได้ และเมื่อคลื่นซ้อนกันพอดี แควิตีนั้นจะมีค่า Q สูง เงื่อนไขเกิดการซ้ำตัวเองของสนามไฟฟ้า (โดยกำหนดให้ $\Delta = 2\pi q$ ในสมการที่ 1) คือการกำหนดให้ความยาวของแควิตีมีขนาดเท่ากับตัวเลขเต็มหน่วยของครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ($L = (q \lambda / 2)$ โดยที่ q เป็นตัวเลขเต็มหน่วย) ค่าความยาวคลื่นเหล่านี้เท่านั้นที่จะกำทอนในแควิตีปกติแล้วค่า q จะเป็นตัวเลขที่โตมาก ตัวอย่างเช่น ถ้าค่าความยาวคลื่น ณ จุดตรงกลางมีค่า 5000 \AA ($5 \times 10^{-5} \text{ cm}$) และกระจกของแควิตีห่างกัน 25 cm ค่า q จะมีค่า 10^5 เนื่องจากค่า q นี้จะต้องเป็นตัวเลขเต็มหน่วยจึงมีค่าความยาวคลื่นหลายค่าที่เข้าเงื่อนไขที่สนามไฟฟ้าจะซ้ำตัวเอง เราเรียกว่า Pattern ที่สนามไฟฟ้าซ้ำตัวเองได้นี้ว่าเป็น Longitudinal Modes หรือ Axial Modes และเรามักเรียก Axial Modes เหล่านี้โดยกำหนดจากค่าความถี่มากกว่าค่าความยาวคลื่น ฉะนั้นจากเงื่อนไขข้างต้น จึงได้ว่า

$$\nu = c / \lambda = c / (2L / q) = q (c / 2L) \quad \dots\dots 2$$

ความถี่ของแต่ละ Mode จะกำหนดได้โดยใช้ตัวเลขเต็มหน่วย q

$$v_q = q(c/2L) \quad \dots\dots 3$$

ซึ่งเป็นความถี่ที่แควิตีของเลเซอร์จะเกิดกำทอน

โดยการลบกันของค่าความถี่ของโหมดหนึ่งจากของโหมดที่อยู่ติดกันจะทำให้เราทราบถึงระยะห่างระหว่างโหมดได้ด้วยคือ

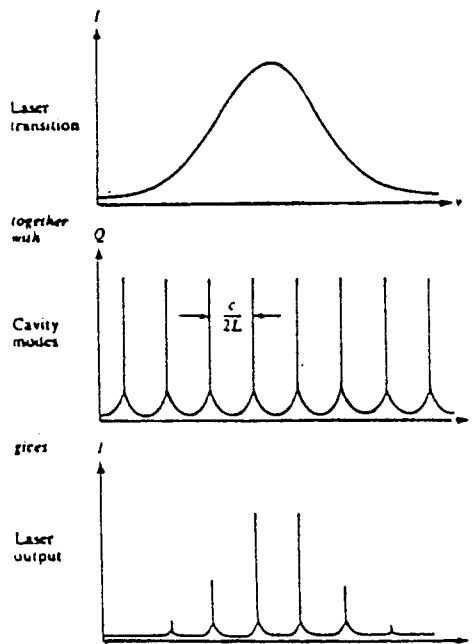
$$v = v_{q+1} - v_q = (q + 1) c / 2L - q (c / 2L)$$

$$\Delta v = c / 2L \quad \dots\dots 4$$

สังเกตว่าระยะห่างระหว่างโหมดของเลเซอร์นี้ขึ้นกับค่า L เท่านั้น และไม่ขึ้นกับค่า q ถ้าเราจะใช้ตัวอย่างข้างต้นมาลองคำนวณดูสำหรับเลเซอร์ที่มีขนาดยาว 25 cm จะได้ว่า,

$$\Delta v = 3 \times 10^{10} \text{ cm/sec} / 2 \times 25 \text{ cm}$$

$$= 600 \text{ MHz}$$



รูปที่ 3.12 การเกิด Axial Modes ในเอกาทัพของเลเซอร์ที่มีแควิตี L

เนื่องจาก Transition lines ของเลเซอร์ส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า 600 MHz ดังนั้นเราจะพบว่าแสงเลเซอร์ จะมีหลาย Axial Modes อยู่ในสเปกตรัมของมัน เอกลักษณ์ของเลเซอร์จึงประกอบไปด้วยความถี่เดียว ๆ จำนวนหนึ่งที่แตกต่างกันด้วยขนาด $c/2$ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ความถี่เหล่านี้เรียกว่าความถี่ของ Axial Modes ของเลเซอร์

Longitudinal-Transverse Modes

ที่ผ่านมาเราพิจารณาเฉพาะเงื่อนไขการเกิดกำเนิดของคลื่นระนาบที่เคลื่อนที่ระหว่างกึ่งกลางของกระจกเท่านั้น กล่าวคือเฉพาะส่วนที่อยู่บริเวณแกนแสงแต่ในความเป็นจริงแล้วแสงที่เคลื่อนที่ภายในแควิตีนั้นประกอบไปด้วยหลายส่วน ทั้งที่ไม่ได้อยู่ในแกนแสงทีเดียวนัก แต่สิ่งจำเป็นพื้นฐานก็คือคลื่นเหล่านี้จะต้องช้อนทับตัวเองเมื่อสะท้อนวิ่งกลับครบรอบภายในแควิตีนั้น เนื่องจากมีลักษณะเป็นสามมิตินี้เอง Pattern ของสนามไฟฟ้าที่ช้อนทับตัวเองจึงมี Longitudinal Transverse Mode เกิดขึ้นภายในแควิตีของเลเซอร์ เราไม่สามารถบ่งลักษณะสมบัติของโหมดของเลเซอร์ด้วยตัวเลขเดี่ยว q เมื่อมี Transverse Modes เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยพร้อมๆ กับการมี Axial Modes เราสามารถกำหนดค่าความถี่ที่สนองเงื่อนไขการเกิดกำเนิดแบบสามมิตินี้ตามสูตร

$$V_{mnq} = (q + (m+n+1) \cos^{-1} \epsilon_1 \epsilon_2 / r) (c / 2L) \quad \dots \dots 5$$

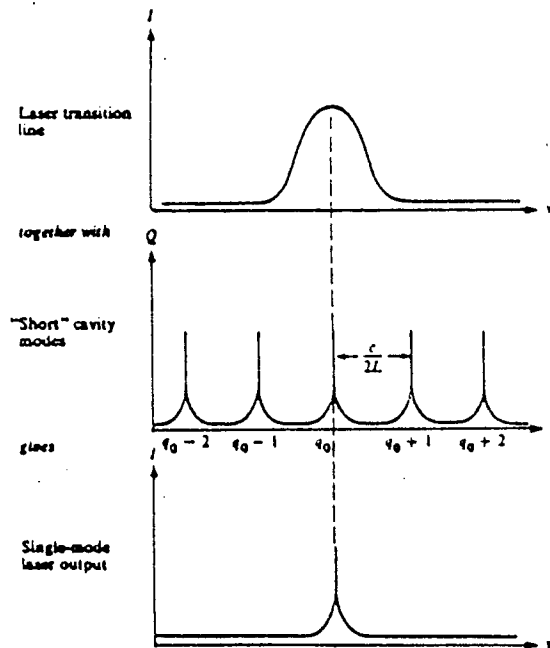
โดยที่ m, n และ q เป็นตัวเลขเต็มหน่วย ϵ_1, ϵ_2 เป็น ϵ -parameter ของกระจกที่มีนิยามตามสูตร ในกรณีทั่วไปที่แควิตีประกอบด้วยกระจกที่โค้งเล็กน้อยและเหมือนกัน ถ้าให้ $\epsilon_1 = \epsilon_2$ และ $L/R \ll 1$ เราจะได้สูตรที่ง่ายขึ้นคือ

$$v_{mnq} = (q + (m+n+1) / r) (\sqrt{2L/R}) (c / 2L) \quad \dots \dots 6$$

ค่า q ที่แสดงไว้ในสูตรทั้งสองหมายถึง Axial Modes ในขณะที่ m และ n นั้นแสดงถึงค่า Transverse Modes ดังนั้นโหมดหนึ่งๆ ของเลเซอร์นั้นจะเขียนแสดงได้ด้วย Mode Numbers 3 ตัว สัญลักษณ์ของโหมดหนึ่งๆ ของเลเซอร์จะเขียนแสดงด้วย TEM_{mnq} โดยที่ TEM หมายถึง Transverse Electro-Magnetic คลื่นแสงประกอบด้วยสนาม

แม้เหล็กไฟฟ้าที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ดังที่กล่าวมาแล้วว่าค่า q นั้นมีจำนวนมากมาย สำหรับขนาดของเลเซอร์ที่ใช้งานทั่วไป ดังนั้นค่าที่เหมาะสมของมันจึงไม่มี จึงไม่มีความหมายนักในทางปฏิบัติ แต่ค่าของ m และ n นั้นมีน้อยกว่ามากและสามารถกำหนดได้โดยตรวจสอบดูจากเอาท์พุทของเลเซอร์ ดังนั้นในการเขียนบอกโหมดของเลเซอร์ จึงมักตัดค่า q ทิ้งไปเสีย เหลือแต่แสดงในรูปของ TEM_{mn} แต่ยังคงหมายความว่าค่า q ซึ่งเป็น Longitudinal Modes อยู่ในคลื่นนั้นเสมอโดยมีค่าที่กำหนดอันหนึ่งซึ่งเป็นตัวกำหนดการกระจายออกภายในสเปคตรัมของเลเซอร์เอาท์พุทโครงสร้างโหมดของเลเซอร์ นั้นมีความสำคัญต่อการใช้งานของเลเซอร์ ตัวอย่างเช่น Transverse Mode ของเลเซอร์บางโหมดจะมีการบานออกของลำแสงมากเกินไป และไม่เหมาะสมเมื่อต้องการนำมาใช้งานในลักษณะที่ต้องโฟกัสให้คมชัด และยังเป็นตัวกำหนดความเป็นโคฮีเร้นท์ของลำแสงนั้นอีกด้วย

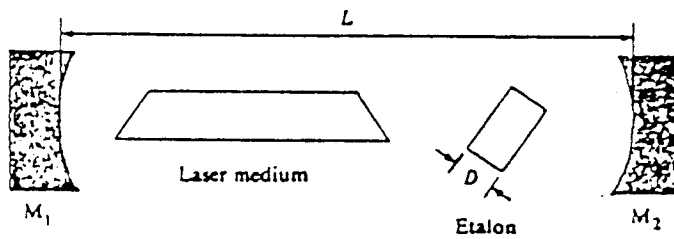
เลเซอร์โหมดเดี่ยว



รูปที่ 3.13 วิธีทำโหมดเดี่ยวของเลเซอร์โดยใช้ควิต์สั้น ๆ ซึ่งยาวกว่า Linewidth ของเลเซอร์เล็กน้อย

เลเซอร์ที่สามารถทำงานได้เป็นโหมดเดี่ยวทั้งแบบ Longitudinal และ Trans-

verse จะมีลักษณะของแหล่งกำเนิดแสงสีเดียวในอุดมคติมากที่สุด Linewidth จะแคบมาก วิธีการทำให้เกิดโหมดเดียวมีหลายวิธี เริ่มต้นตั้งแต่การใส่รูแสงเข้าไปในเลเซอร์แควิตีเพื่อให้มีแต่ TEM_{00} เสียก่อน จากนั้นจึงมาจัดการกับ Axial Mode โดยการออกแบบแควิตีที่สามารถให้ Axial Mode เพียงอันเดียว แควิตีดังกล่าวจะมี Transition Linewidth แคบมาก จนโหมด q_0-1 ซึ่งเป็นโหมดข้างเคียงจะอยู่นอก Transition Linewidth นี้ ดังแสดงในรูปที่ 3.13 สุดท้ายเราจะได้ TEM_{00} เพียงโหมดเดียวแต่ระยะห่างของแควิตีทำให้เกิดโหมดเดียวได้นี้ ($c/2L$) จะต้องมีค่าโตกว่า Linewidth ของเลเซอร์เล็กน้อย และค่า Linewidth ของเลเซอร์นี้เป็นค่าที่เราควบคุมไม่ได้เป็นลักษณะธรรมชาติเฉพาะตัวของเลเซอร์แต่ละชนิด ดังนั้นระยะห่างของแควิตีโหมดเดียวจึงถูกจำกัดด้วยค่า Linewidth ของเลเซอร์ที่เล็กมาก ดังนั้น $c/2L$ จึงมีค่าน้อยมากตามเมื่อแควิตีมีขนาดสั้นจึงเป็นสาเหตุของขีดจำกัดในด้านกำลังเลเซอร์ หากใช้วิธีการข้างต้น



รูปที่ 3.14 วิธีการใช้ Etalon ในการทำเลเซอร์โหมดเดียว

อีกวิธีหนึ่งได้แก่การทำให้เกิด Loss มากๆ แก่โหมดอื่นๆ และเหลือไว้เพียง Axial Modes หนึ่งโหมดเท่านั้นในทางปฏิบัติทำได้โดยการใส่ Fabry-Perot Cavity ที่มีขนาดคงที่เข้าไปในเลเซอร์แควิตีดังแสดงในรูปที่ 3.14 แควิตีที่ใส่เพิ่มเข้าไปนี้เป็นชิ้นแก้วพิเศษเรียกว่า Etalon ซึ่งมีผิวทั้งสองข้างขัดฝนจนเรียบและวางขนานดีมาก แควิตีของ Etalon แตกต่างไปจากเลเซอร์แควิตีใน 2 ประเด็น คือ 1) ผิวของ Etalon ไม่มีการเคลือบสารใด ๆ จึงมีการสะท้อนแสงน้อยมาก เนื่องจากมีการสะท้อนแสงต่ำนี้เอง การก้ำทอนของแควิตีของ Etalon จึงกว้างกว่าการก้ำทอนของเลเซอร์แควิตี 2) ระยะห่างของแควิตีของ Etalon สั้นกว่าเลเซอร์แควิตีดังนั้นระยะห่างระหว่างค่าความถี่ก้ำทอนของ Etalon จึงกว้างกว่าระยะห่างระหว่างค่าความถี่ก้ำทอนของเลเซอร์ Etalon จึงมีผลให้เกิดก้ำทอนบางส่วนมี loss สูงกว่าบางตัว เลเซอร์จึงมีแนวโน้มที่จะทำงานแบบ

โหมดเดี่ยวที่มี loss น้อยที่สุด กำลังของเลเซอร์ที่เคยกระจายให้กับทุกๆ Axial Modes จะมาปรากฏที่โหมดเดี่ยวถึง 75 % และถ้าเอียง Etalon ให้ทำมุมกับแกนแสงแล้ว ค่าความถี่ที่ก้ำทอนของ Etalon จะเปลี่ยนค่าไปได้ภายใน Transition Linewidth ของเลเซอร์นั้น โหมดของเลเซอร์แควิตีต่าง ๆ จะมีค่า Q สูงขึ้น และแสงเลเซอร์ก็จะเกิดได้ที่ค่าความถี่ใหม่ ๆ ตามไปได้ ดังนั้นการเอียงขึ้น Etalon นี้จึงเป็นวิธีการปรับค่าความถี่ของเลเซอร์ภายในแถบความถี่แคบ ๆ ได้

Q The Quality Factor

ตัวก้ำทอนความถี่ทุกตัวจะมีค่า Q หรือค่า Quality Factor ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$Q = 2\pi \times \text{พลังงานที่ถูกสะสม} / \text{พลังงานที่คายออกมาต่อรอบความถี่}$$

นิยามของค่า Q นี้เป็นการกำหนดแบบทั่วไป ใช้ได้ทั้งกับวงจรไฟฟ้า ระบบทางแมคคาณิกส์แควิตี ของไมโครเวฟ และแควิตีของเลเซอร์ วงจรไฟฟ้าที่เป็น Oscillation Circuit ซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทานตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ จะมีค่า Q หลายร้อย ในขณะที่เลเซอร์มีค่า Q สูงถึง 10^5 หรือ 10^6 แควิตีที่มีค่า Q มีส่วนเกี่ยวข้องกับความกว้างของเส้นความถี่ในเชิงสัมพัทธ์ กล่าวคือ ระบบที่มีค่า Q ต่ำจะมีความกว้างความถี่สัมพัทธ์ระหว่างค่า Q กับความกว้างของเส้นความถี่นี้มีแสดงดังสูตร

$$Q = \text{ความถี่ก้ำทอน} / \text{ความกว้างของเส้นความถี่}$$

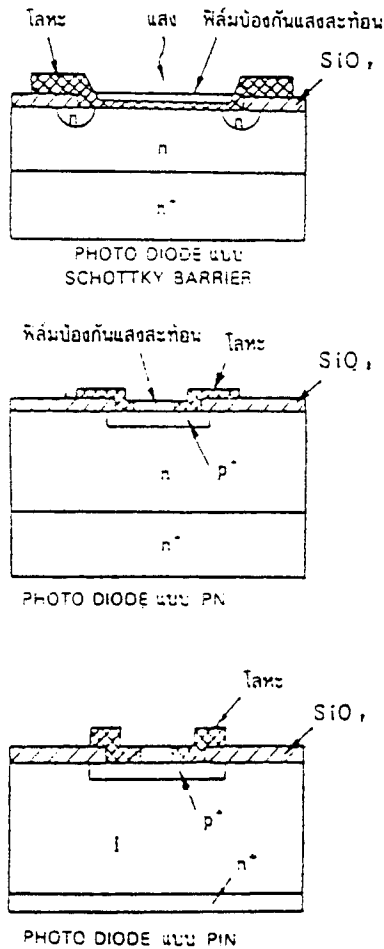
$$= \nu / \Delta \nu$$

อุปกรณ์รับแสงแบบ photo current (photodiode)

สิ่งที่เป็นตัวแทนของอุปกรณ์รับแสงแบบ photo current ก็คือ photo diode แต่
ที่นอกเหนือจาก photo diode แล้วยังมี avalanche photodiode (APD) ซึ่งใช้
ปฏิกิริยา avalanche multiplication ทำให้ได้ gain 0 ภายในตัว และ photo
transistor ซึ่งทำการขยาย photo current โดยใช้ปฏิกิริยาการทำงานของ tran-
sistor

photo diode

สำหรับโครงสร้างของ photo diode นั้นมีหลายแบบคือแบบ schottky barrier
แบบ pn junction, และแบบ pin ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 โครงสร้างโฟโตไดโอดชนิดต่าง ๆ

แบบ PIN นั้นเป็นแบบที่นำ I-layer ซึ่งเป็น layer ที่มีปริมาณของสารไม่บริสุทธิ์ น้อยมากไปคั่นระหว่าง PN-JUNCTION และเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับกรณีที่ต้องการสัมประสิทธิ์ การดูดแสงต่ำและแสงสามารถเข้าไปได้ลึกเช่นเดียวกัน Si แสงอินฟราเรด ที่เข้าไปใน ผลึกของ Si นั้น สามารถเข้าไปได้ลึกมากกว่าหลายสิบลำดับ μm สำหรับ PN-JUNCTION ปกติ ทั่วไป เนื่องจากความกว้างของ depletion layer มีค่าหลาย μm ดังนั้นส่วนใหญ่การ ดูดแสงจะเกิดขึ้นที่บริเวณ neutral region ในกรณีเช่นนี้ carrier ที่ถูกกระตุ้นที่ neutral region จะเกิด recombination และหมดไปได้ง่าย ดังนั้นจะทำให้ประ สรสิทธิภาพ quantum efficiency น้อยลง นอกจากนั้น carrier ที่ไหลจาก neutral region เข้าไปยัง depletion layer กลายเป็น diffusion current ที่มีความ เร็วช้า ทำให้ frequency characteristic เลวลง ในการปรับปรุงแก้ไขข้อเสียของ photodiode แบบ PN นี้ สำหรับแบบ PIN นั้นมีโครงสร้างที่ทำการดูดแสงที่ I-layer ซึ่งสามารถทำให้ได้ depletion layer กว้างมาก แม้จะให้แรงดันไบอัสต่ำก็ตามเนื่อง จากแรงดันไบอัสเป็นส่วนหนึ่งของผลคูณของความกว้างของ depletion layer กับความ เข้มข้นของสารไม่บริสุทธิ์ ดังนั้นแม้ว่าจะมีแรงดันเท่ากันแต่ความเข้มของสารไม่บริสุทธิ์ยิ่ง น้อยจะทำให้ความกว้างของ depletion layer กว้างมากขึ้น สำหรับ Si นั้น สามารถ ทำให้ความเข้มข้นของ I-Layer มีค่าน้อยประมาณ $10/\text{cm}$ ดังนั้นจึงสามารถได้ความ กว้างของ depletion layer หลายสิบลำดับ μm ที่แรงดันหลายสิบลำดับโวลต์

ความไวของ photodiode นั้น แสดงด้วยปริมาณที่เรียกว่า quantum efficiency

quantum efficiency (η) เป็นตัวบอกประสิทธิภาพของ photoelectric conversion ดังแสดงด้วยสมการต่อไปนี้

$$\eta = \frac{\text{จำนวนอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิด photo current}}{\text{จำนวน โฟตอนที่ป้อนเข้าไป}}$$

$$= \frac{(I_p/q)}{(P_o/h\nu)} \dots\dots\dots 12$$

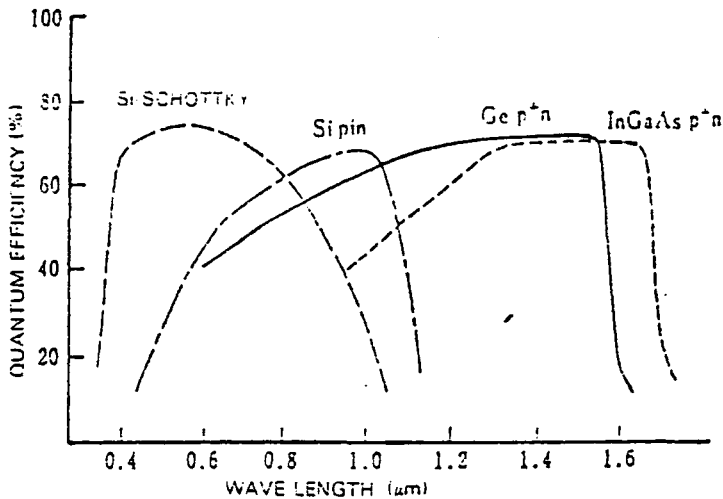
ในที่นี้

I_p เป็น photo current

q เป็น ประจุของอิเล็กตรอน

P_o เป็น optical power

$h\nu$ เป็น พลังงานของโฟตอนที่จำนวนการสั่นเท่ากับ ν



รูป 3.16 แสดง quantum efficiency ของ photodiode ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น

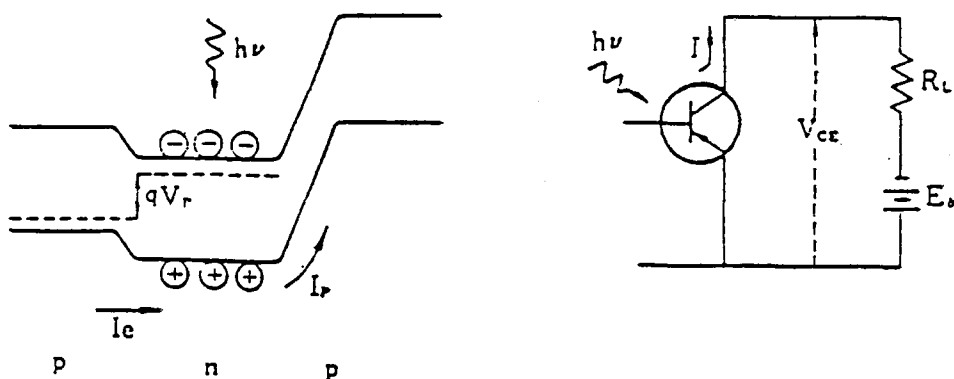
สำหรับ photodiode ที่มี I-layer หนานั้นจะเห็นว่า quantum efficiency ทางด้านความยาวคลื่นจะดี และ quantum efficiency ทางด้านความยาวคลื่นสั้นจะเห็นว่า แบบ schottky นั้นดีกว่า แบบ junction ขีดจำกัดการ detection แสงของ Si photodiode ทำการ detection แสงได้ถึง $1.1 \mu\text{m}$ ส่วน Ge photodiode ทำการ detection แสงได้ถึง $1.6 \mu\text{m}$ นอกจากนั้นยังมีสารที่สามารถให้ detection แสงได้ถึง far infrared ด้วย สำหรับย่านความยาวคลื่น near infrared ที่มีความยาวคลื่นหลายสิบลบ μm นั้น ได้มีการพัฒนา photodiode ที่ทำจากสารประกอบ 3 ชนิด เช่น HgCdTe, PbSse เป็นต้น

photo transistor

เนื่องจาก photo transistor จัดเป็น PN-JUNCTION photodiode เช่นกัน

การป้อน carrier จำนวนน้อยอันเนื่องมาจากแสงนั้นทำหน้าที่เหมือน emitter ของ transistor ดังนั้น บางครั้งจึงเรียกชื่ออีกอย่างว่า phototransistor สำหรับ phototransistor ธรรมดา นั้นหมายถึง transistor ที่มีโครงสร้าง npn, pnp ซึ่ง base ของมันจะเป็นส่วนรับแสง

หลักการทำงานของ phototransistor เป็นดังแสดงในรูป 3.17 กล่าวคือ base จะปล่อย open เอาไว้เมื่อป้อนแรงดัน V_{ce} ระหว่าง emitter กับ collector จะทำให้ emitter-base เป็น forward bias ส่วน base กับ collector จะเป็น reverse bias, emitter กับ base จะมีสภาพเหมือนกันกับ photoelectromotive cell ที่เป็นวงจรเปิด, photo carrier ที่ถูกกระตุ้นที่ base จะทำให้ bias มีค่ามากทาง forward จากการเปลี่ยนแปลงนี้จะทำให้ emitter current (I_e) เพิ่มขึ้นโดยการกระทำเช่นนี้ ผลต่างของความต่างศักย์ค่าเล็กน้อยที่เกิดจากการมีแสงมากระทบ จะไปทำให้กระแสของวงจรข้างนอกเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น output current ของมันเมื่อเปรียบเทียบกับ photo diode แล้วจะมีค่ามาก อนึ่ง แม้ในสภาพไม่มีแสงมากระทบก็ตาม เนื่องจากมี I_e ไหลอยู่ จึงไม่เหมาะแก่การนำไปใช้ในการวัดแสงที่มีค่าน้อยได้เหมือนอย่าง photo diode ความถี่การตอบสนองก็เช่นกัน มีความเร็วต่ำมากคือแค่หลายสิบลีบ kHz



รูปที่ 3.17 หลักการทำงานของ PHOTOTRANSISTOR

อุปกรณ์รับแสงที่ใช้กับการสื่อสาร

สำหรับกรณีที่ใช้เส้นใยแสงนั้นต่างกับกรณีทำการสื่อสารโดยส่งลำแสงเลเซอร์ไปในอากาศ กล่าวคือ การขยายกว้างออกของลำแสงที่มาถึงส่วนรับนั้นมีน้อย ลำแสงที่ออกมาจากเส้นใยแสงนั้นสามารถทำการบีบลำแสงให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำกว่า $100\mu\text{m}$ ได้ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์รับแสงที่มีพื้นที่โต ถ้าหากพื้นที่รับแสงมีขนาดเล็กจะสามารถทำให้ทั้ง dark current และ capacitance มีค่าน้อย ทำให้ได้ความไวสูงและมีความเร็วในการตอบสนองสูง จากข้อดีต่าง ๆ เหล่านี้ในการสื่อสารเส้นใยแสงจึงอาจกล่าวได้ว่าเป็นระบบที่เหมาะสมแก่การใช้อุปกรณ์รับแสง อุปกรณ์รับแสงที่ใช้กับการสื่อสารควรมีคุณสมบัติตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

ความไวตามความยาวคลื่นแสงที่ใช้งาน

ความยาวคลื่นที่ใช้ในการส่งไปในเส้นใยแสงนั้นต้องเป็นความยาวคลื่นที่มีการสูญเสียในการส่งน้อยอยู่ในช่วง $0.8-0.9\mu\text{m}$ และ $1.1-1.7\mu\text{m}$ เมื่อพิจารณาจากช่วงการดูดแสงของสารกึ่งตัวนำจะเห็นว่าสำหรับ Si นั้นใช้ได้เฉพาะช่วง $0.8 - 0.9\mu\text{m}$ เท่านั้น สำหรับช่วงความยาวคลื่นยาว พวก Ge, InGaAs, GaAsSb และอื่น ๆ เหมาะแก่การใช้งาน อนึ่ง หลอด photo tube นั้น ในย่านอินฟราเรด แล้วมีข้อเสีย กล่าวคือ quantum efficiency จะน้อยมาก อย่างไรก็ตาม หลอด photo tube ซึ่งใช้สารกึ่งตัวนำ nea เป็น cathode ซึ่งให้ quantum efficiency สูงก็ตาม แต่ก็ยังมีขีดจำกัดที่สามารถทำการ detection แสงด้วย quantum efficiency สูง ได้แก่ความยาวคลื่นประมาณ $1.1\mu\text{m}$ เท่านั้น

ความเร็วในการตอบสนอง

ระบบการส่งแสงมีการใช้การส่งด้วยความเร็วต่ำกว่า 1 MHz ไปจนถึงหลายร้อย Mb/s ในอนาคต เพื่อให้ความประหยัดของระบบสูงขึ้นจะใช้วิธีการ frequency multiplex กับ การสื่อสารแสงและส่งด้วยความเร็วสูงมากในระดับ GHz สำหรับ photo diode นั้น เนื่องจากความเร็วการตอบสนองของมันเกี่ยวข้องกับทั้ง quantum efficiency และพื้นที่การรับแสง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบให้เหมาะสมกับความถี่ที่ใช้ นอกจากนั้นในกรณีของแสงที่ผสมด้วย pulse modulation นั้น มีกรณีที่เกิดปัญหาซึ่งแตกต่างกับกรณีของแสงที่ผสมด้วย analog sinusoidal modulation กล่าวคือ photo current ที่ได้รับจากอุปกรณ์รับแสงนั้น เนื่องจากมีส่วนที่ตอบสนองเร็วกว่าส่วนที่ตอบสนองช้า

ซ้อนกันอยู่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในตอนที่ optical pulse นั้น photo current จะกลายเป็นพัลส์ที่มีรูปคลื่นเพี้ยนไป ทำให้คุณสมบัติการตอบสนองตกลง ในกรณีที่คำนึงถึงความเร็วการตอบสนองอย่างนี้นั้นไม่แต่เพียง cutoff frequency ของอุปกรณ์รับแสงเท่านั้นที่เป็นปัญหา แต่รูปคลื่นของการตอบสนองก็เป็นปัญหาด้วยเหมือนกัน

ความไวของการตรวจจับ

ความไวของการตรวจจับของอุปกรณ์รับแสงนั้น ถ้ายิ่งสูงมากเท่าไรก็จะยิ่งทำให้สามารถส่งแสงไปได้ไกล โดยไม่ต้องมี repeater ดังนั้น ในการใช้กับการสื่อสารโดยทั่วไปแล้วจึงต้องการให้สามารถตรวจจับแสงที่มีกำลังต่ำมากจาก nW ไปจนถึง μ m ได้ (นั่นคือมี SNR ที่ดีพอ) ด้วยเหตุนี้จึงต้องการอุปกรณ์รับแสงที่มี quantum efficiency สูง (มากกว่า 50 % ขึ้นไป) และมี noise ต่ำ, ในการลด noise นั้นสำหรับ photodiode จะต้องทำให้ dark current มีค่าน้อย นอกจากนั้น สำหรับอุปกรณ์รับแสงที่มีการขยายภายในอย่างเช่น APD นั้น การทำให้ noise ส่วนเกินที่เกิดจากการขยายมีค่าน้อยนั้นเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง

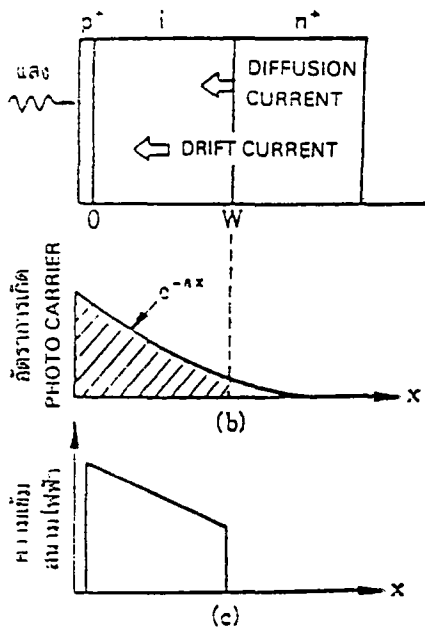
เงื่อนไขอื่น ๆ

เมื่อแรงดันไฟฟ้าของการทำงานของอุปกรณ์รับแสงมีค่าสูงขึ้น เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องทำให้วงจรรับมีขนาดใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับ repeater นั้น เนื่องจากมีขีดจำกัดของการจ่ายไฟ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าของการทำงานของอุปกรณ์รับแสงควรมีค่าต่ำจึงจะดี นอกจากนั้นต้องไม่ใช้อุปกรณ์ระบายความร้อนและมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนอุณหภูมิหรือสามารถชดเชยได้ง่าย และไม่มีการเสื่อมลงของคุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง มีขนาดเล็ก ราคาถูก และอื่น ๆ ซึ่งจะเป็นปัญหาในการใช้งาน

อันดับต่อไปจะอธิบายเกี่ยวกับคุณสมบัติของ photodiode และ avalanche photodiode ที่ใช้กับการสื่อสารแสง

photodiode

สำหรับ photodiode นั้น การไหลของ photo current I_p นั้นได้กล่าวถึงหลักการมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ในที่นี้จะขอกกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับคุณสมบัติของ I_p เพิ่มเติมอีกสักเล็กน้อย โดยทั่วไปแล้ว photodiode จะมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แสดงแบบจำลองของโฟโตไดโอด

จากรูป 3.18 กรณีที่พิจารณาถึง photo current ที่ได้รับจาก photodiode นั้น โดยทั่วไปจะไม่คำนึงถึงปริมาณการเกิด photo carrier ของ P-layer (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง P-layer ที่มีโวลมาก) ทั้งนี้เพราะว่าใน photodiode ธรรมดา นั้น PN-junction จะทำให้เกิดขึ้นบางมาก ดังนั้น photo current จะเป็นผลรวมของ diffusion current อันเนื่องมาจาก carrier ที่เกิดขึ้นใน N-layer กับ drift current อันเนื่องมาจาก carrier ที่เกิดขึ้นใน depletion layer ซึ่งมีสนามไฟฟ้าอยู่ อนึ่ง carrier เหล่านี้ ถ้าหากกำหนดให้สัมประสิทธิ์การดูดแสงของ photodiode เป็น a และความลึกจากผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำเป็น x แล้ว ปริมาณการเกิดของมันจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ e^{-ax} ดัง (b) ของรูปที่ 3.18

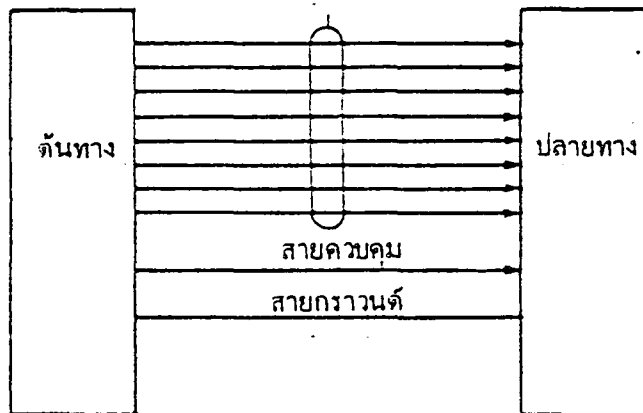
avalanche photo diode (APD)

เนื่องจาก APD มีปฏิกิริยาขยายภายในของกระแสภายในของ photo current อันเนื่องมาจากปรากฏการณ์ avalanche ของอิเล็กตรอนจึงมีความไวดีกว่า photocurrent ธรรมดา 10-20 dB ดังนั้น APD จึงเป็นอุปกรณ์รับแสงที่สำคัญซึ่งใช้กับการสื่อสารแสงระยะทางไกล อาจกล่าวได้ว่า APD เป็นหลอด photo electron amplifier แบบ solid แต่ทว่ามีขนาดเล็กและไม่มีการเสื่อมของผิวนั้นเอง

การสื่อสารข้อมูล

การสื่อสารข้อมูลในระบบไมโครคอมพิวเตอร์แบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ ๆ ด้วยกันคือ

1. การสื่อสารข้อมูลแบบขนาน มีลักษณะดังนี้ ข้อมูลทุก ๆ บิตจะถูกส่งออกไปพร้อมกันในครั้งเดียว เช่น ถ้าข้อมูลที่ส่งเป็น 1010 ข้อมูลทั้งหมดนี้จะถูกส่งออกไปพร้อมกัน โดยผ่านสายส่งข้อมูล 4 เส้น โดยแต่ละบิตจะส่งในสายส่งคนละเส้น ในการสื่อสารหรือส่งผ่านข้อมูลแบบขนานนี้นิยมใช้กับการเชื่อมต่อที่เป็นอินพุทเอาต์พุท การต่อระหว่างระบบไมโครโปรเซสเซอร์และหน่วยความจำต่าง ๆ การต่อระหว่างอุปกรณ์ที่อยู่บนแผงวงจรพิมพ์เดียวกันซึ่งสามารถพิจารณาการสื่อสารข้อมูลแบบขนานได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การสื่อสารข้อมูลแบบขนาน

2. การสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม มีลักษณะดังนี้ ข้อมูลแต่ละบิตจะถูกส่งเรียงกันออกไปเป็นลำดับต่อเนื่องกันไปโดยที่บิตที่มีนัยสำคัญน้อยสุด (Least Significant bit) ถูกส่งออกไปก่อน แล้วตามด้วยบิตที่มีนัยสำคัญสูงขึ้นเรื่อย ๆ และบิตที่มีนัยสำคัญสูงสุด (Most Significant) จะถูกส่งออกมาเป็นบิตสุดท้าย เช่น ถ้าข้อมูลที่ส่งคือ 1010 : เลข 0 ทางขวามือสุดจะถูกส่งออกมาก่อน เพราะเป็นบิตนัยสำคัญต่ำสุดแล้วตามด้วยบิตที่ 2 คือเลข 1 บิตที่ 3 คือเลข 0 และบิตสุดท้ายคือเลข 1 ตามลำดับ โดยที่ข้อมูลแต่ละบิตจะส่งในสายส่งเส้นเดียวกัน การสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมนิยมใช้กับการสื่อสารในระยะทางไกล ๆ

เช่น การสื่อสารผ่านสายโทรศัพท์ เป็นต้น

เมื่อพิจารณาการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม ข้อมูลจากจุดส่งจะถูกเปลี่ยนให้เป็นแบบอนุกรมเสียก่อน จึงค่อยมีการทยอยส่งออกไปครั้งละ 1 บิต ไปยังจุดรับ และที่จุดรับจะมีการเปลี่ยนข้อมูลแบบอนุกรมที่รับเข้ามาเป็นแบบขนานอีกครั้งหนึ่ง เพื่อนำข้อมูลเหล่านั้นไปใช้งานต่อไป

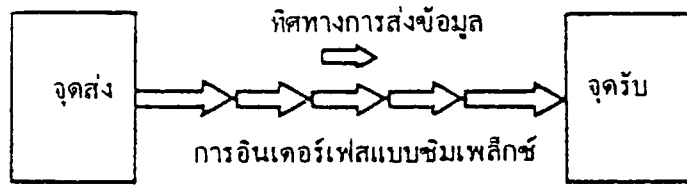
ข้อเปรียบเทียบระหว่างการส่งข้อมูลแบบขนานและแบบอนุกรม

พารามิเตอร์	การส่งข้อมูลแบบขนาน	การส่งข้อมูลแบบอนุกรม
1. ระยะทาง	ปกติจะน้อยกว่า 100 ฟุต	ส่งได้ตั้งแต่ระยะสั้น ๆ จนถึงระยะเป็นไมล์
2. ความเร็ว	อัตราความเร็วสูงมาก	อัตราความเร็วช้ากว่า โดยจะอยู่ในช่วง 0-2 ล้าน บิตต่อวินาที
3. ระดับของสัญญาณ	จะใช้ระดับสัญญาณ TTL คือสัญญาณลอจิก 1 แทนด้วยแรงดัน 5 V สัญญาณลอจิก 0 แทนด้วยแรงดัน 0 V	ใช้มาตรฐาน EIA-RS232C คือมีระดับสัญญาณไฟขนาด +12 V แทนลอจิก 0 และลอจิก 1 หรืออาจใช้ระดับสัญญาณ TTL ก็ได้ แต่ใช้กันน้อยมาก
4. ความผิดพลาดของสัญญาณ	ถ้าส่งสัญญาณในระยะทางไกล ๆ ความผิดพลาดจะเกิดขึ้นได้ง่าย	ความผิดพลาดของสัญญาณจะมีน้อยลง
5. ค่าใช้จ่าย	ถ้าส่งในระยะทางไกล ๆ จะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก เพราะต้องใช้สายส่งสัญญาณหลายเส้น	สิ้นเปลืองน้อยกว่าหลายเท่า เพราะจำนวนสายส่งมีจำนวนน้อย

รูปแบบของการติดต่อสื่อสารแบบอนุกรม

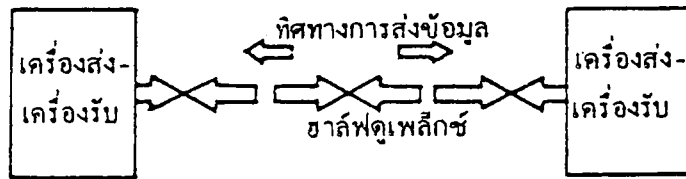
1. การส่งข้อมูลแบบ Simplex เป็นการส่งข้อมูลได้ทางเดียวเท่านั้น เช่น การส่งกระ

จ่ายเสียงวิทยุหรือโทรทัศน์ โดยที่ตัวส่งจะทำหน้าที่ส่งข้อมูลได้อย่างเดียว และไม่สามารถรับข้อมูลได้ ส่วนตัวรับจะรับข้อมูลได้อย่างเดียว และไม่สามารถส่งข้อมูลได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยที่ A ทำหน้าที่เป็นตัวส่งข้อมูล ส่วน B ทำหน้าที่เป็นตัวรับข้อมูล



รูปที่ 4.2 แสดงการส่งข้อมูลแบบ Simplex

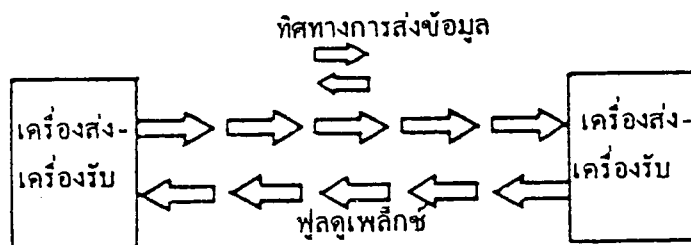
2. การส่งข้อมูลแบบ Half Duplex เป็นการส่งข้อมูลได้ทั้งสองทิศทางแต่ต้องมีการผลัดกันรับและผลัดกันส่งข้อมูล จะส่งและรับพร้อมกันไม่ได้ เช่นระบบ ATM ระบบวิทยุติดต่อ ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงการส่งข้อมูลแบบ Half Duplex

โดยที่ A และ B ทำหน้าที่เป็นตัวส่งและตัวรับข้อมูล แต่ทำหน้าที่คนละเวลากัน คือถ้า A เป็นตัวส่ง B จะเป็นตัวรับ และในทางกลับกัน ถ้า A เป็นตัวรับ B จะเป็นตัวส่ง

3. การส่งข้อมูลแบบ Full Duplex เป็นและส่งข้อมูลได้ทั้งสองทิศทางโดยสามารถส่งและรับข้อมูลได้ในเวลาเดียวกัน เช่น การสื่อสารทางโทรศัพท์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4

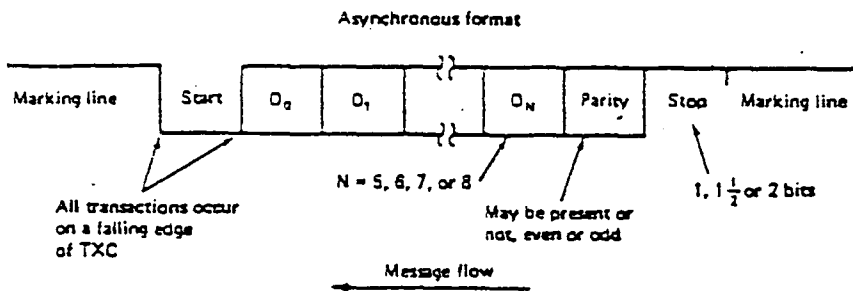


รูปที่ 4.4 แสดงการส่งข้อมูลแบบ Full Duplex

โดยที่ A และ B สามารถเป็นได้ทั้งตัวส่งและตัวรับในเวลาเดียวกัน

การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous)

การสื่อสารข้อมูลแบบนี้ คือ ระบบการรับส่งข้อมูลที่ระยะเวลาระหว่างข้อมูลแต่ละคำที่ถูกส่งออกไปมีค่าไม่แน่นอน เช่น การส่งข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ A ไปยังคอมพิวเตอร์ B ในการป้อนข้อมูลจากคีย์บอร์ดนั้นผู้พิมพ์ข้อมูลไม่สามารถพิมพ์ด้วยอัตราเร็วที่คงที่ได้ จึงทำให้ระยะเวลาที่กดแต่ละครั้งห่างไม่เท่ากัน ซึ่งในการสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัสนั้น ข้อมูลที่ส่งประกอบด้วยบิตเริ่มต้น (Start bit) ส่วนของข้อมูล (Data) และบิตสิ้นสุด (Stop bit) ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงรูปแบบของการสื่อสารแบบอะซิงโครนัส

ขณะที่สถานะของการส่งเป็นแบบว่างหรือไอดีล (Idle) คือ ยังไม่มีสัญญาณส่งออกมาสายส่งจะมีสัญญาณและมีแรงดันตลอดเวลาเพื่อความแน่ใจว่าฝ่ายรับ และฝ่ายส่งยังติดต่อกันอยู่ เมื่อมีการเริ่มส่ง ฝ่ายส่งจะส่งข้อมูลบิตจุดเริ่มต้น สัญญาณของอะซิงโครนัสจะเป็นลอจิก "0" ในช่วงสัญญาณนาฬิกา บิตนี้เรียกว่าบิตสตาร์ท (Start bit) ข้อมูล 1 ตัวอักษรที่ตามหลังบิตสตาร์ทจะมีขนาดตั้งแต่ 5 บิต จนถึง 8 บิต โดยบิตที่มีนัยสำคัญน้อยที่สุด (LSB) จะถูกส่งออกมาก่อนและไล่ไปจนถึงบิตที่มีนัยสำคัญมากที่สุด (MSB) หลังจากนั้นจะเป็นบิตพาริตี (Parity bit) ซึ่งอาจจะไม่มีก็ได้ บิตนี้จะทำหน้าที่เป็นบิตตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่มีการรับส่ง ต่อจากนั้นจะเป็นบิตสิ้นสุด (Stop bit) ซึ่งเป็นลอจิก "1" โดยที่ความกว้างของบิตสิ้นสุดอาจเป็น 1, 1.5 หรือ 2 ฟิลล์ของสัญญาณนาฬิกา ซึ่งแล้วแต่ผู้รับและผู้ส่งจะตกลงใช้กันเอง

การสื่อสารข้อมูลแบบซิงโครนัส (Synchronous)

คือ ระบบการรับส่งข้อมูลที่ข้อมูลแต่ละคำถูกส่งออกไปตามเวลาที่แน่นอน โดยจะมี

การส่งสัญญาณนาฬิกาไปพร้อม ๆ กับสัญญาณข้อมูล ข้อมูลที่ถูกส่งออกไปจะเป็นแบบต่อเนื่อง ไม่มีบิตเริ่มต้น บิตสิ้นสุด และบิตพาริตี โดยการส่งข้อมูลแบบซิงโครนัสจะมี 2 รูปแบบที่แตกต่างกันดังนี้

1.Character Oriented Frame โดยจะเริ่มด้วยอักษรนำคือ Syn Character ซึ่ง Syn Character จะเป็นรูปแบบของเลขฐานสอง "0" และ "1" สลับกัน หลังจากนั้นจะตามด้วย Control Information, Data, Control Character และ Error Checking Character

2.Bit Oriented Frame จะมีการใช้ Bit pattern เป็นตัวบอกจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแต่ละเฟรม ซึ่ง Bit pattern นี้จะมีขนาด 8 บิต และเรียกว่า แพลก (Flag) โดยแพลกที่ใช้มีรูปแบบเป็น 01111110 หลังจากส่ง begining flag ไปแล้ว จะตามด้วย Address field, control field, Data, Error Checking Character และ Ending flag

การตรวจจับข้อผิดพลาดในการสื่อสารแบบอะซิงโครนัส

ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสื่อสารมีหลายประการด้วยกัน ได้แก่

Framing Error

การตรวจจับ Framing Error เกิดขึ้นดังนี้ เมื่ออุปกรณ์ทางด้านตัวรับทำการรับสัญญาณของบิตสิ้นสุด (Stop bit) ซึ่งปกติจะมีลอจิก "1" แต่ปรากฏว่าสัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณลอจิก "0" ฝ่ายรับจะทราบทันทีว่ามีข้อผิดพลาดของข้อมูลเกิดขึ้น

Parity Error

ในการสื่อสารแบบอะซิงโครนัสนี้ อาจจะมีบิตพาริตี (Parity bit) เพิ่มเข้ามาก็ได้โดยบิตนี้จะอยู่ตามหลังข้อมูลที่ส่งไป บิตพาริตีจะทำหน้าที่ในการบอกให้ด้านรับข้อมูลทราบว่าข้อมูลที่ส่งมาแต่ละไบนารีนั้นมีจำนวนบิตที่เป็น "1" อยู่เป็นจำนวนคี่หรือจำนวนคู่ ซึ่งบิตพาริตีจะเป็น "1" หรือ "0" ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ส่งออกมาว่ามีจำนวนบิตที่เป็น "1" เป็นจำนวนคี่หรือคี่ และขึ้นกับอุปกรณ์รับส่งข้อมูลด้วยว่าถูกโปรแกรมให้รับส่งบิตพาริตีในลักษณะของพาริตีคู่หรือพาริตีคี่

ในกรณีอุปกรณ์รับส่งถูกออกแบบให้เป็นพาริตีคู่ อุปกรณ์ส่งข้อมูลจะทำการส่งบิตพาริตีเป็นลอจิก "1" ออกไปเมื่อจำนวนบิตที่เป็น 1 ของข้อมูลเป็นจำนวนคี่ และจะทำการส่งบิต

พาริตีเป็นลอจิก "0" เมื่อจำนวนบิตที่เป็น 1 ของข้อมูลเป็นจำนวนคู่ สำหรับกรณีอุปกรณ์รับส่งถูกออกแบบให้เป็นพาริตีคี่ อุปกรณ์ส่งข้อมูลจะทำการส่งบิตพาริตีเป็นลอจิก "1" ออกไป เมื่อจำนวนบิตที่เป็น 1 ของข้อมูลเป็นจำนวนคู่ และจะส่งบิตพาริตีเป็นลอจิก "0" ในกรณีที่บิตที่เป็น 1 ของข้อมูลเป็นจำนวนคี่

ในการรับส่งข้อมูลนั้น ฝ่ายส่งและฝ่ายรับ ต้องมีการโปรแกรมให้ตรวจสอบบิตพาริตีที่สอดคล้องกัน คือ พาริตีคู่/พาริตีคี่/ไม่มีพาริตี เมื่อฝ่ายส่งทำการส่งข้อมูล ฝ่ายรับก็จะรับข้อมูลและตรวจสอบบิตพาริตีว่าตรงกับฝ่ายส่งหรือไม่ โดยจะทำการเปรียบเทียบค่าของบิตพาริตีที่รับได้กับค่าบิตพาริตีของข้อมูลจริง ถ้าผลของการเปรียบเทียบไม่ตรงกัน ฝ่ายรับก็จะทราบได้ทันทีว่าข้อมูลมีความผิดพลาดของข้อมูลเกิดขึ้น

Receiver Overrun Error

ในการรับส่งข้อมูล อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลจะมีบัฟเฟอร์เก็บข้อมูลที่จะรับส่งอยู่ชุดหนึ่ง ในกรณีของอุปกรณ์ฝ่ายรับข้อมูลนั้น บัฟเฟอร์จะรับข้อมูลที่เป็นแบบขนานมาจากชิพรีจิสเตอร์ ซึ่งในการควบคุมการทำงานนั้นจะต้องมาอ่านข้อมูลในบัฟเฟอร์เมื่อบัฟเฟอร์ที่รับข้อมูลเต็ม แต่ถ้าไม่มีการอ่านข้อมูลในบัฟเฟอร์เข้าไป เมื่อมีข้อมูลไบต์ต่อไปเข้ามาข้อมูลชุดใหม่ก็จะไปทับข้อมูลชุดเก่าทำให้เกิด Overrun Error เกิดขึ้น

ในการใช้งานทั่วไปแล้ว เราจะต้องทำการแฮนด์เชค (Hand-shake) กันระหว่างด้านส่งและด้านรับ เพื่อป้องกันการรับส่งข้อมูลไม่ทันและการเกิด Overrun Error ขึ้นได้

ความเร็วในการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม

1. Bit rate หมายถึง จำนวนของเลขฐานสองที่ส่งใน 1 วินาที เช่น Bit rate อาจจะเป็น 300, 1200, 2400, 4800 และ 9600 bps

2. Baud rate หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณใน 1 วินาที

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Bit rate และ Baud rate

1. ถ้ามีการส่งสัญญาณ 1 สัญญาณ แทน 1 บิต จะทำให้ Bit rate เท่ากับ Baud rate

2. ถ้ามีการส่งสัญญาณ 1 สัญญาณแทน 2 บิต จะทำให้ Bit rate เป็น 2 เท่าของ Baud rate

จากความสัมพันธ์ดังกล่าว จะได้ว่า

$$\text{Bit rate} = (\text{จำนวนบิตใน 1 ไบต์}) \times \text{Baud rate}$$

การเข้ารหัสแบบดิจิทัล

ในการเข้ารหัสแบบดิจิทัลนั้นจะต้องการแบนด์วิดธ์มากกว่าระบบอนาล็อก เช่น ในการส่งสัญญาณข้อมูลแบบอนาล็อก 4 kHz ถ้าเราต้องการส่งในระบบดิจิทัล ซึ่งต้องการการสุ่มตัวอย่าง (sampling) ดังนั้นมันจะต้องการค่าแบนด์วิดธ์ถึง 64 kHz แต่ในการเข้ารหัสแบบดิจิทัลมีข้อดีหลายอย่างเช่น

1. LED และ LD สามารถที่จะสวิตช์ได้อย่างรวดเร็วซึ่งทำให้เกิดแบนด์วิดธ์ที่กว้าง ในขณะที่ตัวไฟเบอร์และดีเทคเตอร์ก็มีค่าแบนด์วิดธ์ที่กว้างด้วย ดังนั้นจึงทำให้เราสามารถส่งข้อมูลเป็นจำนวนมากได้
2. การส่งสัญญาณแบบอนาล็อก สัญญาณอาจจะเพี้ยนอันเนื่องมาจากความไม่เที่ยงตรงของคุณสมบัติทางกำลังต่อกระแส (power-current characteristic) ของ LED และ LD และในการส่งแบบอนาลอกนั้นจะต้องการรูปคลื่นที่แน่นอน ซึ่งสัญญาณดิจิทัลจะมีผลกระทบน้อยกว่า เนื่องจากมันต้องการระดับพลังงานเพียงแค่ 2 ระดับ คือ มีสัญญาณกับไม่มีสัญญาณ
3. สัญญาณแบบดิจิทัลสามารถเชื่อมโยงกับระบบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่เส้นใยนำแสงได้ง่าย เช่นการติดต่อระหว่างขมสายกับไมโครคอมพิวเตอร์
4. พัลส์แบบดิจิทัลนั้นเหมาะสมสำหรับการเพิ่มความแรงของสัญญาณด้วย repeater ซึ่งสัญญาณอนาลอกก็สามารถทำได้แต่จะยากกว่าที่จะทำให้มีรูปคลื่นเหมือนเดิม

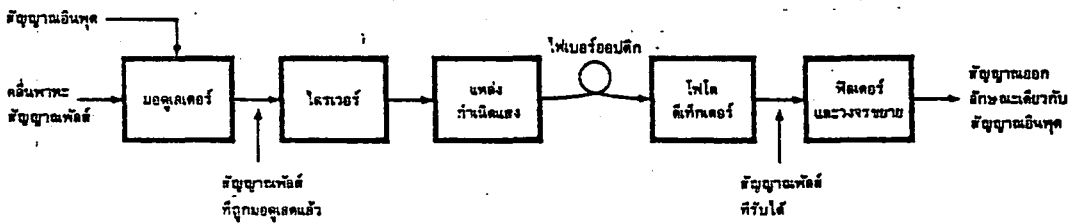
ในตอนต่อไปจะกล่าวถึงการเข้ารหัสแบบดิจิทัลในแบบต่าง ๆ ดังนี้

1. Pulse-Amplitude Modulation (PAM)

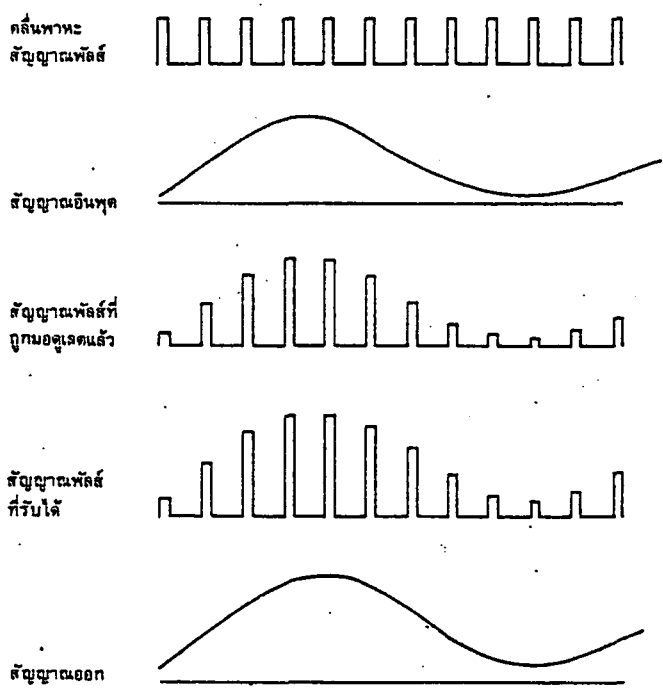
ลักษณะการทำงานของระบบ PAM จะแสดงดังรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นการโมดูลเลทโดยใช้ขนาดของสัญญาณทางด้านอินพุทที่เป็นสัญญาณแบบอนาลอก เป็นตัวกำหนดขนาดของสัญญาณพัลส์ที่ทำหน้าที่เป็นคลื่นพาหะสัญญาณพัลส์ที่ถูกโมดูลเลทแล้วจะทำหน้าที่ควบคุมแหล่งกำเนิดแสงให้ทำการส่งสัญญาณข้อมูลที่เป็นพลังงานความเข้มของแสงโดยขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของพัลส์โดยตรง โดยที่ความถี่ของพัลส์ที่เป็นคลื่นพาหะต้องมีค่ามากกว่าความถี่ของสัญญาณด้านอินพุทอย่างน้อย 2 เท่า ค่าความถี่ของคลื่นพาหะนี้เราเรียกว่า อัตราการแซมปลิง (sampling rate) ในระบบทั่ว ๆ ไปอาจใช้อัตราการแซมปลิงมากกว่าความถี่ของสัญญาณอินพุทประมาณ 3 หรือ 4 เท่า ตัวอย่างเช่นในระบบที่ต้องการส่งข้อมูลที่เป็นสัญญาณ

เสียงพูด (โทรศัพท์) ซึ่งมีค่าแบนด์วิดธ์ของสัญญาณข้อมูล (เสียงพูด) ประมาณ 4,000 Hz อาจจะใช้สัญญาณพัลส์ที่เป็นคลื่นพาหะมีค่าความถี่ประมาณ 16 kHz เป็นตัวส่งข้อมูล

โดยปกติระบบการโมดูเลตแบบ Pulse-Code Modulation ไม่ค่อยนิยมใช้กันมากนัก นอกจากจะใช้กับระบบการสื่อสารระยะไกล เพราะ PAM มีข้อเสียตรงที่มีความไวต่อการเกิดสัญญาณรบกวนสูงมาก



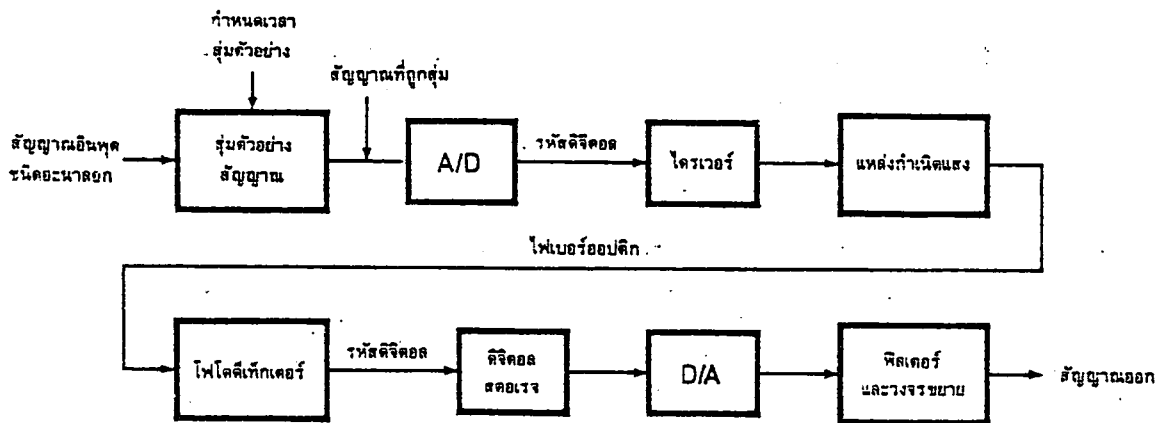
รูปที่ 4.6 บล็อกไดอะแกรมของระบบ PAM



รูปที่ 4.7 การผสมสัญญาณแบบ PAM

2. Pulse-Code Modulation (PCM)

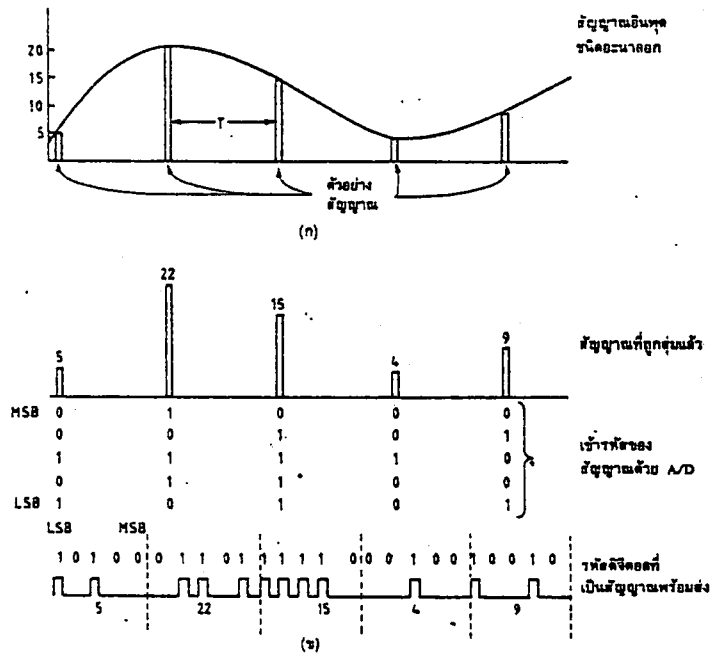
เป็นเทคนิคการโมดูเลตที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบสื่อสาร โดยเฉพาะในระบบโทรศัพท์ทางไกล ลักษณะการทำงานของระบบ PCM แสดงดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ในตอนแรกสัญญาณอินพุตจะถูกสุ่มตัวอย่างหรือ sampling ด้วยอัตราการแซมปลิงเหมือนกับระบบ PAM จากนั้นขนาดของสัญญาณที่ถูกสุ่มออกมา (ซึ่งก็คือแอมพลิจูดของพัลส์ในระบบ PAM) จะถูกทำการเข้ารหัสเป็นข้อมูลทางดิจิทัลด้วยระบบไบนารี ความละเอียดของสัญญาณขึ้นกับความละเอียดของระดับสัญญาณนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนบิตที่ใช้ในการเข้ารหัส ข้อมูลดิจิทัลที่ถูกเข้ารหัสแล้ว จะทำหน้าที่ควบคุมแหล่งกำเนิดแสงให้ส่งข้อมูลออกไปในลักษณะของสวิตช์ปิด-เปิด ดังนั้นในระบบนี้จะไม่คำนึงถึงระดับความเข้มของแสงเลย นอกจากการปิด-เปิดแสงในช่วงเวลาที่กำหนดในแต่ละบิตข้อมูล ทำให้ลดการเกิดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบ PAM ลงได้มาก สัญญาณดิจิทัลที่รับได้ในภาครับ จะถูกแปลงกลับสู่ระบบอนาลอกอีกครั้งหนึ่ง ก่อนถูกส่งผ่านวงจรกรองความถี่ เพื่อให้ได้สัญญาณที่มีลักษณะ เดียวกันกับสัญญาณอินพุตก่อนที่ จะนำไปขยายสัญญาณเพื่อนำไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 4.8 บล็อกไดอะแกรมของระบบ PCM

โดยประสิทธิภาพการส่งข้อมูลหรือบิตเรต (bit rate) ในลักษณะของจำนวนบิตต่อเวลา ตัวอย่างเช่น ระบบโทรศัพท์ที่มีค่าแบนด์วิดธ์ของข้อมูล (เสียงพูด) 4 kHz หาก

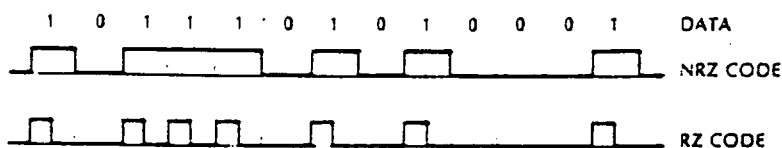
ใช้อัตราการแซมปลิง 4 เท่า คือใช้ค่าความถี่เท่ากับ 16 kHz และให้ข้อมูลแต่ละค่าที่เกิดจากการสุ่มตัวอย่างถูกแปลงเป็นเลขไบนารีชนิด 8 บิตจะทำให้ได้บิตเรทมีค่าเท่ากับ 128 kb/s



รูปที่ 4.9 รูปคลื่นของสัญญาณการผสมแบบ PCM

ในระบบ PCM เมื่อข้อมูลเป็นแบบดิจิทัลจะมีวิธีการเข้ารหัสแบบต่าง ๆ ดังนี้

-ระบบ NRZ (Non-return-to-zero) ระบบนี้เมื่อข้อมูลเป็น 1 ติดต่อกันจะมีค่ามากกว่าที่เมื่อข้อมูลเป็น 0 หรือ 1 สลับกัน หรือเป็น 0 ตลอด โดยในตัวรับสัญญาณกระแสตรงจะเป็นตัวกำหนดจุดทำงานของตัวขยาย

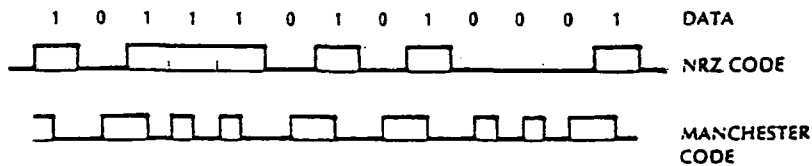


รูปที่ 4.10 การเข้ารหัสแบบ NRZ และ NZ

-ระบบ RZ (Return-to-zero) ระบบนี้ต้องการแบนด์วิดท์มากกว่าระบบ NRZ 2 เท่า เนื่องจากในครึ่งบิตหลังสัญญาณจะกลับมาที่ 0

ในบางระบบ ตัวรับจะต้องรู้สัญญาณนาฬิกา ซึ่งทั้ง NRZ และ RZ บางข้อมูลเราจะไม่รู้สัญญาณนาฬิกาเช่นใน NRZ เมื่อข้อมูลเป็น 1 หรือ 0 ตลอดเราจะไม่สามารถทราบอัตราสัญญาณนาฬิกาได้

-ระบบ Manchester สามารถจัดปัญหาข้างต้นได้ ซึ่งจะมีลักษณะการเข้ารหัสดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 การเข้ารหัสแบบ MANCHESTER

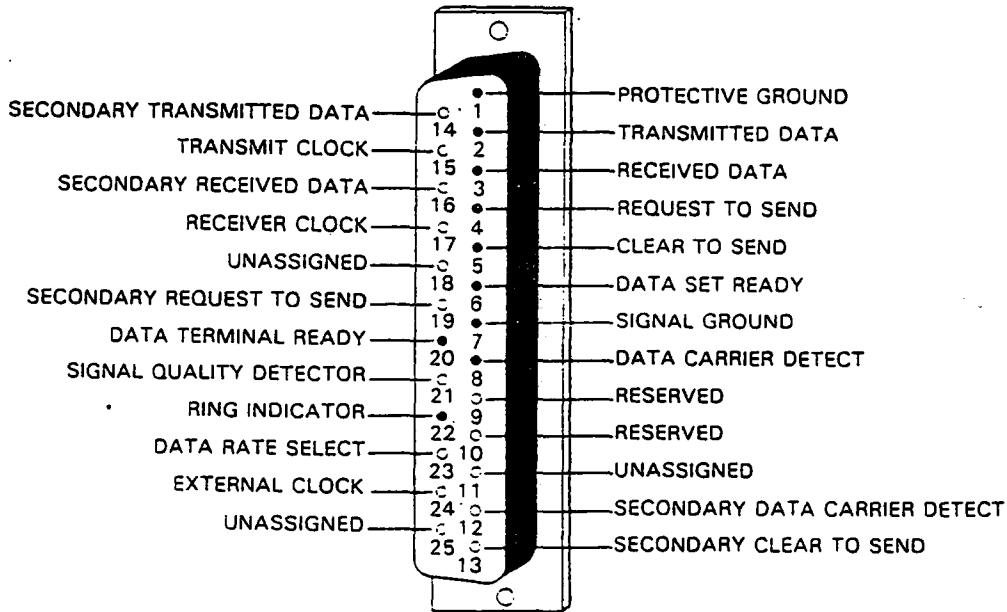
แบบจำลองของวงจรการสื่อสารแบบ RS-232 C

ข้อกำหนดตาม RS-232 C นั้น บอกถึงการเดินสายในเคเบิลที่ต่อระหว่าง DTE กับ DCE เป็นเคเบิลที่ต่อกับปลั๊ก 25 ขา ที่เสียบเข้ากับคอนเนกเตอร์ serial port ที่หลังคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์ปลายทางต่าง ๆ ปลั๊กนี้มีลักษณะดังรูปที่ 4.12 ซึ่งข้อกำหนดจะกำหนดระดับโวลต์เตจและคุณสมบัติทางไฟฟ้าอย่างอื่นของสายในเคเบิล พร้อมทั้งอธิบายหน้าที่ของมัน

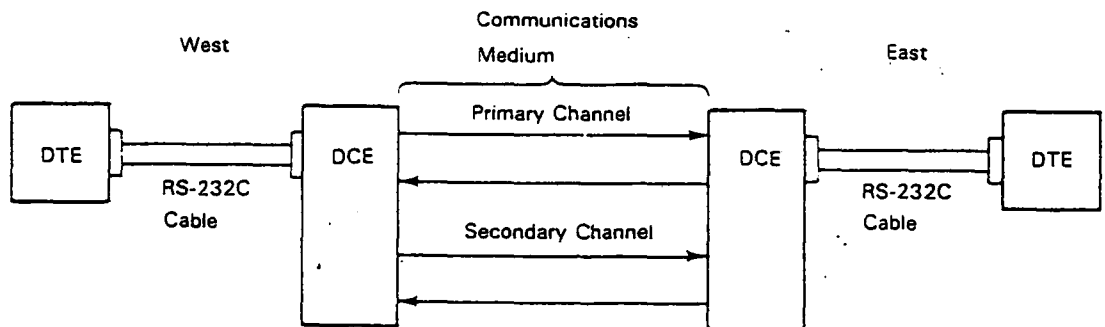
รูปแบบแสดงแนวคิดของตัวกลางการสื่อสารที่ใช้ในข้อกำหนด RS-232 C แสดงดังรูปที่ 4.13 โดยตัวกลางการสื่อสารประกอบด้วย ช่องสัญญาณหลัก (primary channel) และช่องสัญญาณรอง (secondary channel) ซึ่งช่องสัญญาณนั้นเป็นช่องทาง (pipe line) ที่สัญญาณไหลผ่าน ดังนั้นช่องสัญญาณหลักและช่องสัญญาณรองนั้นอาจจะมีอยู่ในสายคู่เดียวกัน หรือคนละคู่ก็ได้

ที่เกี่ยวข้องกับช่องสัญญาณ ก็คือแนวความคิดเรื่อง คลื่นพาห์ (carrier) คลื่นพาห์คือสัญญาณอนาล็อกที่ความถี่ที่เหมาะสมที่จะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางการสื่อสารได้ ตัวพาห์เป็นตัวบรรทุกข้อมูลที่เรียกว่า มอดดูเลทข้อมูลเพื่อนำข้อมูลผ่านตัวกลางการสื่อสารไปสู่จุดหมาย ในแต่ละช่องสัญญาณ มีสัญญาณคลื่นพาห์ 2 สัญญาณ แต่ละสัญญาณใช้สำหรับการส่งแต่

ละทิศทาง ถ้าคลื่นพาห์ทั้งสองสามารถใช้ได้พร้อมกัน ช่องสัญญาณก็จะเป็นชนิดพูลดิวเพล็กซ์ แต่ถ้าต้องใช้สลับเวลากัน ช่องสัญญาณนั้นก็จะเป็นชนิด ฮาล์ฟดิวเพล็กซ์



รูปที่ 4.12 แสดง RS-232 C Female Connector



รูปที่ 4.13 แสดงแบบจำลองวงจรสื่อสารสื่อสารที่ใช้ RS-232 C

ช่องสัญญาณมีค่าความจุ (capacity) ซึ่งมีค่าเท่ากับ จำนวนบิตต่อวินาทีที่มากที่สุดที่ ช่องสัญญาณยอมให้ผ่านตัวมันไปได้ ช่องสัญญาณรองไม่จำเป็นที่จะต้องมิให้อยู่ในทุกโมเด็มแต่ ถ้ามีอยู่แล้วค่าความจุ (ความเร็ว) ของมันจะน้อยกว่าค่าความจุของช่องสัญญาณหลักเพราะ ถ้าไม่เป็นเช่นนั้นมันก็จะไม่มีความแตกต่างระหว่างช่องสัญญาณหลักกับช่องสัญญาณรอง

RS-232 C จะมีฟังก์ชันหลายอย่างไว้ให้กับผู้ออกแบบโมเด็ม เช่น จะให้ช่องสัญญาณ เป็น ฮาล์ฟดวลเพล็กซ์หรือฟูลดวลเพล็กซ์ ช่องสัญญาณจะเป็นแบบซิงโครนัสหรืออะซิงโครนัส จะให้มีช่องสัญญาณรองหรือไม่ ซึ่งจะทำให้จำนวนของสายเคเบิล RS-232 C ที่ใช้ควบคุม DCE จะถูกใช้ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับการออกแบบ

ข้อกำหนดทางไฟฟ้า

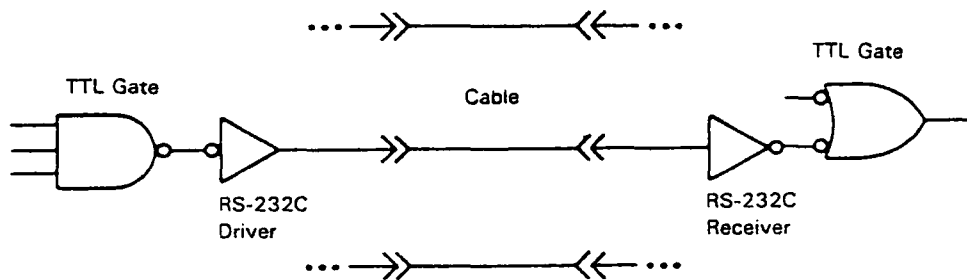
รายละเอียดเกี่ยวกับคุณสมบัติของสัญญาณไฟฟ้าบนสายแต่ละสายในเคเบิล RS-232C มีมากมาย แต่เพราะเราเกี่ยวข้องกับสัญญาณไบนารี ข้อจำกัดเกี่ยวกับโวลต์เตจจึงถูกกำหนดลงใน 2 บริเวณดังตารางที่ 4.1 ซึ่งบริเวณบวก (positive region) อยู่ระหว่าง +3 ถึง +15 โวลต์ DC และบริเวณลบ (negative region) อยู่ระหว่าง -3 ถึง -15 โวลต์ DC บริเวณระหว่าง -3 ถึง 3 โวลต์ถือเป็นบริเวณเปลี่ยนถ่ายสถานะ (transition region) มีข้อกำหนดให้สัญญาณจะมีสถานะอยู่ในบริเวณนี้ได้ไม่เกิน 1 มิลลิวินาที ในบริเวณเปลี่ยนถ่ายสถานะนี้จะไม่มีการกำหนดสถานะภาพให้กับสัญญาณแต่อย่างใด

บริเวณเหล่านี้ ใช้เกี่ยวข้องกับสถานะไบนารีของสายสัญญาณในลักษณะที่เป็นเอกเทศ การแปลความหมายของระดับโวลต์เตจ ขึ้นอยู่กับหน้าที่ของสาย ซึ่งกำหนดแบ่งเป็นตาม ตารางที่ 4.1

WIRE JUNCTION	VOLTAGE LEVEL	
	Positive	Negative
Data	Space (0)	Mark (1)
Modem Control & Timing	On (asserted)	Off (Negated)

ตารางที่ 4.1 หน้าที่ของสายและความหมายของโวลต์เตจที่กำหนดให้

เนื่องจากระดับโวลต์เตจดังกล่าวนั้นไม่พอเหมาะที่จะใช้ได้ด้วยระดับ TTL ดังนั้นการอินเทอร์เฟซสื่อกับเคเบิล RS-232 C จึงต้องการวงจรภาคขับและภาครับเป็นพิเศษดังแสดงในรูปที่ 4.14 ภาคขับและภาครับนี้สามารถหามาได้ในรูปไอซี ตามท้องตลาดทั่วไป



รูปที่ 4.14 วงจรอินเทอร์เฟซ RS-232 C

RS-232 C นั้นจำกัดค่าความจุไฟฟ้าของสายสัญญาณ (วัดเทียบกับกราวด์) อย่างมากที่สุดคือ 2500 pF สำหรับสายเคเบิลที่มีฉนวนและช่องว่างระหว่างสาย อย่างทั่ว ๆ ไป สายยาวประมาณ 50 ฟุต จะมีค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 2500 pF ดังนั้นถ้าไม่ใช่สายชนิดพิเศษแล้ว ระยะห่างมากที่สุดระหว่าง DTE กับ DCE คือ 50 ฟุตหรือประมาณ 15 เมตร

ขาหัวต่อ RS-232 C และหน้าที่ของมัน

ตารางที่ 4.2 แสดงรายการขาหัวต่อของ RS-232 C และชื่อสัญญาณที่ใช้ร่วมกับขาหัวต่อนั้นช่องขาสุดจะเป็นชื่อย่อที่ใช้เรียกขานนั้น ๆ (ชื่อย่อนี้ยังไม่มีกำหนดเป็นมาตรฐานสากล) ในหัวข้อนี้จะเป็นข้อมูลเกี่ยวกับขาต่าง ๆ โดยจะจัดอธิบายเป็นกลุ่มตามประเภทของสัญญาณและหน้าที่ของมันโดยย่อ

ขาที่ 1 และขาที่ 7 เป็นขากกราวด์ โดยขาที่ 1 เป็นกราวด์ของเครื่องเพื่อวัตถุประสงค์หลักในการป้องกันสัญญาณรบกวนโดยรอบและการลดการสอดแทรกของสัญญาณอันจะเกิดขึ้นได้ ขาที่ 7 เป็นขากกราวด์ซึ่งใช้เพื่อต่อให้เกิดเส้นทางหรือจุดอ้างอิงร่วมกันของสัญญาณทุกชนิด ไม่ว่าจะเป็นข้อมูล, สัญญาณนาฬิกา หรือสัญญาณควบคุมต่าง ๆ ขา 7 นั้นจำเป็นต้องต่อระหว่าง DTE กับ DCE เพื่อให้เครื่องทำงานร่วมกันอย่างถูกต้อง การต่อกราวด์ที่ขา 7 นี้ ควรระวังเรื่องความต่างศักย์อันเนื่องมาจากความต้านทานของสายด้วย ถ้ากราวด์ไม่ดีมันจะเป็นสาเหตุทำให้การรับข้อมูลมาตีความไม่ถูกต้อง

ขาที่ 2 และขาที่ 3 เป็นขาสำหรับส่งและรับข้อมูลตามลำดับ โดยคำว่าส่งหรือรับใน

ที่นี้ให้ยึดเอาตัว CPU หรือ DTE เป็นหลักว่าเป็นผู้ส่งหรือผู้รับ ตามเกณฑ์ของ RS-232 C DTE จะส่งข้อมูลออกมาที่ขา 2 และรับข้อมูลจากขา 3

ขาที่ 4 และขาที่ 5 คือขา RTS และ CTS สัญญาณบนขา 4 นั้น DTE ใช้แสดงต่อ DCE เมื่อจะส่งข้อมูล สัญญาณ RTS นี้เอาไว้เพื่อเปิดเครื่องโมเด็ม DTE จะไม่ส่งข้อมูลจนกระทั่งได้รับสัญญาณ CTS บนขา 5 จาก DCE ซึ่ง CTS เป็นสัญญาณตอบรับจาก DCE ว่าตัว DCE นั้นพร้อมในการสื่อสารแล้ว ในกรณีที่ DCE มีความพร้อม และเตรียมคลื่นพาห์ที่จะใช้ในการส่งข้อมูลอยู่แล้วก็ไม่มี ความจำเป็นจะต้องหน่วงเวลาระหว่าง RTS และ CTS

Pin	Signal Name	Direction		Abbreviation
		DTE	DCE	
1	PROTECTIVE (FRAME) GROUND			
2	TRANSMIT DATA	→		XMT
3	RECEIVE DATA		←	RCV
4	REQUEST TO SEND	→		RTS
5	CLEAR TO SEND		←	CTS
6	DATA SET READY		←	DSR
7	SIGNAL GROUND (COMMON RETURN)			GRD
8	CARRIER DETECT		←	CAR_DET
9	-			
10	-			
11	-			
12	SECONDARY CARRIER DETECT		←	SEC_CAR_DET
13	SECONDARY CLEAR TO SEND		←	SEC_CTS
14	SECONDARY TRANSMIT DATA	→		SEC_XMT
15	TRANSMIT CLOCK (DCE SOURCE)	→		XMT_CLK
16	SECONDARY RECEIVE DATA		←	SEC_RCV
17	RECEIVE CLOCK		←	RCV_CLK
18	-			
19	SECONDARY REQUEST TO SEND	→		SEC_RTS
20	DATA TERMINAL READY	→		DTR
21	SIGNAL QUALITY DETECTOR		←	SQD
22	RING INDICATOR		←	RI
23	DATA RATE SELECTOR	→		DR_SEL
24	TRANSMIT CLOCK (DTE SOURCE)	→		XMT_CLK
25	-			

ตารางที่ 4.2 การกำหนดขั้วต่อของ RS-232 C

ขาที่ 6 และขาที่ 20 เป็นขา DSR และ DTR สัญญาณ DTR นั้น DCE ใช้แจ้ง DTE ให้รู้ว่าโมเด็มได้เปิดเครื่องรออนุญาตแล้ว สัญญาณ DTR นั้นใช้เพื่อ DTE แจ้งให้ DCE ในการพร้อมที่จะตอบรับการสื่อสารที่จะมีได้

ขาที่ 8 เป็นขาที่ใช้ในการตรวจจับการรับสัญญาณจากสาย บางครั้งอาจเรียกว่า data carrier detect โมเด็มจะทำการยืนยันด้วยสัญญาณ CAR-DET ในเมื่อมันได้รับสัญญาณคลื่นพาห์ที่มีระดับเพียงพอกับเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในการรับส่งข้อมูล DTE ส่วนใหญ่ต้อง

การสัญญาณนี้ ก่อนที่จะมีการยอมส่งหรือรับข้อมูล ดังนั้นในการส่งข้อมูลที่ไม่ผ่านโมเด็ม (การส่งข้อมูลโดยตรงระหว่าง DTE กับ DTE) ขาที่ 8 นั้นจะถูกต่อเข้ากับขาที่ 20 โดยตรง

ขาที่ 22 เป็นขา RI (Ring Indicator) สัญญาณนี้เป็นสัญญาณที่ DCE บอก DTE ว่า มีการเรียกโทรศัพท์เข้ามาตามสายปกติ โมเด็มจะถูกออกแบบให้เสมือนต่อโดยตรงอยู่กับสายโทรศัพท์ ในกรณีที่โมเด็มเป็นแบบตอบรับอัตโนมัติ โมเด็มจะมีความสามารถในการตรวจรับสัญญาณที่เรียกเข้ามาทางโทรศัพท์ได้ และจะส่งสัญญาณ RI ลู่อ DTE ในขณะที่มีสัญญาณเรียก (ringing tone) เข้ามาและโมเด็มจะทำการตอบรับโดยการจัดวงจรเสมือนมีการยกหูโทรศัพท์รับ เมื่อได้คำสั่งจาก DTE ซึ่งปกติ DTE จะสั่งให้โมเด็มตอบรับการสื่อสารนั้นโดยใช้สัญญาณ DTR ส่งผ่านขาที่ 20

ขาที่ 15, 17, 21 และ 24 นั้นจะใช้เมื่อโมเด็มส่งแบบซิงโครนัล เพราะโมเด็มทางด้านส่งจะต้องส่งข้อมูลบางอย่าง (0 หรือ 1) ที่แต่ละช่องเวลาบิต (bit time) โมเด็มจะควบคุมจังหวะสัญญาณนาฬิกาจาก DTE และทำนองเดียวกัน โมเด็มที่ทำหน้าที่รับก็จะต้องส่งบิตข้อมูลและจังหวะสัญญาณนาฬิกาที่ร่วมมาด้วยกันออกมาด้วย ขาที่ 15 และขาที่ 17 จะใช้สนองความต้องการเหล่านี้ และในกรณีที่สัญญาณควบคุมไม่ได้เกิดจากโมเด็มทางด้านเครื่องส่ง เช่นในกรณีที่มีการมัลติเพล็กซ์ร่วมกับสถานีอื่นจะให้การควบคุมผ่านขาที่ 24 และสำหรับขาที่ 21 นั้นจะใช้เพื่อแสดงว่าคลื่นพาห์ที่รับเข้ามานั้นมีคุณสมบัติเป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ก่อนแล้ว

ขาที่ 23 ใช้เพื่อส่งสัญญาณเลือกอัตราการส่งสัญญาณข้อมูล ในกรณีที่โมเด็มเป็นแบบชนิดที่สามารถเปลี่ยนอัตราส่งข้อมูลได้ จะใช้ขาที่ 23 นี้เป็นตัวคอยควบคุมอัตราการส่งข้อมูลที่ใช้นั้น ปกติโมเด็มทางด้านส่งจะเป็นตัวเลือกอัตราการส่งข้อมูลนี้และจะแจ้งให้ทั้ง DTE ด้านส่งและโมเด็มทางด้านรับให้บอก DTE ด้านรับอีกต่อหนึ่ง

ขาที่ 12, 13, 14, 16 และ 19 เป็นขาสัญญาณที่ใช้กับช่องสัญญาณรอง โมเด็มบางเครื่องจะมีช่องสัญญาณใช้ 2 ช่อง คือ ช่องสัญญาณหลักและช่องสัญญาณรอง ขาสัญญาณทั้ง 5 ของช่องสัญญาณรองนั้นมีหน้าที่เหมือนกับหน้าที่ทางช่องสัญญาณหลัก ต่างกันแต่ว่าอัตราการส่งสัญญาณทางช่องสัญญาณรองนั้นปกติมักจะช้ากว่าอัตราการส่งของช่องสัญญาณหลัก และช่องสัญญาณรองนั้นจะมีทิศทางการส่งสัญญาณสวนกันกลับทิศทางของช่องสัญญาณหลัก

ลักษณะของข้อมูลที่ส่งผ่านอินเตอร์เฟส RS-232 C นั้น เป็นการส่งแบบอนุกรมอาจจะ เป็นแบบซิงโครนัลหรือแบบอะซิงโครนัลก็ได้ โดยขึ้นอยู่กับ DTE

ข้อจำกัดของ RS-232 C

ตัวประกอบหลัก 3 อย่างที่จำกัดการใช้งานของอินเทอร์เฟส RS-232 C คือ ระยะทาง อัตราการส่งข้อมูล และสัญญาณรบกวน

ระยะทาง

ในเคเบิล RS-232 C ค่าความจุไฟฟ้า ระหว่างสายสัญญาณต่าง ๆ กับสายกราวด์ เป็นพารามิเตอร์หลักที่จำกัดระยะทางการใช้สายเคเบิล ตามข้อกำหนดมีว่าค่าความจุไฟฟ้า ที่มองไปจากวงจรขับ (driver) จะต้องไม่เกิน 2500 pF การเพิ่มระยะทางของเคเบิล ก็จะเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าที่มาเป็นภาระของวงจรขับ ธรรมดาเคเบิลที่ใช้จะมีความจุไฟฟ้า 2500 pF ที่ความยาวประมาณ 50 ฟุต หรือประมาณ 15 เมตร

อัตราการส่งข้อมูล

ข้อกำหนดที่ชัดเจนอีกอย่างหนึ่งก็คือ อัตราสัญญาณจะต้องไม่เกิน 20,000 บิตต่อวินาที ปัญหานี้ก็เกี่ยวข้องกับค่าความจุไฟฟ้าของสายเคเบิลอีกเช่นกัน RS-232 C นั้นกำหนดค่าความต้านทานอินพุทของวงจรภาครับไว้ค่อนข้างสูง (3000-7000 โอห์ม) เราจะเห็นว่าค่าความต้านทานนี้จำกัดอัตราการประจุและคายประจุของเคเบิลคาปาซิเตอร์ทำให้เกิดการมวน (round) ที่ขอบของสัญญาณและเกิดความผิดเพี้ยน ที่อัตราข้อมูลสูง ๆ การมวนที่ขอบหน้า (leading edge) จะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ค่าเวลาบิตผิดไป

ค่าจำกัดนี้แตกต่างไปจากทางปฏิบัติเล็กน้อย เพราะโมเด็มโทรศัพท์ที่เร็วที่สุดนั้นทำงานที่อัตรา 19200 บิต/วินาที และโมเด็มทั่ว ๆ ไป ส่วนใหญ่จะมีอัตราการส่งสัญญาณต่ำกว่านี้ เป็นไปได้ว่าที่เราจะใช้ตัวกลางเป็นสายเคเบิลเส้นใยนำแสงซึ่งมีแบนวิดท์ ที่กว้างมากและไม่มีผลกระทบทางด้านเคเบิลคาปาซิเตอร์ ซึ่งทำให้เราสามารถส่งสัญญาณได้สูงกว่าอัตราดังกล่าว

สัญญาณรบกวน

สามารถทำให้สัญญาณข้อมูลผิดพลาดได้ มีสาเหตุจากแหล่งกำเนิด 2 แบบคือ

1. แหล่งกำเนิดภายนอก ทำให้เกิดสัญญาณเทียม (spurious signal) ตัวอย่างของแหล่งกำเนิดสัญญาณเทียมนี้ ได้แก่ มอเตอร์ไฟฟ้า สถานีส่งวิทยุ และหลอดฟลูออเรสเซนต์ เป็นต้น

2. แหล่งกำเนิดภายใน เช่น ถ้าสายกราวด์สัญญาณรวม (common return signal) เกิดไม่เป็นตัวนำที่สมบูรณ์ กล่าวคือ ความต้านทานไม่เป็นศูนย์ การกระจายของกระแส

จากสายสัญญาณต่างๆ ที่ใช้สายกราวด์ร่วมกันนี้ จะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าในลักษณะต่าง ๆ ตกคร่อมสายกราวด์สัญญาณรวมนี้ และส่งผลไปที่ภาครับสัญญาณ ในลักษณะที่เป็นตัวก่อดีสัญญาณรบกวนขึ้น

จากสาเหตุทั้ง 2 ประการนี้ เมื่อสายเคเบิลยาวมากขึ้น ก็จะก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนมากขึ้น สายที่ยาวจะทำตัวคล้ายสายอากาศที่ดี ที่คอยจับสัญญาณรบกวนเข้ามา และจะมีความต้านทานสูงขึ้นอันเป็นสาเหตุทำให้เกิดสัญญาณรบกวนมากขึ้น

ด้วยเหตุนี้การนำเคเบิลเส้นใยนำแสงมาใช้แทนสายเคเบิลโลหะในการอินเตอร์เฟส RS-232 C ก็จะสามารถลดสัญญาณรบกวนซึ่งเกิดจากลักษณะทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ทั้งหมด และอัตราการลดทอนตามระยะทางก็น้อยกว่าสายเคเบิลโลหะมาก ทำให้สามารถแก้ปัญหาข้อจำกัดทางด้านระยะทางได้

การทดลองสื่อสารข้อมูล

ในบทนี้จะกล่าวถึงการเชื่อมต่อไมโครคอมพิวเตอร์ 2 เครื่องเข้าด้วยกัน โดยใช้เส้นใยนำแสงเป็นตัวกลาง ซึ่งในการทำงานจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนกล่าวคือ

1. การทดลองเชื่อมต่อใน free space
2. การทดลองเชื่อมต่อโดยผ่านเส้นใยนำแสง

ในวงจรที่ใช้ในการทดลองนั้นจะประกอบด้วยวงจรต่าง ๆ 3 ส่วนด้วยกันคือ

- วงจรเข้ารหัสและวงจรรับแสง
- วงจรแปลงสัญญาณ EIA RS-232C ให้เป็นสัญญาณในระดับ TTL
- วงจรรับแสงและวงจรถอดรหัส

วงจรเข้ารหัสและวงจรรับแสง

ข้อมูลเมื่อออกจากเครื่องคอมพิวเตอร์จะมีระดับสัญญาณ +12 ถึง -12 โวลต์ เรา จะทำการแปลงสัญญาณให้มีระดับต่ำลงตามระดับ TTL กล่าวคือ + 5 และ 0 โวลต์ โดยใช้ไอซีเบอร์ max 232 เป็นตัวแปลงค่าสัญญาณ จากนั้นจะทำการเข้ารหัสข้อมูลแบบ NRZ ซึ่งจะไปทำหน้าที่สวิตช์ทรานซิสเตอร์ 2N 3905 โดยทรานซิสเตอร์ตัวนี้สามารถใช้ได้กับ ความถี่ประมาณ 200 MHz

อินฟราเรด LED ที่ใช้คือ RS 633-313 มีค่ากระแสทำงานเท่ากับ 100 มิลลิแอมป์ โดยจะมีตัวต้านทานเป็นตัวกำหนดค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวอินฟราเรด LED

วงจรรับแสงและถอดรหัส

เมื่อมีแสงมาตกกระทบตัวโฟโตไดโอดก็จะทำให้มีกระแสไหลแปรผันตามความเข้มของ แสงที่มาตกกระทบ และใช้อุปกรณ์ TL 071 เป็นตัวแปลงกระแสให้เป็นความต่างศักย์ (current to voltage converter) ซึ่งในการต่อวงจรโดยใช้อุปกรณ์ หลักนั้นเรียกว่าทรานส์อิมพีแดนซ์ แอมพลิฟายเออร์ ซึ่งมีข้อดีคือมีช่วงการตอบสนองกว้าง มีสัญญาณรบกวนต่ำ มีแถบความถี่ในการใช้งานกว้าง และสามารถกำหนดค่าอัตราขยาย

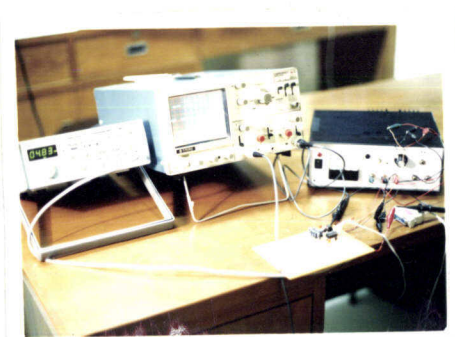
สัญญาณได้โดยปรับค่าความต้านทานป้อนกลับระหว่างอินพุทและเอาต์พุท และวงจรนี้มีการต่อขาออฟเซ็ทเพื่อที่จะลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจาก dark current ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดขึ้นในขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบบั้วโฟโตไดโอดเลย

จากรูปของวงจรรับสัญญาณอินพุทที่ได้จากโฟโตไดโอดจะถูกส่งไปยังออปแอมป์ตัวที่ 1 ซึ่งทำหน้าที่ขยายแบบกลับสัญญาณจากนั้นสัญญาณที่ได้จะนำไปเข้าออปแอมป์ตัวที่ 2 ซึ่งถูกต่อไว้เป็นวงจรขยายแบบเปรียบเทียบแรงดันโดยที่ขา 3 ของออปแอมป์นี้เป็นขาตั้งระดับแรงดันอ้างอิง โดยในที่นี้จะให้ต่อลงกราวด์ไว้และแรงดันอินพุทที่ขา 2 จะเป็นแรงดันที่ มาทำการเปรียบเทียบกับแรงดันที่ขา 3 ดังนั้นหากแรงดันอินพุทมีค่ามากกว่าค่าแรงดันอ้างอิงค่าเอาต์พุทก็จะมีค่าเป็น +5 โวลต์ และถ้ามีค่าน้อยกว่าค่าแรงดันอ้างอิงค่าเอาต์พุทก็จะมีค่าเป็น 0 โวลต์

วิธีการทดลอง

ในการทดลองเราจะใช้สัญญาณอินพุทจากแหล่งกำเนิด 2 แหล่งคือ เครื่องกำเนิดสัญญาณและพอร์ต EIA RS-232C จากเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยจะใช้ความถี่และอัตราเร็วในการส่งข้อมูลต่าง ๆ กัน

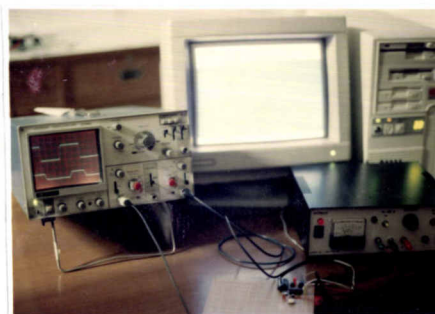
1. ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ โดยใช้ออสซิลโลสโคปจับสัญญาณที่ 2 จุดคือ ที่สัญญาณอินพุทที่วงจรส่ง ซึ่งมีขนาดสัญญาณ 12 โวลต์ (รูปคลื่นด้านบนของจอ) และที่เอาต์พุทของวงจรรับ (รูปคลื่นด้านล่าง) โดยมีการจัดอุปกรณ์ดังรูปข้างล่าง



รูปที่ 5.1 การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยส่งด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณ

2. ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ โดยผ่านพอร์ต EIA RS-232C โดยใช้โปรแกรม

Procomm หรือ Telix เป็นซอฟต์แวร์ในการรับส่งข้อมูล โดยใช้ฮอสซีโลสโคปจับสัญญาณที่ 2 จุดคือ ที่ขา Tx ของพอร์ต RS-232C (รูปคลื่นด้านบน) และที่ขา Rx RS-232C (รูปคลื่นด้านล่าง) โดยมีการจัดอุปกรณ์ตั้งรูปข้างล่าง



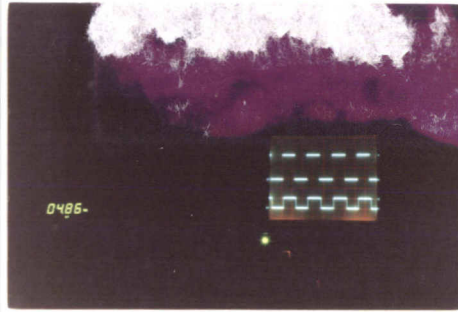
รูปที่ 5.2 การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์

ผลการทดลอง

ก. การทดลองเชื่อมต่อใน free space

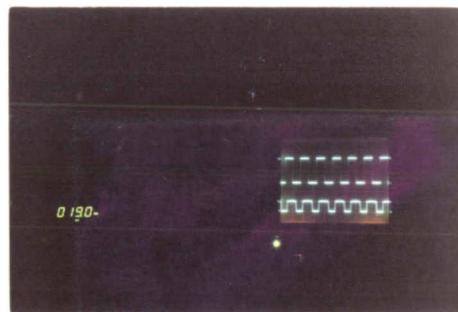
1. โดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณที่มีความถี่ต่าง ๆ กัน ดังนี้

- ที่ความถี่ 4.86 kHz



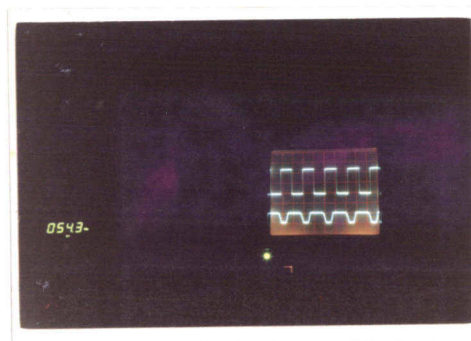
รูปคลื่นที่ได้มีความถี่และเฟสตรงกับสัญญาณอินพุตและมีแอมพลิจูดขนาด 5 โวลต์

- ที่ความถี่ 19.0 kHz



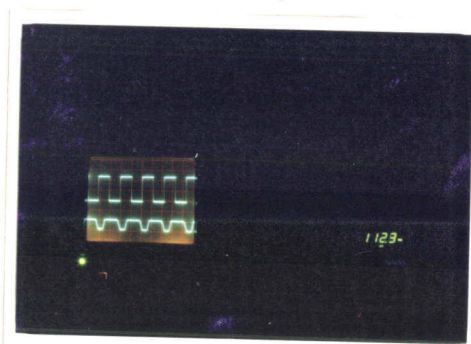
รูปคลื่นที่ได้มีความถี่และเฟสตรงกับสัญญาณอินพุตและมีแอมพลิจูดขนาด 5 โวลต์

- ที่ความถี่ 54.3 kHz



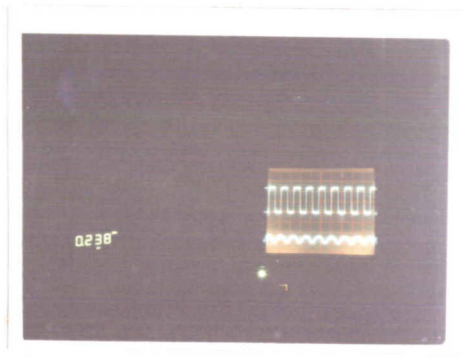
รูปคลื่นที่ได้เริ่มมีความผิดเพี้ยนไปและมีเฟสเปลี่ยนแปลงไปประมาณ 45 องศา แต่ค่าแอมพลิจูดยังคงเป็น 5 โวลต์

- ที่ความถี่ 112.3 kHz



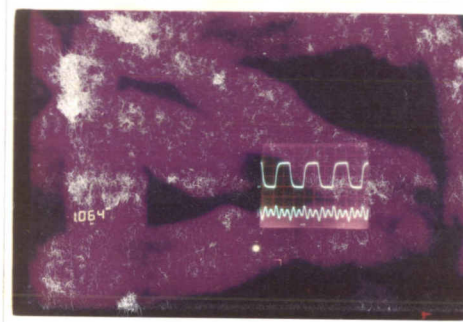
รูปคลื่นที่ได้มีความผิดเพี้ยนและมีเฟสตามกันอยู่ประมาณ 90 องศา และยังคงมีค่าแอมพลิจูดเป็น 5 โวลต์

- ที่ความถี่ 0.238 MHz



ที่ความถี่นี้รูปคลื่นที่ได้จะมีค่าแอมพลิจูดลดลงและรูปคลื่นไม่เป็นรูปสี่เหลี่ยมแต่ยังคงมีลักษณะคล้ายกับสัญญาณอินพุท

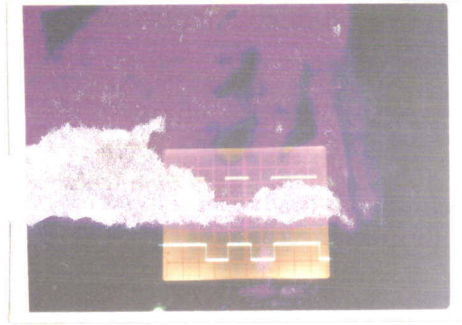
- ที่ความถี่ 1.064 MHz



ที่ความถี่นี้รูปคลื่นจะผิดเพี้ยนไปมากจนไม่มีลักษณะรูปคลื่นเดิม

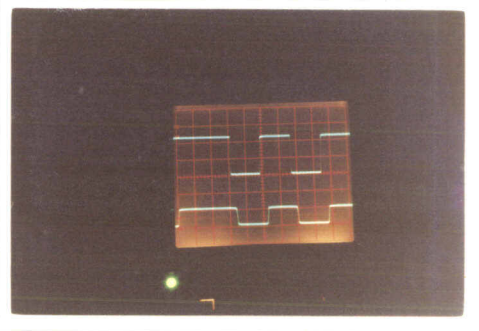
2. โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่อัตราเร็วต่าง ๆ กันดังนี้

- 4,800 bits/sec



รูปคลื่นที่ได้มีความถี่และเฟสตรงกับสัญญาณอินพุทและมีแอมพลิจูดขนาด 5 โวลต์

- 19,200 bits/sec

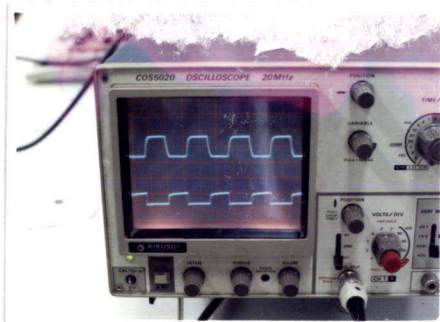


รูปคลื่นที่ได้มีเฟสเปลี่ยนแปลงไปประมาณ 30 องศา และค่าแอมพลิจูดยังคงเป็น 5 โวลต์

ข. การทดลองเชื่อมต่อโดยผ่านเส้นใยนำแสง

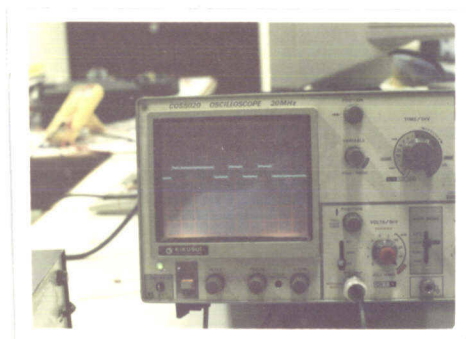
1. โดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณที่มีความถี่ต่าง ๆ กัน ดังนี้

- ที่ความถี่ 45 KHz

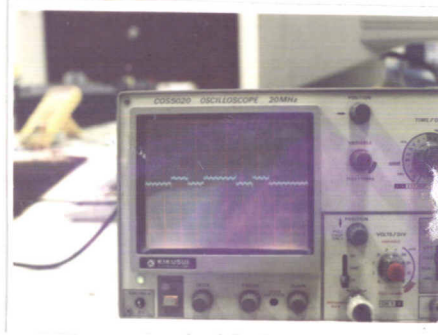


2. โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่อัตราเร็วต่าง ๆ กันดังนี้

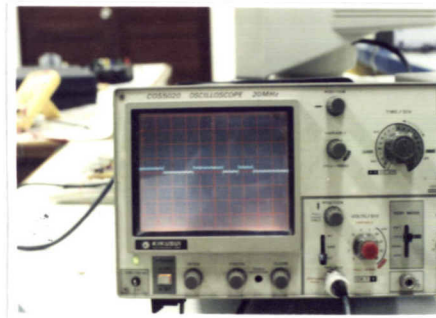
- 4,800 bits/sec



- 19,200 bits/sec



- 115,200 bits/sec



จากการทดลองจะพบว่าที่อัตราเร็วสูง ๆ สัญญาณที่ได้จะมีค่าแอมพลิจูดลดลงซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่ได้มีการผิดพลาดได้

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองพบว่าในการส่งข้อมูลที่อัตราเร็วสูงขึ้น เฟสของสัญญาณที่ได้จะช้ากว่าสัญญาณอินพุต แต่ไม่มีผลต่อข้อมูลเพราะในการส่งข้อมูลนั้นเป็นการส่งแบบอนุกรม ซึ่งถ้าเป็นการส่งข้อมูลแบบขนาน อาจจะทำให้ข้อมูลเกิดการผิดพลาดได้

และที่อัตราเร็วที่สูงขึ้น ค่าแอมพลิจูดจะเริ่มลดลงซึ่งมีผลต่อความถูกต้องของข้อมูล เช่นถ้าข้อมูลเป็น " 1 " แต่ถ้าแอมพลิจูดของสัญญาณที่ได้ต่ำกว่า 2.4 โวลต์ ก็จะทำให้ตัวรับตีความว่าเป็น " 0 " เช่นในผลการทดลองเมื่อส่งสัญญาณด้วยความถี่ 0.238 MHz ค่าแอมพลิจูดจะมีค่าลดลงจนต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้ และเมื่อทำการส่งข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์ เราจะพบว่าข้อมูลที่รับจะมีความผิดพลาดอยู่บ้าง

ซึ่งความผิดพลาดนี้อาจจะเกิดจากตัวรับ (detector) ที่ใช้มีความไวไม่พอ และในการทำแผ่นวงจรความถี่สูงจะต้องมีการป้องกันที่ดี เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน

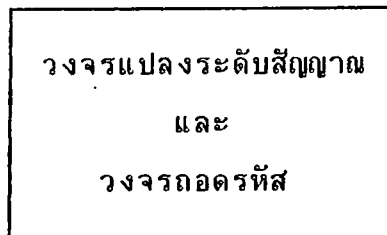
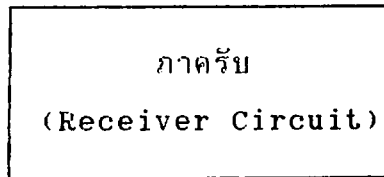
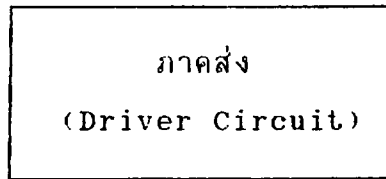
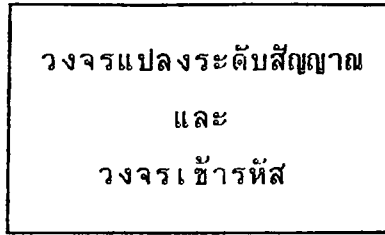
แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ควรจะมีค่าความเข้มสูง เพราะแสงที่ออกมาจากเส้นใยนำแสงจะมีการลดทอนเกิดขึ้นซึ่งอาจจะทำให้ตัวรับตรวจจับแสงไม่ได้

ในการพัฒนาโครงการนี้ต่อไปในอนาคตอาจจะทำได้ในรูปแบบของ LAN แต่ระบบมัลติเพล็กซ์ที่ใช้ในเส้นใยนำแสงยังเป็นระบบที่ยังไม่แพร่หลายในระดับทั่ว ๆ ไปทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องหาได้ยากและมีราคาแพง

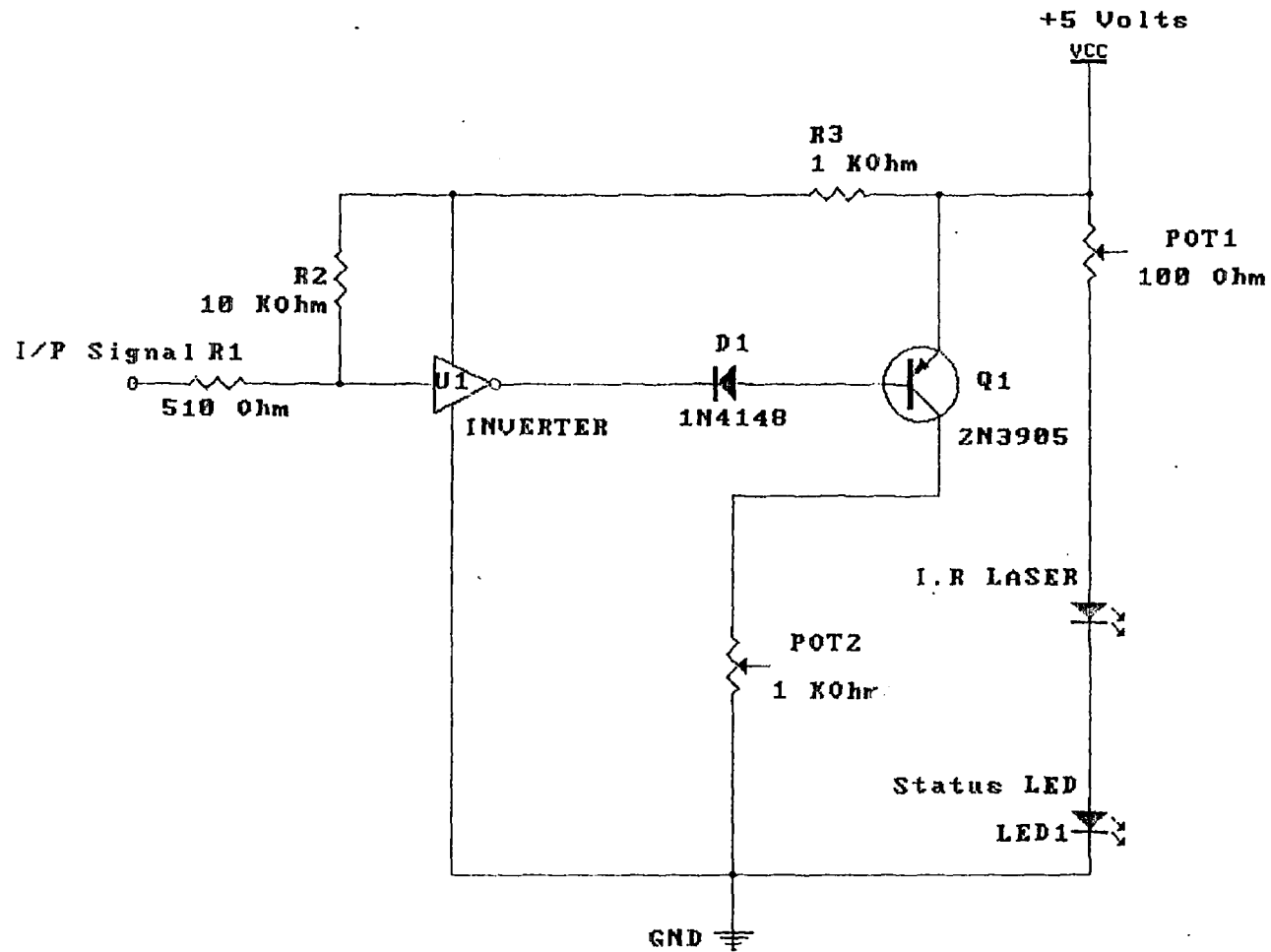
บรรณานุกรม

1. ทินกร ตึก, ชุชัย ชนสารตั้งเจริญ, การสื่อสารข้อมูล, สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 2534
2. อธิคม ฤกษ์บุตร, เซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์, ฉบับที่ 118-120, 2535
3. อภินันท์ มัญยานนท์, การสื่อสารเส้นใยแสง, พิมพ์ครั้งที่ 2, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง, 2534
4. Keiser, G.E., Optical Fiber Communications, New York: McGraw-Hill Book Company, 1983.
5. Lacy, E.A., Fiber optics, Englewood Cliffs, New Jersey.: Prentice-Hall, Inc., 1982.
6. Miller, S.E. and Chynoweth, A.G., Optical Fiber Telecommunications, New York: Academic Press, Inc., 1979.
7. Palais, Joseph C. , Fiber optic communications, Prentice Hall, Inc., 1988.
8. Pratt, W.K. , Laser Communications Systems, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1969.
9. Snyder, A.W. and Love, J.D., Optical Waveguide Theory, London: Chapman and Hall, Ltd., 1983.

ข้อมูลจากพอร์ทข้อมูลแบบอนุกรม

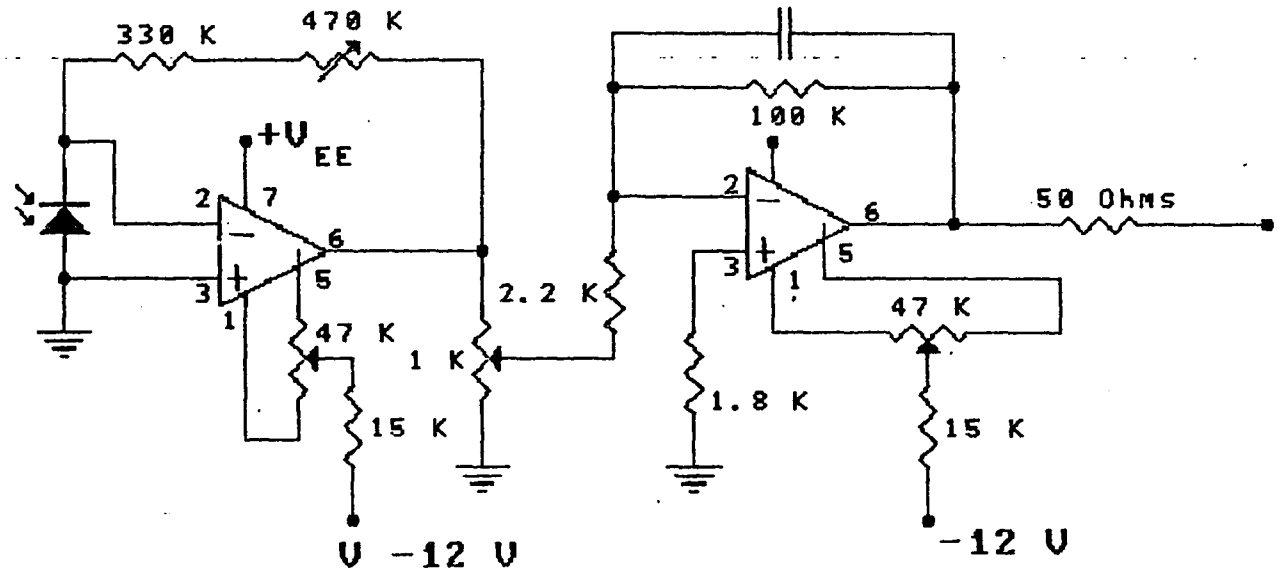


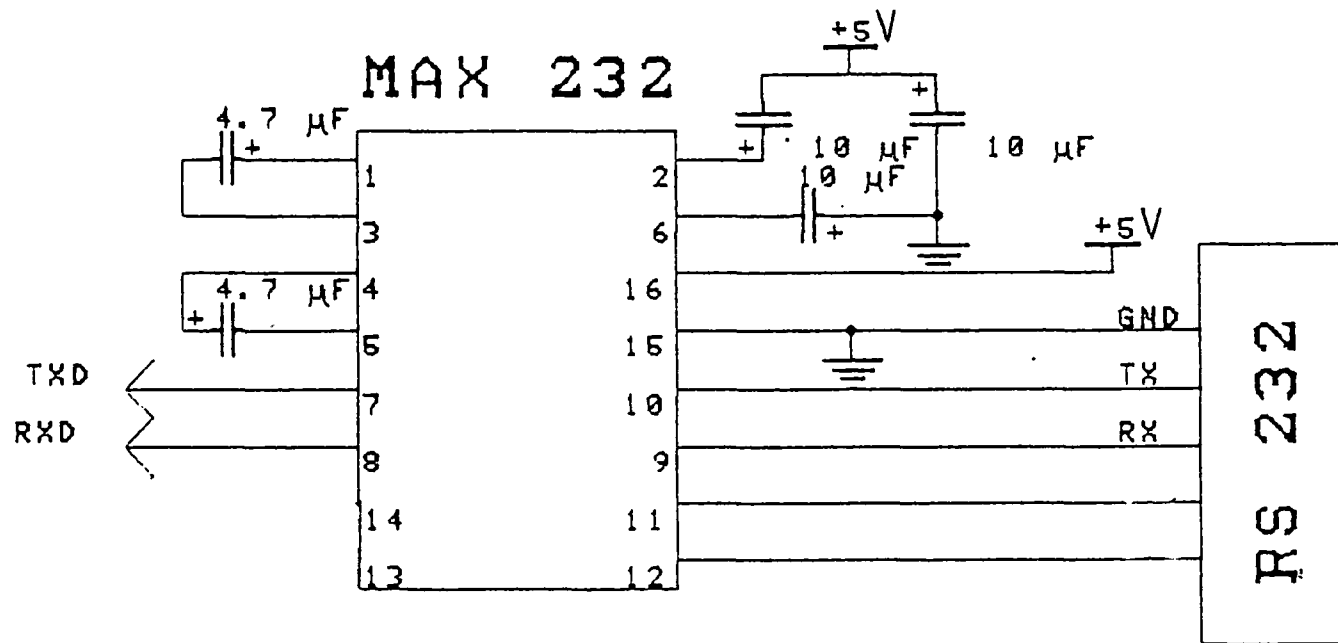
ข้อมูลเข้าสู่พอร์ทข้อมูลแบบอนุกรม



DRIVING CIRCUIT

Title		DRIVER CIRCUIT	
Size	Number		
A4	SER 1994-A32011		





2095 MAX 232



+5V Powered RS-232 Drivers/Receivers

MAX230-241*

General Description

Maxim's family of line drivers/receivers are intended for all RS-232 and V.28/V.24 communications interfaces, and in particular, for those applications where $\pm 12V$ is not available. The MAX230, MAX236, MAX240 and MAX241 are particularly useful in battery powered systems since their low power shutdown mode reduces power dissipation to less than $5\mu W$. The MAX233 and MAX235 use no external components and are recommended for applications where printed circuit board space is critical.

All members of the family except the MAX231 and MAX239 need only a single +5V supply for operation. The RS-232 drivers/receivers have on-board charge pump voltage converters which convert the +5V input power to the $\pm 10V$ needed to generate the RS-232 output levels. The MAX231 and MAX239, designed to operate from +5V and +12V, contain a +12V to -12V charge pump voltage converter.

Since nearly all RS-232 applications need both line drivers and receivers, the family includes both receivers and drivers in one package. The wide variety of RS-232 applications require differing numbers of drivers and receivers. Maxim offers a wide selection of RS-232 driver/receiver combinations in order to minimize the package count (see table below).

Both the receivers and the line drivers (transmitters) meet all EIA RS-232C and CCITT V.28 specifications.

Features

- ◆ Operates from Single 5V Power Supply (+5V and +12V — MAX231 and MAX239)
- ◆ Meets All RS-232C and V.28 Specifications
- ◆ Multiple Drivers and Receivers
- ◆ Onboard DC-DC Converters
- ◆ $\pm 9V$ Output Swing with +5V Supply
- ◆ Low Power Shutdown — $<1\mu A$ (typ)
- ◆ 3-State TTL/CMOS Receiver Outputs
- ◆ $\pm 30V$ Receiver Input Levels

Applications

- Computers
- Peripherals
- Modems
- Printers
- Instruments

Selection Table

Part Number	Power Supply Voltage	No. of RS-232 Drivers	No. of RS-232 Receivers	External Components	Low Power Shutdown /TTL 3-State	No. of Pins
MAX230	+5V	5	0	4 capacitors	Yes/No	20
MAX231	+5V and +7.5V to 13.2V	2	2	2 capacitors	No/No	14
MAX232	+5V	2	2	4 capacitors	No/No	16
MAX233	+5V	2	2	None	No/No	20
MAX234	+5V	4	0	4 capacitors	No/No	16
MAX235	+5V	5	5	None	Yes/Yes	24
MAX236	+5V	4	3	4 capacitors	Yes/Yes	24
MAX237	+5V	5	3	4 capacitors	No/No	24
MAX238	+5V	4	4	4 capacitors	No/No	24
MAX239	+5V and +7.5V to 13.2V	3	5	2 capacitors	No/Yes	24
MAX240	+5V	5	5	4 capacitors	Yes/Yes	44 (Flatpak)
MAX241	+5V	4	5	4 capacitors	Yes/Yes	28 (Small Outline)

Patent Pending

MAX230-241*

+5V Powered RS-232 Drivers/Receivers

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

V_{CC}	-0.3V to +6V
V^*	($V_{CC} - 0.3V$) to +14V
V^-	+0.3V to -14V
Input Voltages	
T_{IN}	-0.3 to ($V_{CC} + 0.3V$)
R_{IN}	$\pm 30V$
Output Voltages	
T_{OUT}	($V^* + 0.3V$) to ($V^- - 0.3V$)
R_{OUT}	-0.3V to ($V_{CC} + 0.3V$)

Short Circuit Duration

T_{OUT}	continuous
Power Dissipation	
CERDIP	675mW (derate 9.5mW/ $^{\circ}C$ above +70 $^{\circ}C$)
Plastic DIP	375mW (derate 7mW/ $^{\circ}C$ above +70 $^{\circ}C$)
Small Outline (SO)	375mW (derate 7mW/ $^{\circ}C$ above +70 $^{\circ}C$)
Lead Temperature (soldering 10 seconds)	+300 $^{\circ}C$
Storage Temperature	-65 $^{\circ}C$ to +160 $^{\circ}C$

Stresses above those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(MAX232, 234, 236, 237, 238, 240, 241 $V_{CC} = 5V \pm 10\%$; MAX233, 235 $V_{CC} = 5V \pm 5\%$; MAX231, 239 $V_{CC} = 5V \pm 10\%$, $V^* = 7.5V$ to 13.2V; T_A = Operating Temperature Range, Figures 3-14, unless otherwise noted.)

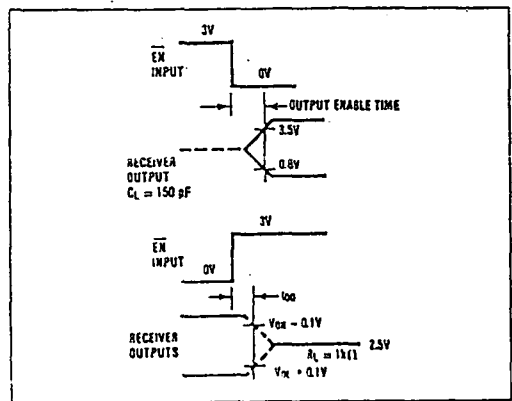
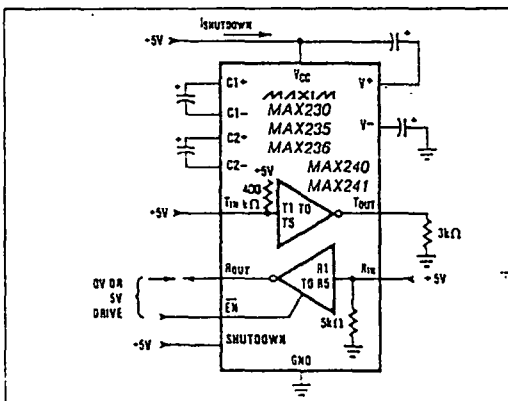
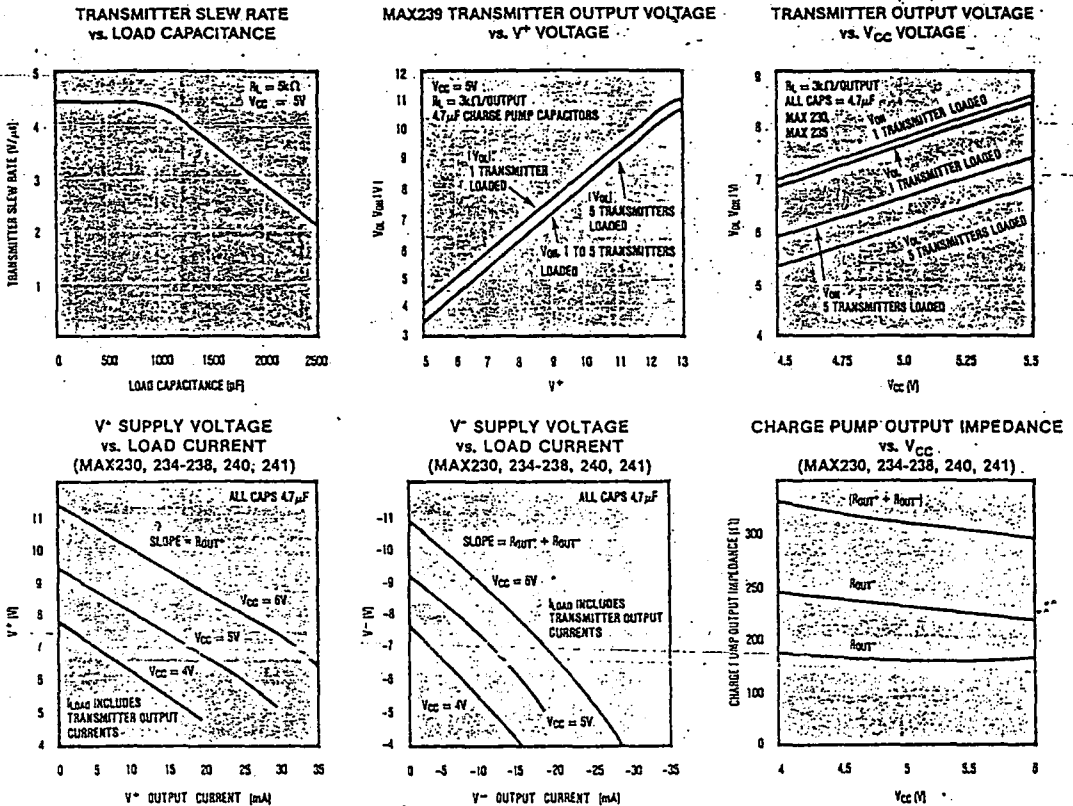
PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNITS
Output Voltage Swing	All Transmitter Outputs loaded with 3k Ω to Ground	± 5	± 9		V
V_{CC} Power Supply Current	No load, $T_A = +25^{\circ}C$		5	10	mA
	MAX231, MAX239		0.4	1	
V^* Power Supply Current	No load, MAX231 and MAX239 only	MAX231	1.8	5	mA
		MAX239	5	15	
Shutdown Supply Current	Figure 1, $T_A = +25^{\circ}C$		1	10	μA
Input Logic Threshold Low	T_{IN} , EN, Shutdown			0.8	V
Input Logic Threshold High	T_{IN}		2.0		V
	EN, Shutdown		2.4		
Logic Pullup Current	$T_{IN} = 0V$		15	20	μA
RS-232 Input Voltage Operating Range		-30		+30	V
RS-232 Input Threshold Low	$V_{CC} = 5V$, $T_A = +25^{\circ}C$ (MAX231, 239 $V^* = 0V$)	0.8	1.2		V
RS-232 Input Threshold High	$V_{CC} = 5V$, $T_A = +25^{\circ}C$ (MAX231, 239 $V^* = 12V$)		1.7	2.4	V
RS-232 Input Hysteresis	$V_{CC} = 5V$	0.2	0.5	1.0	V
RS-232 Input Resistance	$T_A = +25^{\circ}C$, $V_{CC} = 5V$	3	5	7	k Ω
TTL/CMOS Output Voltage Low	$I_{OUT} = 1.6mA$ (MAX231-233, $I_{OUT} = 3.2mA$)			0.4	V
TTL/CMOS Output Voltage High	$I_{OUT} = -1.0mA$	3.5			V
TTL/CMOS Output Leakage Current	EN = V_{CC} , $0V \leq P_{OUT} \leq V_{CC}$		0.05	± 10	μA
Output Enable Time (Figure 2)	MAX235, MAX236, MAX239, MAX240, 241		400		ns
Output Disable Time (Figure 2)	MAX235, MAX236, MAX239, MAX240, 241		250		ns
Propagation Delay	RS-232 to TTL		0.5		μs
Instantaneous Slew Rate	$C_L = 10pF$, $R_L = 3-7k\Omega$ $T_A = +25^{\circ}C$ (Note 1)			30	V/ μs
Transition Region Slew Rate	$R_L = 3k\Omega$, $C_L = 2500pF$ Measured from +3V to -3V or -3V to +3V		3		V/ μs
Output Resistance	$V_{CC} = V^* = V^- = 0V$, $V_{OUT} = \pm 2V$	300			Ω
RS-232 Output Short Circuit Current			± 10		mA

Note 1: Sample tested.

+5V Powered RS-232 Drivers/Receivers

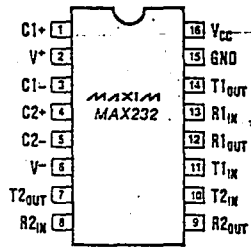
Typical Operating Characteristics

MAX230-241*



+5V Powered RS-232 Drivers/Receivers

MAX230-241*



16 Lead Small Outline also available.

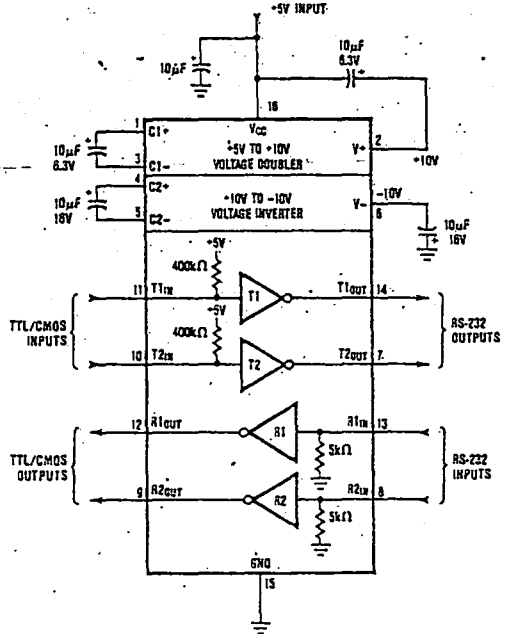
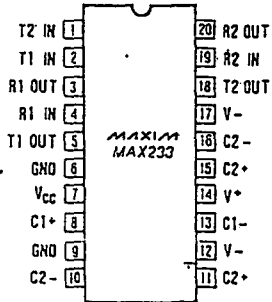


Figure 5. MAX232 Typical Operating Circuit



Small Outline Not Available

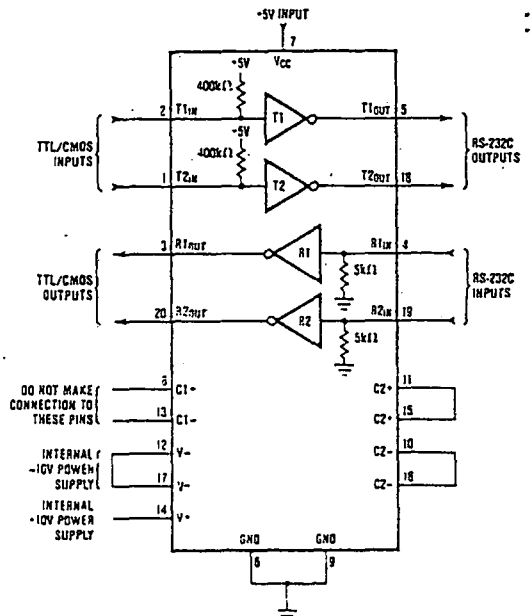


Figure 6. MAX233 Typical Operating Circuit

+5V Powered RS-232 Drivers/Receivers

Typical Applications

Figures 3 through 14 show typical applications. The capacitor values are non-critical. Reducing the capacitors C1 and C2 to 1 μ F will slightly increase the impedance of the charge pump, lowering the RS-232 driver output voltages by about 100mV. Lower values of C3 and C4 increase the ripple on the V⁺ and V⁻ outputs.

If the power supply input to the device has a very fast rate-of-rise (as would occur if a PCB were to be plugged into a card cage with power already on), use the simple RC filter shown in Figure 15. This bypass network is not needed if the V_{CC} rate-of-rise is below 1V/ μ s.

All receivers and drivers are inverting. The $\overline{\text{EN}}$ enable control of the MAX235, MAX236, MAX239, MAX240 and MAX241 enables the receiver TTL/CMOS outputs when it is at a low level, and places the TTL/CMOS outputs of the receivers into a high impedance state when it is a high level.

When the Shutdown control of the MAX230, MAX235, MAX236, MAX240 and MAX241 is at a logic 1 the charge pump is turned off, the receiver outputs are put into the high impedance state, V⁺ is pulled down to V_{CC}, V⁻ is pulled up to ground, and the transmitter outputs are disabled. The supply current drops to less than 10 μ A.

Detailed Description

The following sections provide supplementary information for those designers with non-standard applications and for those with interest in the internal operation of the devices.

The devices consist of 3 sections: the transmitters, the receivers, and the charge pump DC-DC voltage converter.

+5V to \pm 10V

Dual Charge Pump Voltage Converter

All but the MAX231 and MAX239 convert +5V to \pm 10V. This conversion is performed by two charge pump voltage converters. The first uses capacitor C1 to double the +5V to +10V, storing the +10V on the V⁺ output filter capacitor, C3. The second charge pump voltage converter uses capacitor C2 to invert the +10V to -10V, storing the -10V on the V⁻ output filter capacitor, C4. The equivalent circuit of the charge pump section is shown in Figure 16.

A small amount of power may be drawn from the +10V (V⁺) and -10V (V⁻) outputs to power external circuitry. The typical characteristics graphs show the typical output voltage vs. load current characteristics.

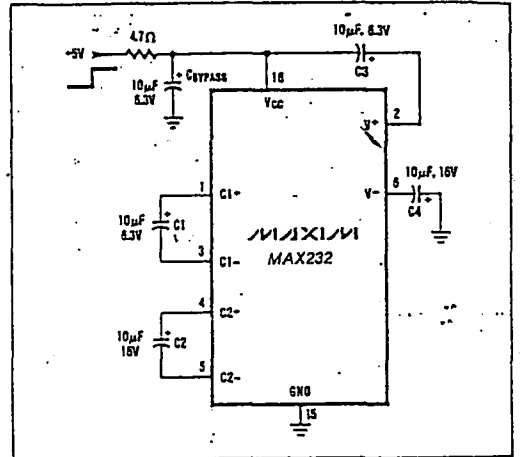


Figure 15. Protection from High $\frac{dV}{dT}$

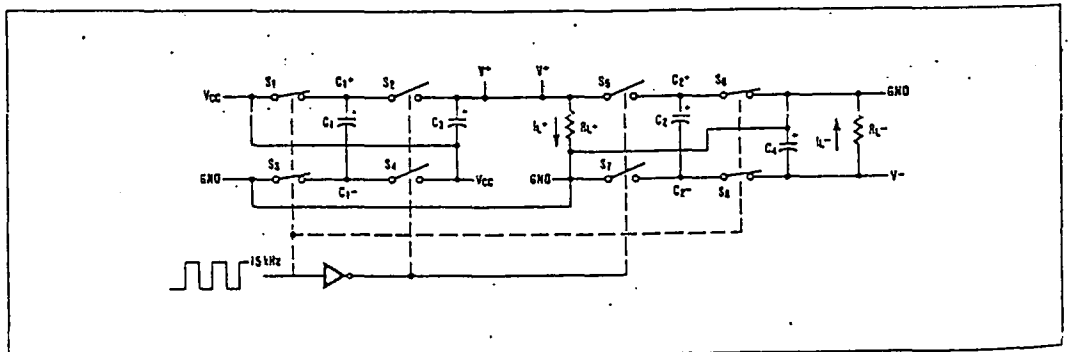


Figure 16. Charge Pump Diagram.

+5V Powered RS-232 Drivers/Receivers

For applications needing only the +5V to $\pm 10V$ charge pump voltage converter, the MAX680 is available.

The capacitor values for C1 through C4 are non-critical. At the 15kHz typical switching frequency of the voltage converter, a $1\mu F$ capacitor has approximately 10Ω impedance, and replacing the $4.7\mu F$ and $10\mu F$ capacitors shown in the typical applications with $1\mu F$ for C1 and C2 will increase the output impedance of the V^+ output by about 10Ω and the output impedance of V^- by about 20Ω . Lowering the value of C3 and C4 increases the ripple on the V^+ and V^- outputs. Where operation to the upper temperature limit is not required, or V_{CC} will not go below 4.75V, C1 and C2 can be $1\mu F$, and C3 and C4 can be $1\mu F$ per output channel ($1\mu F$ if one transmitter is used, $5\mu F$ if five transmitters are used).

There are parasitic diodes which become forward biased if V^+ goes below V_{CC} or V^- goes above ground. When in the shutdown mode (MAX230, MAX235, MAX236, MAX240 and MAX241 only), V^+ is internally connected to V_{CC} by a $1k\Omega$ pulldown, and V^- is internally connected to ground via a $1k\Omega$ pullup.

The MAX233 and MAX235 contain all charge pump components, including the capacitors, and operate with NO external components.

The MAX231 and MAX239 include only the V^+ to V^- charge pump, and are intended for applications which have a +5V supply and either a $+12V \pm 10\%$ supply or a 7.5V to 13.2V battery voltage. When operating with V^+ greater than 6.0V, both capacitors can be $1\mu F$.

Driver (Transmitter) Section

The transmitters or line drivers are inverting level translators which convert the CMOS or TTL input levels to RS-232 or V.28 voltage levels. With +5V V_{CC} , the typical output voltage swing is $\pm 9V$ when loaded with the nominal $5k\Omega$ input resistance of an RS-232 receiver. The output swing is guaranteed to meet the RS-232/V.28 specification of $\pm 5V$ minimum output swing under the worst case conditions of all transmitters driving the $3k\Omega$ minimum allowable load impedance, $V_{CC} = 4.5V$, and maximum operating ambient temperature. The open circuit output voltage swing is from ($V^+ - 0.6V$) to V^- .

The input thresholds are both CMOS and TTL compatible, with a logic threshold of about 25% of V_{CC} . The inputs of unused drivers sections can be left unconnected; an internal $400k\Omega$ input pullup resistor to V_{CC} will pull the inputs high, forcing the unused transmitter outputs low. The input pullup resistors source about $12\mu A$, and the driver inputs should be driven high or open circuited to minimize power supply current in the shutdown mode.

When in the low power shutdown mode, the driver outputs are turned off and their leakage current is less than $1\mu A$ with the driver output pulled to ground. The driver output leakage remains less than $1\mu A$, even if the transmitter output is backdriven between 0V and ($V_{CC} + 6V$). Below $-0.5V$ the transmitter is diode clamped to ground with $1k\Omega$ series impedance. The transmitter is also zener clamped to approximately $V_{CC} + 6V$, with a series impedance of $1k\Omega$. As required by the RS232 and V.28, the slew rate is limited to less than $30V/\mu s$. This limits the maximum usable baud rate to 19,200 baud.

Receiver Section

All but the MAX230 and MAX234 contain RS-232/V.28 receivers. These receivers convert the $\pm 5V$ to $\pm 15V$ RS-232 signals to 5V TTL/CMOS outputs. Since the RS-232C/V.28 specifications define a voltage level greater than +3V as a 0, the receivers are inverting. Maxim has set the guaranteed input thresholds of the receivers to 0.8V minimum and 2.4V maximum, which are significantly tighter than the $-3.0V$ minimum and +3.0V maximum required by the RS-232 and V.28 specifications. This allows the receivers to respond both to RS-232/V.28 levels and TTL level inputs. The receivers are protected against input overvoltage up to $\pm 30V$.

The 0.8V guaranteed lower threshold is important to ensure that the receivers will have a logic 1 output if the receiver is not being driven because the equipment containing the line driver is turned off or disconnected, or if the connecting cable has an open circuit or short circuit. In other words, the receiver implements Type 1 interpretation of fault conditions (§7 of V.28, §2.5 of RS-232C). While a 0V or even a $-3V$ receiver threshold would be acceptable for the data lines, these lower thresholds would not give proper indication on the control lines such as DTR and DSR. The receivers, on the other hand, have a full 0.8V noise margin for detecting the power-down or cable-disconnected states.

The receivers have a hysteresis of approximately 0.5V, with a minimum guaranteed hysteresis of 200mV. This aids in obtaining clean output transitions, even with slow rise and fall time input signals with moderate amounts of noise and ringing. The propagation delays of the receivers are 350ns for negative-going input signals, and 650ns for positive-going input signals (see Typical Characteristics graphs).

The MAX239 has a receiver 3-state control line, and the MAX235, MAX236, MAX240 and MAX241 have both a receiver 3-state control line and a low power shutdown control. The receiver TTL/CMOS outputs are in a high impedance 3-state mode whenever the 3-state ENable line is high, and are also high impedance whenever the Shutdown control line is high.

MAX230-241*



+5V Powered RS-232 Drivers/Receivers

Review of EIA Standard RS-232-C and CCITT Recommendations V.28 and V.24

The most common serial interface between electronic equipment is the "RS232" interface. This serial interface has been found to be particularly useful for the interface between units made by different manufacturers since the voltage levels are defined by the EIA Standard RS-232-C and CCITT Recommendation V.28. The RS-232 specification also contains signal circuit definitions and connector pin assignments, while CCITT circuit definitions are contained in a separate document, Recommendation V.24. Originally intended to interface modems to computers and terminals, these standards have many signals which are not used for computer-to-computer or computer-to-peripheral communication.

Serial interfaces can be used with a variety of transmission formats. The most popular by far is the asynchronous format, generally at one of the standard baud rates of 300, 600, 1200, etc. The maximum recommended baud rate for RS-232 and V.28 is 20,000 baud, and the fastest commonly used baud rate is 19,200 baud. Asynchronous serial links use a variety of combinations of the number of data bits, what type (if any) of parity bit, and the number of stop bits. A typical combination is 7 data bits, even parity, and 1 stop bit.

RS232/V.28 physical links are also suitable for synchronous transmission protocols. These higher level protocols often use the standard RS-232C/V.28 voltage levels. Note that one type of physical link (such as RS-232/V.28 voltage levels) can be used for a variety of higher level protocols. Table 2 summarizes the voltage levels and other requirements of V.28 and RS-232.

Comparison of RS-232C/V.28 with other Standards

The other two most common serial interface specifications are the EIA RS423 and RS422/RS485 (CCITT recommendations V.10 and V.11). While the RS-232 or V.28/V.24 interface is the most common interface for communication between equipment made by different manufacturers, the RS423/V.10 interface and RS422/V.11 interfaces can operate at higher baud rates. In addition, the RS485 interface can be used for low cost local area networks.

The RS423 and V.10 interfaces are unbalanced or "single-ended" interfaces which use a differential receiver. This standard is intended for data signaling rates up to 100 kbit/s (100 kilobaud). It achieves this higher baud rate through more precise requirements

on the waveshape of the transmitters and through the use of differential receivers to compensate for ground potential variations between the transmitting and receiving equipment. With certain limitations, this interface is compatible with RS-232 and V.28. The limitations are:

- 1) less than 20,000 baud rate,
- 2) maximum cable lengths determined by RS-232 performance,
- 3) RS423/V.10 DTE and DCE signal return paths must be connected to the RS232/V.28 signal ground,
- 4) the RS-232 transmitter output voltages must be limited to $\pm 12V$, or additional protection must be provided for the RS423/V.10 receivers, and
- 5) not all RS232/V.28 receivers will show proper power-off detection of V.10 transmitter outputs.

Maxim's MAX230 and MAX232-MAX238, MAX240 and MAX241 meet restrictions 4 and 5 over the entire range of recommended operating conditions. The MAX231 and MAX239 meet restrictions 4 and 5 provided that the V⁻ voltage is 12.5V or less.

The RS422, RS485, and V.11 interfaces are balanced double-current interchanges suitable for baud rates up to 10 Mbit/s. These interfaces are not compatible with RS-232 or V.28 voltage levels.

Application Hints

Operation at High Baud Rates

V.28 states that "the time required for the signal to pass through the transition region during a change in state shall not exceed 1 millisecond or 3 percent of the nominal element period on the interchange circuit, whichever is less." RS-232C allows the transition time to be 4 percent of the duration of a signal element. At 19,200 baud, the "nominal element period" is approximately 50 μ s, of which 3 percent is 1.5 μ s. Since the transition region is from -3V to +3V, this means the V.28 slew rate would ideally be faster than 6V/1.5 μ s = 4V/ μ s at 19.2 kbaud and 2V/ μ s at 9600 baud. The RS-232 requirement is equivalent to 3V/ μ s at 19.2 kbaud, 1.5V/ μ s at 9600 baud, etc. The slew rate of the MAX230 series devices is about 3V/ μ s with the maximum recommended load of 2500pF. In practice, the effect of less than optimum slew rate is a distortion of the recovered data, where the 1's and 0's no longer have equal width. This distortion generally has negligible effect and the devices can be reliably used for 19.2 kbaud serial links when the cable capacitance is kept below 2500pF. With very low capacitance loading, the MAX230 and MAX234-239, MAX240 and MAX241 may even be used at 38.4 kbaud, since the typical slew rate is 5V/ μ s when loaded with 500pF in parallel with 5k Ω . Under no circumstance will the

+5V Powered RS-232 Drivers/Receivers

Non-Inverting Drivers and Receivers

Occasionally, a non-inverting driver or receiver is needed instead of the inverting drivers and receivers of the family. Simply use one of the receivers as a TTL/CMOS inverter to get the desired operation (Figure 17). If the logic output driving the receiver input has less than 1mA of output source capability, then add the 2.2k Ω pullup resistor.

The receiver TTL outputs can directly drive the input of another receiver to form a non-inverting RS-232 receiver.

Protection for Shorts to $\pm 15V$ Supplies

All driver outputs except on the MAX231, MAX232 and MAX233 are protected against short circuits to $\pm 15V$, which is the maximum allowable loaded output voltage of an RS-232/V.28 transmitter. The MAX231, MAX232, and MAX233 can be protected against short circuits to $\pm 15V$ power supplies by the addition of a series 220 Ω resistor in each output. This protection is not needed to protect against short circuits to most RS-232 transmitters such as the 1488, since they have an internal short circuit current limit of 12mA.

The power dissipation of the MAX230 and MAX234-MAX239, MAX240 and MAX241 is about 200mW with all transmitters shorted to $\pm 15V$.

Isolated RS-232 Interfaces

RS-232 and V.28 specifications require a common ground connection between the two units communicating via the RS-232/V.28 interface. In some cases, there may be large differences in ground potential between the two units, and in other cases it may be desired to avoid ground loop currents by isolating the two grounds. In other cases, a computer or control system must be protected against accidental connection of the RS-232/V.28 signal lines to 110/220VAC power lines. Figure 18 shows a circuit with this isolation. The power for the MAX233 is generated by a MAX635 DC-DC converter. When the MAX635 regulates point "A" to -5V, the isolated output at point "B" will be semi-regulated to +5V. The two optocouplers maintain isolation between the system ground and the RS-232 ground while transferring the data across the isolation barrier. While this circuit will not withstand 110VAC between the RS-232 ground and either the receiver or transmitter lines, the voltage difference between the two grounds is only limited by the optocoupler and DC-DC converter transformer breakdown ratings.

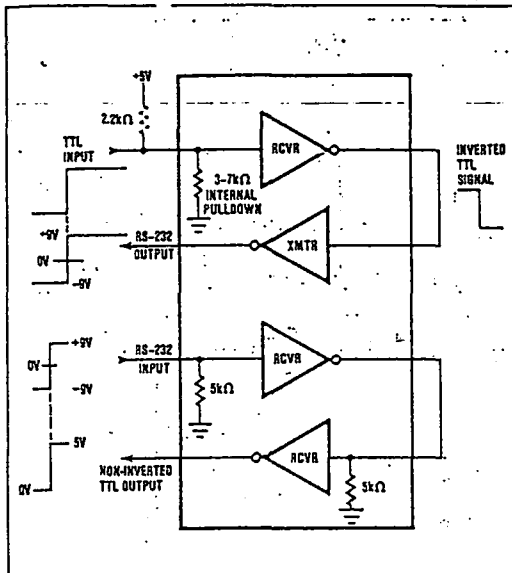


Figure 17. Non-inverting RS-232 Transmitters and Receivers.

slew rate exceed the RS-232/V.28 maximum spec of 50V/ μ s and, unlike the 1488 driver, no external compensation capacitors are needed under any load condition.

Driving Long Cables

The RS-232 standard states that "The use of short cables (each less than approximately 50 feet or 15 meters) is recommended; however, longer cables are permissible, provided that the load capacitance . . . does not exceed 2500pF."

Baud rate and cable length can be traded off: use lower baud rates for long cables, use short cables if high baud rates are desired. For both long cables and high baud rates, use RS422/V.11. The maximum cable length for a given baud rate is determined by several factors, including the capacitance per meter of cable, the slew rate of the driver under high capacitive loading, the receiver threshold and hysteresis, and the acceptable bit error rate. The receivers have 0.5V of hysteresis, and the drivers are designed such that the slew rate reduction caused by capacitive loading is minimized (see Typical Characteristics).

MAX230-241*



+5V Powered RS-232 Drivers/Receivers

Ordering Information

MAX230-241*

PART	TEMP RANGE	PACKAGE
MAX230		0.3" Wide
MAX230CPP	0°C to +70°C	20 Lead Plastic DIP
MAX230CWP	0°C to +70°C	20 Lead Wide S.O.
MAX230C/D	0°C to +70°C	Dice
MAX230EPP	-40°C to +85°C	20 Lead Plastic DIP
MAX230EWP	-40°C to +85°C	20 Lead Wide S.O.
MAX230EJP	-40°C to +85°C	20 Lead CERDIP
MAX230MJP	-55°C to +125°C	20 Lead CERDIP
MAX231		0.3" Wide
MAX231CPD	0°C to +70°C	14 Lead Plastic DIP
MAX231CWE	0°C to +70°C	16 Lead Wide S.O.
MAX231C/D	0°C to +70°C	Dice
MAX231EPD	-40°C to +85°C	14 Lead Plastic DIP
MAX231EWE	-40°C to +85°C	16 Lead Wide S.O.
MAX231EJD	-40°C to +85°C	14 Lead CERDIP
MAX231MJD	-55°C to +125°C	14 Lead CERDIP
MAX232		0.3" Wide
MAX232CPE	0°C to +70°C	16 Lead Plastic DIP
MAX232CWE	0°C to +70°C	16 Lead Wide S.O.
MAX232C/D	0°C to +70°C	Dice
MAX232EPE	-40°C to +85°C	16 Lead Plastic DIP
MAX232EJE	-40°C to +85°C	16 Lead CERDIP
MAX232EWE	-40°C to +85°C	16 Lead Wide S.O.
MAX232MJE	-55°C to +125°C	16 Lead CERDIP
MAX233		0.3" Wide
MAX233CPP	0°C to +70°C	20 Lead Plastic DIP
MAX233EPP	-40°C to +85°C	20 Lead Plastic DIP
MAX234		0.3" Wide
MAX234CPE	0°C to +70°C	16 Lead Plastic DIP
MAX234CWE	0°C to +70°C	16 Lead Wide S.O.
MAX234C/D	0°C to +70°C	Dice
MAX234EPE	-40°C to +85°C	16 Lead Plastic DIP
MAX234EWE	-40°C to +85°C	16 Lead Wide S.O.
MAX234EJE	-40°C to +85°C	16 Lead CERDIP
MAX234MJE	-55°C to +125°C	16 Lead CERDIP
MAX235		0.6" Wide
MAX235CPG	0°C to +70°C	24 Lead Plastic DIP*
MAX235EPG	-40°C to +85°C	24 Lead Plastic DIP*
MAX235EDG	-40°C to +85°C	24 Lead Ceramic*
MAX235MDG	-55°C to +125°C	24 Lead Ceramic*

* = 0.600" package

PART	TEMP RANGE	PACKAGE
MAX236		0.3" Wide
MAX236CNG	0°C to +70°C	24 Lead Plastic DIP
MAX236CWG	0°C to +70°C	24 Lead Wide S.O.
MAX236C/D	0°C to +70°C	Dice
MAX236ENG	-40°C to +85°C	24 Lead Plastic DIP
MAX236EWG	-40°C to +85°C	24 Lead Wide S.O.
MAX236ERG	-40°C to +85°C	24 Lead CERDIP
MAX236MRG	-55°C to +125°C	24 Lead CERDIP
MAX237		0.3" Wide
MAX237CNG	0°C to +70°C	24 Lead Plastic DIP
MAX237CWG	0°C to +70°C	24 Lead Wide S.O.
MAX237C/D	0°C to +70°C	Dice
MAX237ENG	-40°C to +85°C	24 Lead Plastic DIP
MAX237EWG	-40°C to +85°C	24 Lead Wide S.O.
MAX237ERG	-40°C to +85°C	24 Lead CERDIP
MAX237MRG	-55°C to +125°C	24 Lead CERDIP
MAX238		0.3" Wide
MAX238CNG	0°C to +70°C	24 Lead Plastic DIP
MAX238CWG	0°C to +70°C	24 Lead Wide S.O.
MAX238C/D	0°C to +70°C	Dice
MAX238ENG	-40°C to +85°C	24 Lead Plastic DIP
MAX238EWG	-40°C to +85°C	24 Lead Wide S.O.
MAX238ERG	-40°C to +85°C	24 Lead CERDIP
MAX238MRG	-55°C to +125°C	24 Lead CERDIP
MAX239		0.3" Wide
MAX239CNG	0°C to +70°C	24 Lead Plastic DIP
MAX239CWG	0°C to +70°C	24 Lead Wide S.O.
MAX239C/D	0°C to +70°C	Dice
MAX239ENG	-40°C to +85°C	24 Lead Plastic DIP
MAX239EWG	-40°C to +85°C	24 Lead Wide S.O.
MAX239ERG	-40°C to +85°C	24 Lead CERDIP
MAX239MRG	-55°C to +125°C	24 Lead CERDIP
MAX240		Flatpak
MAX240CMH	0°C to +70°C	44 Lead Flatpak
MAX240EMH	-40°C to +85°C	44 Lead Flatpak
MAX241		0.3" Wide
MAX241CWI	0°C to +70°C	28 Lead Wide S.O.
MAX241EWI	-40°C to +85°C	28 Lead Wide S.O.



+5V Powered RS-232 Drivers/Receivers

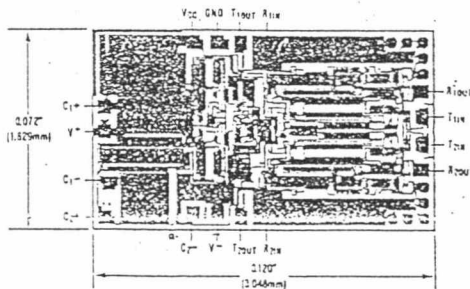
Table 1. Circuits Commonly Used for RS-232C and V.24 Asynchronous Interfaces

PIN.	CIRCUIT	
1	Protective Ground	Connect to Earth Ground
2	Transmit Data (TD)	Data from DTE
3	Receive Data (RD)	Data from DCE
4	Request To Send (RTS)	Handshake from DTE
5	Clear to Send (CTS)	Handshake from DCE
6	Data Set ready (DSR)	Handshake from DCE
7	Signal Ground	Reference Point for Signals
8	Received Line Signal Detector (sometimes called Carrier Detect, DCD)	Handshake from DCE
11	Printer Busy Signal	Handshake from Printer
20	Data Terminal Ready	Handshake from DTE
22	Ring Indicator	Handshake from DCE

Table 2. Summary of RS-232C and V.28 Electrical Specifications

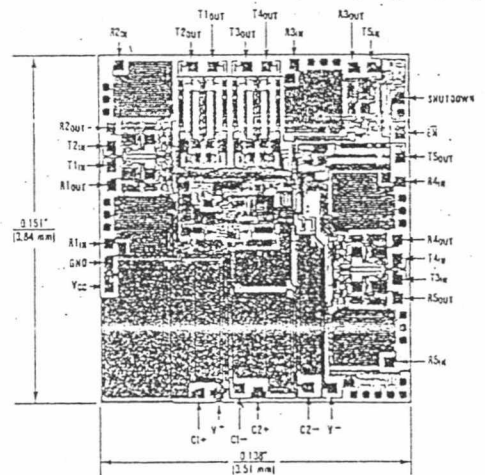
PARAMETER	SPECIFICATION	COMMENTS
Driver Output Voltage		
0 level	+5V to +15V	With 3-7k Ω load
1 level	-5V to -15V	With 3-7k Ω load
Max. output	$\pm 25V$ Max.	No Load
Receiver Input Thresholds (data and clock signals)		
0 level	+3V to +25V	
1 level	-3V to -25V	
Receiver Thresholds: RTS, DSR, DTR		
On level	+3V to +25V	Detects Power Off Condition at Driver
Off level	Open Circuit or -3V to -25V	
Receiver Input Resistance	3k Ω to 7k Ω	
Driver Output Resistance, power off condition	300 Ω Min.	$V_{OUT} < \pm 2V$
Driver Slew Rate	30V/ μs Max.	3k $\Omega < R_L < 7k\Omega$; 0pF < $C_L < 2500pF$
Signalling Rate	Up to 20kbits/sec.	
Cable Length	50'/15 m. Recommended Max. Length	Longer cables permissible, if $C_{LOAD} \leq 2500pF$

Chip Topography



MAX231, MAX232 and MAX233

Note: Connect substrate to V*.



MAX230 and MAX234-239, MAX240, MAX241

Notes:

1. Shutdown pin of MAX234, MAX237, MAX238, MAX239, MAX240 and MAX241 are internally connected to ground.
2. Connect substrate to V*.

Maxim cannot assume responsibility for use of any circuitry other than circuitry entirely embodied in a Maxim product. No circuit patent licenses are implied. Maxim reserves the right to change the circuitry and specifications without notice at any time.



PNP SILICON ANNULAR* TRANSISTORS

... designed for general purpose switching and amplifier applications and for complementary circuitry with types 2N3903 and 2N3904.

- High Voltage Ratings - $BV_{CEO} = 40$ Volts (Min)
- Current Gain Specified from $100 \mu A$ to 100 mA
- Complete Switching and Amplifier Specifications
- Low Capacitance - $C_{ob} = 4.5$ pF (Max)

*MAXIMUM RATINGS

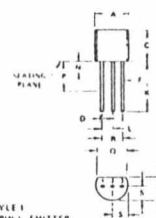
Rating	Symbol	Value	Unit
Collector Base Voltage	V_{CB}	40	Vdc
Collector-Emitter Voltage	V_{CEO}	40	Vdc
Emitter Base Voltage	V_{EB}	5.0	Vdc
Collector Current	I_C	200	mA
Total Power Dissipation @ $T_A = 60^\circ C$	P_D	250	mW
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ C$ Derate above $25^\circ C$	P_D	350	mW
		2.8	mW/ $^\circ C$
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ C$ Derate above $25^\circ C$	P_D	1.0	Watt
		8.0	mW/ $^\circ C$
Junction Operating Temperature	T_J	+150	$^\circ C$
Storage Temperature Range	T_{stg}	-55 to +150	$^\circ C$

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	357	$^\circ C/W$
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	125	$^\circ C/W$

2N3905
2N3906

PNP SILICON SWITCHING & AMPLIFIER TRANSISTORS



DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	2.70	3.10	0.175	0.205
B	1.10	1.15	0.175	0.185
C	1.15	1.25	0.175	0.178
D	0.40	0.53	0.014	0.017
E	0.10	0.12	0.011	0.011
F	0.10	0.12	0.011	0.011
G	1.70	1.80	0.100	0.100
H	1.50	1.75	0.015	0.015
J	1.50	1.75	0.015	0.015
K	1.10	1.15	0.100	0.100
L	1.10	1.15	0.100	0.100
M	1.10	1.15	0.100	0.100
N	1.10	1.15	0.100	0.100
O	1.10	1.15	0.100	0.100
P	1.10	1.15	0.100	0.100
Q	1.10	1.15	0.100	0.100
R	1.10	1.15	0.100	0.100
S	1.10	1.15	0.100	0.100

CASE 29 02
(10 921)

2N3903, 2N3904 (continued)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_a = 25°C unless otherwise noted)

Characteristic	Fig No	Symbol	Min	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS					
Collector Base Breakdown Voltage ($I_C = 10 \mu A, I_B = 0$)		BV_{CBO}	40	-	Vdc
Collector-Emitter Breakdown Voltage (1) ($I_C = 1.0$ mA, $I_B = 0$)		BV_{CEO}	40	-	Vdc
Emitter Base Breakdown Voltage ($I_E = 10 \mu A, I_C = 0$)		BV_{EB}	4.0	-	Vdc
Collector Cutoff Current ($V_{CE} = 30$ Vdc, $V_{EB(off)} = 3.0$ Vdc)		I_{CEV}	-	50	nA
Base Cutoff Current ($V_{CE} = 30$ Vdc, $V_{EB(off)} = 3.0$ Vdc)		I_{BEV}	-	50	nA

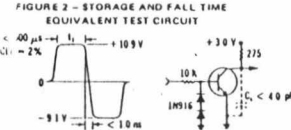
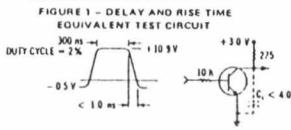
Characteristic	Fig No	Symbol	Min	Max	Unit
ON CHARACTERISTICS					
DC Current Gain (1) ($I_C = 0.1$ mA, $V_{CE} = 1.0$ Vdc)	2N3903 2N3904	h_{FE}	20 40	-	-
($I_C = 1.0$ mA, $V_{CE} = 1.0$ Vdc)	2N3903 2N3904		35 70	-	-
($I_C = 10$ mA, $V_{CE} = 1.0$ Vdc)	2N3903 2N3904		50 100	150 300	-
($I_C = 50$ mA, $V_{CE} = 1.0$ Vdc)	2N3903 2N3904		30 60	-	-
($I_C = 100$ mA, $V_{CE} = 1.0$ Vdc)	2N3903 2N3904		15 30	-	-
Collector-Emitter Saturation Voltage (1) ($I_C = 10$ mA, $I_B = 1.0$ mA)	14, 17	$V_{CE(sat)}$	-	0.3	Vdc
($I_C = 50$ mA, $I_B = 5.0$ mA)			-	0.3	
Base-Emitter Saturation Voltage (1) ($I_C = 10$ mA, $I_B = 1.0$ mA)	17	$V_{BE(sat)}$	0.45	0.85	Vdc
($I_C = 50$ mA, $I_B = 5.0$ mA)			-	0.95	

Characteristic	Fig No	Symbol	Min	Max	Unit
SMALL SIGNAL CHARACTERISTICS					
Current Gain-Bandwidth Product ($I_C = 10$ mA, $V_{CE} = 30$ Vdc, $f = 100$ kHz)	2N3903 2N3904	f_T	350 300	-	MHz
Output Capacitance ($V_{CB} = 5.0$ Vdc, $I_E = 0$, $f = 100$ kHz)	3	C_{ob}	-	4.0	pF
Input Capacitance ($V_{BE} = 0.5$ Vdc, $I_C = 0$, $f = 100$ kHz)	3	C_{ib}	-	8.0	pF
Input Impedance ($I_C = 1.0$ mA, $V_{CE} = 10$ Vdc, $f = 1.0$ kHz)	13	h_{ie}	0.5 1.0	8.0	k ohms
Voltage Feedback Ratio ($I_C = 1.0$ mA, $V_{CE} = 10$ Vdc, $f = 1.0$ kHz)	14	h_{re}	0.1 0.5	5.0 8.0	X 10 ⁻⁴
Small Signal Current Gain ($I_C = 1.0$ mA, $V_{CE} = 10$ Vdc, $f = 1.0$ kHz)	2N3903 2N3904	h_{FE}	50 100	300 400	-
Output Admittance ($I_C = 1.0$ mA, $V_{CE} = 10$ Vdc, $f = 1.0$ kHz)	12	h_{oe}	1.0	40	μmhos
Noise Figure ($I_C = 100 \mu A, V_{CE} = 5.0$ Vdc, $R_B = 1.0$ k ohms, $f = 10$ Hz to 15.7 kHz)	2N3903 2N3904	NF	-	8.0 9.0	dB

SWITCHING CHARACTERISTICS

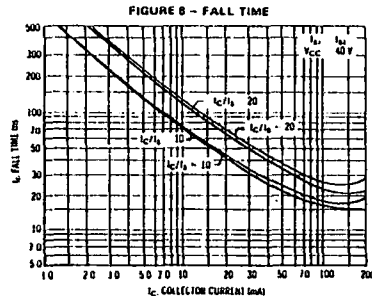
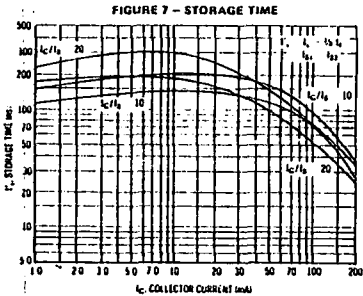
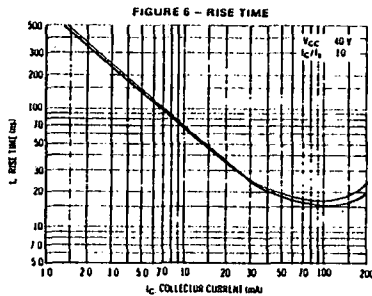
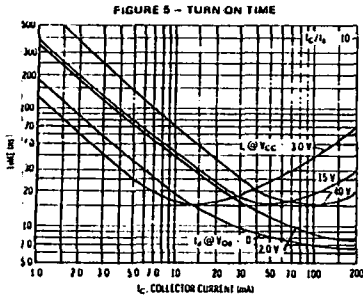
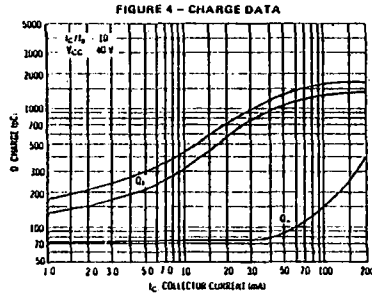
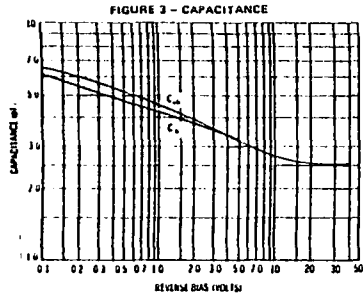
Characteristic	Fig No	Symbol	Min	Max	Unit
Delay Time ($V_{CC} = 3.0$ Vdc, $V_{BE(on)} = 0.5$ Vdc, $I_C = 10$ mA, $I_B = 1.0$ mA)	1, 5	t_d	-	35	ns
Rise Time ($V_{CC} = 3.0$ Vdc, $V_{BE(on)} = 0.5$ Vdc, $I_C = 10$ mA, $I_B = 1.0$ mA)	1, 5, 6	t_r	-	35	ns
Storage Time ($V_{CC} = 3.0$ Vdc, $I_C = 10$ mA, $I_B = I_C$)	2, 7	t_s	-	175	ns
Fall Time ($I_B = I_C$)	3, 8	t_f	-	50	ns

(1) Pulse Test. Pulse Width = 300 μs, Duty Cycle = 2.0%.
*Indicates JEDEC Registered Data



*Total shunt capacitance of test fig. 1 connectors

TRANSIENT CHARACTERISTICS
 — $T_A = 25^\circ\text{C}$ — $T_A = 125^\circ\text{C}$



*ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Fig. No.	Symbol	Min	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS					
Collector-Base Breakdown Voltage $I_C = 10 \mu\text{A dc}, I_B = 0$		BV_{CBO}	40	-	Vdc
Collector-Emitter Breakdown Voltage (1) $I_C = 1.0 \text{ mA dc}, I_B = 0$		BV_{CEO}	40	-	Vdc
Emitter-Base Breakdown Voltage $I_E = 10 \mu\text{A dc}, I_C = 0$		BV_{EB0}	5.0	-	Vdc
Collector Cutoff Current $V_{CE} = 20 \text{ Vdc}, V_{BE}(\text{off}) = 3.0 \text{ Vdc}$		I_{CEX}	-	50	nA dc
Base Cutoff Current $V_{CE} = 20 \text{ Vdc}, V_{BE}(\text{off}) = 3.0 \text{ Vdc}$		I_{BL}	-	50	nA dc
ON CHARACTERISTICS (1)					
DC Current Gain $I_C = 0.1 \text{ mA dc}, V_{CE} = 1.0 \text{ Vdc}$	15	β_{DC}	2N3905	30	-
2N3906			60	-	
$I_C = 1.0 \text{ mA dc}, V_{CE} = 1.0 \text{ Vdc}$			2N3905	40	-
2N3906			80	-	
$I_C = 10 \text{ mA dc}, V_{CE} = 1.0 \text{ Vdc}$			2N3905	50	150
2N3906	100	300			
$I_C = 50 \text{ mA dc}, V_{CE} = 1.0 \text{ Vdc}$	2N3905	30	-		
2N3906	60	-			
$I_C = 100 \text{ mA dc}, V_{CE} = 1.0 \text{ Vdc}$	2N3905	15	-		
2N3906	20	-			
Collector-Emitter Saturation Voltage $I_C = 10 \text{ mA dc}, I_B = 1.0 \text{ mA dc}$ $I_C = 50 \text{ mA dc}, I_B = 5.0 \text{ mA dc}$	18, 17	$V_{CE(\text{sat})}$	-	0.25	Vdc
-			0.4		
Base-Emitter Saturation Voltage $I_C = 10 \text{ mA dc}, I_B = 1.0 \text{ mA dc}$ $I_C = 50 \text{ mA dc}, I_B = 5.0 \text{ mA dc}$	17	$V_{BE(\text{sat})}$	0.65	0.85	Vdc
-			0.95		
SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS					
Current Gain - Bandwidth Product $I_C = 10 \text{ mA dc}, V_{CE} = 20 \text{ Vdc}, f = 100 \text{ kHz}$	3	f_T	2N3905	200	MHz
2N3906			250		
Output Capacitance $V_{CE} = 5.0 \text{ Vdc}, I_C = 0, f = 100 \text{ kHz}$	3	C_{ob}	-	4.5	pF
Input Capacitance $V_{BE} = 0.5 \text{ Vdc}, I_C = 0, f = 100 \text{ kHz}$			13	C_{ib}	-
Input Impedance $I_C = 1.0 \text{ mA dc}, V_{CE} = 10 \text{ Vdc}, f = 1.0 \text{ kHz}$	13	h_{ie}			0.5
2N3906			2.0	12	
Voltage Feedback Ratio $I_C = 1.0 \text{ mA dc}, V_{CE} = 10 \text{ Vdc}, f = 1.0 \text{ kHz}$	14	h_{re}	0.1	5.0	$\times 10^{-4}$
2N3906			1.0	10	
Small Signal Current Gain $I_C = 1.0 \text{ mA dc}, V_{CE} = 10 \text{ Vdc}, f = 1.0 \text{ kHz}$	11	h_{fe}	50	300	-
2N3906			100	400	
Output Admittance $I_C = 1.0 \text{ mA dc}, V_{CE} = 10 \text{ Vdc}, f = 1.0 \text{ kHz}$	12	h_{oe}	1.0	40	μmhos
2N3906			3.0	60	
Noise Figure $I_C = 100 \mu\text{A dc}, V_{CE} = 5.0 \text{ Vdc}, R_S = 1.0 \text{ k ohm}, 2N3905$ $f = 10 \text{ Hz to } 15.7 \text{ kHz}, 2N3906$	3, 10	NF	-	5.0	dB
-			-	4.0	
SWITCHING CHARACTERISTICS					
Delay Time $V_{CC} = 3.0 \text{ Vdc}, V_{BE}(\text{off}) = 0.5 \text{ Vdc}$	1, 5, 6	t_d	-	35	ns
Rise Time $I_C = 10 \text{ mA dc}, I_B = 1.0 \text{ mA dc}$			2, 7	t_r	-
Storage Time $V_{CC} = 3.0 \text{ Vdc}, I_C = 10 \text{ mA dc}, 2N3905$ $I_B1 = I_B2 = 1.0 \text{ mA dc}, 2N3906$	2, 8	t_s			-
2N3906			-	225	
Fall Time $I_C = 10 \text{ mA dc}, I_B = 1.0 \text{ mA dc}, 2N3905$ $I_B1 = I_B2 = 1.0 \text{ mA dc}, 2N3906$	2, 8	t_f	-	60	ns
2N3906			-	75	

*Indicates JEDEC Registered Data. (1) Pulse Width = 300 μs , Duty Cycle = 2%.

FIGURE 1 - DELAY AND RISE TIME EQUIVALENT TEST CIRCUIT

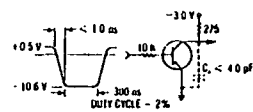
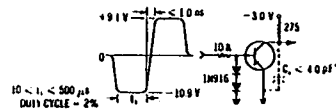


FIGURE 2 - STORAGE AND FALL TIME EQUIVALENT TEST CIRCUIT



*Total shunt capacitance of test jig and connectors

MOTOROLA
SEMICONDUCTOR
TECHNICAL DATA

Infrared LED

MLED930

... designed for applications requiring high power output, low drive power and very fast response time. This device is used in industrial processing and control, light modulators, shaft or position encoders, punched card readers, optical switching, and logic circuits. It is spectrally matched for use with silicon detectors.

- High-Power Output — 4 mW (T, ρ) @ I_F = 100 mA, Pulsed
- Infrared-Emission — 940 nm (Typ)
- Low Drive Current — 10 mA for 450 μW (Typ)
- Popular TO-18 Type Package for Easy Handling and Mounting
- Hermetic Metal Package for Stability and Reliability

INFRARED
 LED
 940 nm

CONVEX
 LENS



CASE 209-01
 METAL

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Reverse Voltage	V _R	6	Volts
Forward Current — Continuous	I _F	60	mA
Forward Current — Peak Pulse (PW = 100 μs, d.c. = 2%)	I _F	1	A
Total Device Dissipation @ T _A = 25°C Derate above 25°C (Note 1)	P _D	250 2.27	mW mW/°C
Operating Temperature Range	T _A	-55 to +125	°C
Storage Temperature Range	T _{stg}	-65 to +150	°C

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_A = 25°C unless otherwise noted)

Characteristic	Fig. No.	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Reverse Leakage Current (V _R = 3 V)	—	I _R	—	2	—	nA
Reverse Breakdown Voltage (I _R = 100 μA)	—	V _{(BR)R}	6	20	—	Volts
Forward Voltage (I _F = 50 mA)	2	V _F	—	1.32	1.5	Volts
Total Capacitance (V _R = 0 V, f = 1 MHz)	—	C _T	—	18	—	pF

OPTICAL CHARACTERISTICS (T_A = 25°C unless otherwise noted)

Total Power Output (Note 2) (I _F = 60 mA, dc) (I _F = 100 mA, PW = 100 μs, duty cycle = 2%)	3, 4	P _O	— 1	2.5 4	—	mW
Radiant Intensity (Note 3) (I _F = 100 mA, PW = 100 μs, duty cycle = 2%)	—	I _o	—	1.5	—	mW/ steradian
Peak Emission Wavelength	1	λ _P	—	940	—	nm
Spectral Line Half Width	1	Δλ	—	40	—	nm

Notes: 1. Printed Circuit Board Mounting

2. Power Output, P_O, is the total power radiated by the device into a solid angle of 2π steradians. It is measured by directing all radiation leaving the device, within this solid angle, onto a calibrated silicon solar cell.

3. Irradiance from a Light Emitting Diode (LED) can be calculated by:

$$H = \frac{I_o}{d^2}$$

where H is irradiance in mW/cm²; I_o is radiant intensity in mW/steradian;
 d² is distance from LED to the detector in cm.

MLED930

TYPICAL CHARACTERISTICS

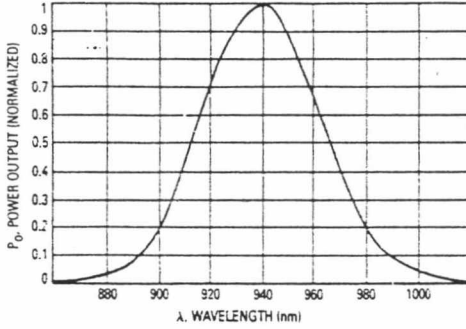


Figure 1. Relative Spectral Output

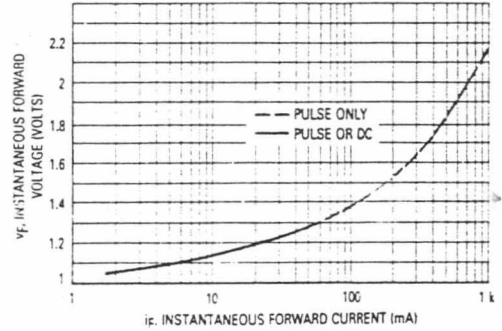


Figure 2. Forward Characteristics

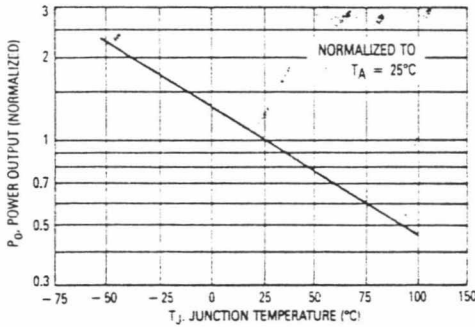


Figure 3. Power Output versus Junction Temperature

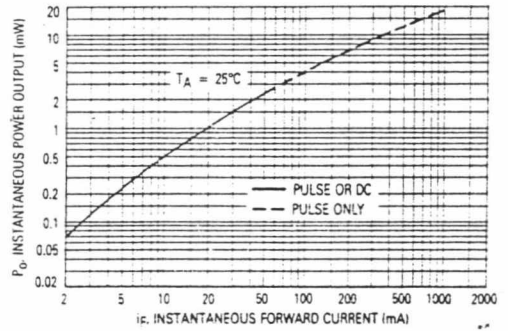


Figure 4. Instantaneous Power Output versus Forward Current

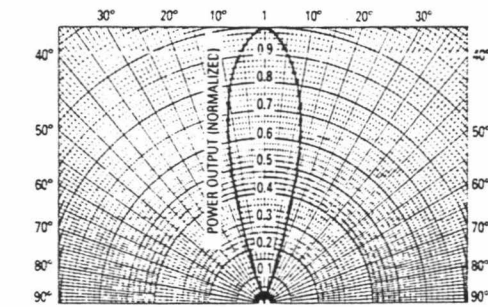
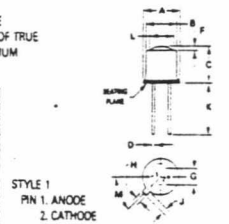


Figure 5. Spatial Radiation Pattern

OUTLINE DIMENSIONS

- NOTES
 1. PIN 2 INTERNALLY CONNECTED TO CASE
 2. LEADS WITHIN 0.13 mm (0.005) RADIUS OF TRUE POSITION AT SEATING PLANE AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	5.31	5.84	0.209	0.230
B	4.52	4.95	0.178	0.195
C	5.08	5.35	0.200	0.210
D	0.41	0.48	0.016	0.019
F	0.51	0.62	0.020	0.024
G	2.54 BSC		0.100 BSC	
H	0.99	1.17	0.039	0.046
J	3.84	1.27	0.151	0.048
K	12.70	—	0.500	—
L	3.25	4.01	0.128	0.158
M	45° BSC		45° BSC	



STYLE 1
 PIN 1 ANODE
 PIN 2 CATHODE

CASE 209-01
 METAL

MOTOROLA
SEMICONDUCTOR
TECHNICAL DATA

Photo Detectors
Diode Output

MRD500
MRD510

PHOTO DETECTORS
DIODE OUTPUT
PIN SILICON
250 MILLIWATTS
100 VOLTS

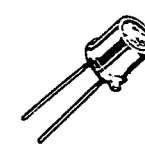
... designed for application in laser detection, light demodulation, detection of visible and near infrared light-emitting diodes, shaft or position encoders, switching and logic circuits, or any design requiring radiation sensitivity, ultra high-speed, and stable characteristics.

- Ultra Fast Response — (<1 ns Typ)
- High Sensitivity — MRD500 (1.2 $\mu\text{A}/\text{mW}/\text{cm}^2$ Min)
 MRD510 (0.3 $\mu\text{A}/\text{mW}/\text{cm}^2$ Min)
- Available With Convex Lens (MRD500) or Flat Glass (MRD510) for Design Flexibility
- Popular TO-18 Type Package for Easy Handling and Mounting
- Sensitive-Throughout Visible and Near Infrared Spectral Range for Wide Application
- Annular Passivated Structure for Stability and Reliability

4



CASE 209-01
 MRD500
 (CONVEX LENS)



CASE 210-01
 MRD510
 (FLAT GLASS)

MAXIMUM RATINGS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
Reverse Voltage	V_R	100	Volts
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	250 2.27	mW mW/°C
Operating Temperature Range	T_A	-55 to +125	°C
Storage Temperature Range	T_{stg}	-65 to +150	°C

STATIC ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Fig. No.	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Dark Current ($V_R = 20\text{ V}$, $R_L = 1\text{ megohm}$) Note 2 $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = 100^\circ\text{C}$	2 and 3	I_D	— —	— 14	2 —	nA
Reverse Breakdown Voltage ($I_R = 10\ \mu\text{A}$)	—	$V_{(BR)R}$	100	200	—	Volts
Forward Voltage ($I_F = 50\ \text{mA}$)	—	V_F	—	—	1.1	Volts
Series Resistance ($I_F = 50\ \text{mA}$)	—	R_s	—	—	10	Ohms
Total Capacitance ($V_R = 20\ \text{V}$, $f = 1\ \text{MHz}$)	5	C_T	—	—	4	pF

OPTICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	MRD500 MRD510	Fig. No.	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Light Current ($V_R = 20\ \text{V}$) Note 1	MRD500 MRD510	1	I_L	6 1.5	9 2.1	— —	μA
Sensitivity at $0.8\ \mu\text{m}$ ($V_R = 20\ \text{V}$) Note 3	MRD500 MRD510	—	$S(\lambda = 0.8\ \mu\text{m})$	— —	6.6 1.5	— —	$\mu\text{A}/\text{mW}/\text{cm}^2$
Response Time ($V_R = 20\ \text{V}$, $R_L = 50\ \text{Ohms}$)	—	—	$t_{(resp)}$	—	1	—	ns
Wavelength of Peak Spectral Response	—	5	λ_s	—	0.8	—	μm

NOTES: 1. Radiation Flux Density (H) equal to $5\ \text{mW}/\text{cm}^2$ emitted from a tungsten source at a color temperature of 2870 K.
 2. Measured under dark conditions. ($I_H = 0$).
 3. Radiation Flux Density (H) equal to $0.5\ \text{mW}/\text{cm}^2$ at $0.8\ \mu\text{m}$.

MRD500, MRD510

TYPICAL CHARACTERISTICS

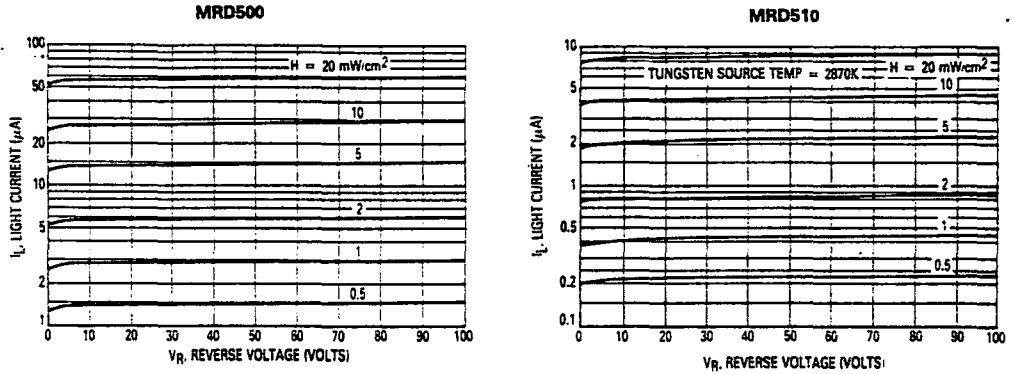


Figure 1. Irradiated Voltage — Current Characteristic

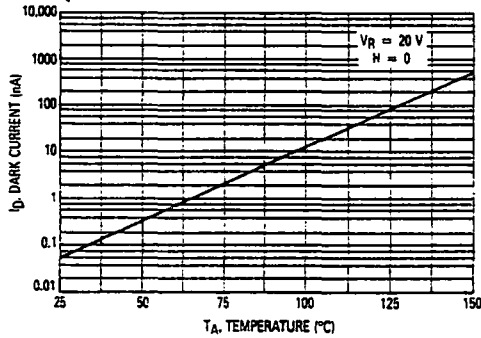


Figure 2. Dark Current versus Temperature

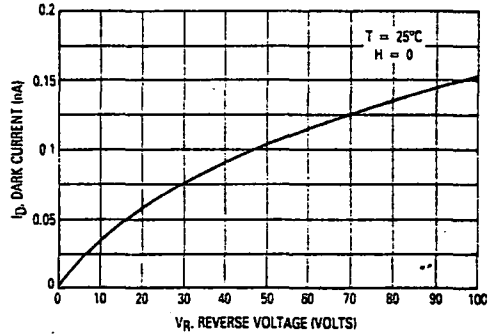


Figure 3. Dark Current versus Reverse Voltage

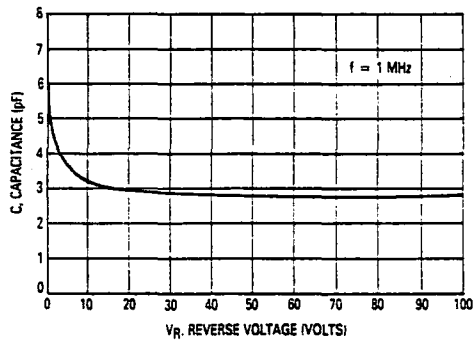


Figure 4. Capacitance versus Voltage

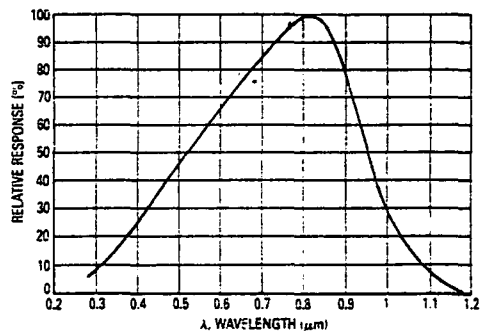


Figure 5. Relative Spectral Response

MRD500, MRD510

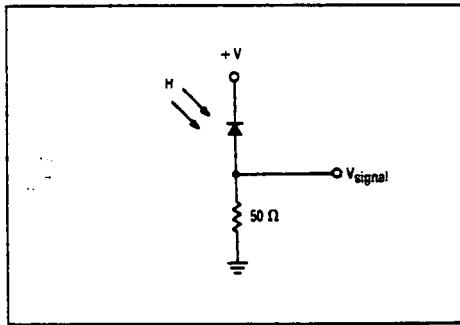


Figure 6. Typical Operating Circuit

OUTLINE DIMENSIONS

SEATING PLANE

STYLE 1:
PIN 1, ANODE
2, CATHODE

CASE 209-01
MRD500
(CONVEX LENS)

NOTES:
1. PIN 2 INTERNALLY CONNECTED TO CASE
2. LEADS WITHIN 0.13 mm (0.005) RADIUS OF TRUE POSITION AT SEATING PLANE AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	5.31	5.84	0.209	0.230
B	4.52	4.95	0.178	0.195
C	5.08	6.35	0.200	0.250
D	0.41	0.48	0.016	0.019
F	0.51	1.02	0.020	0.040
G	2.54 BSC		0.100 BSC	
H	0.99	1.17	0.039	0.046
J	0.84	1.22	0.033	0.048
K	12.70	—	0.500	—
L	3.35	4.01	0.132	0.158
M	45° BSC		45° BSC	

SEATING PLANE

STYLE 1:
PIN 1, ANODE
2, CATHODE

CASE 210-01
MRD510
(FLAT GLASS)

NOTES:
1. PIN 2 INTERNALLY CONNECTED TO CASE
2. LEADS WITHIN 0.13 (0.005) RADIUS OF TRUE POSITION AT SEATING PLANE AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	5.31	5.84	0.209	0.230
B	4.52	4.95	0.178	0.195
C	4.57	5.33	0.180	0.210
D	0.41	0.48	0.016	0.019
G	2.54 BSC		0.100 BSC	
H	0.99	1.17	0.039	0.046
J	0.84	1.22	0.033	0.048
K	12.70	—	0.500	—
M	45° BSC		45° BSC	

Specifications and Applications Information

LOW-NOISE JFET INPUT OPERATIONAL AMPLIFIERS

These low-noise JFET input operational amplifiers combine two state-of-the-art linear technologies on a single monolithic integrated circuit. Each internally compensated operational amplifier has well matched high voltage JFET input devices for low input offset voltage. The BIFET technology provides wide bandwidths and fast slew rates with low input bias currents, input offset currents, and supply currents. Moreover, the devices exhibit low-noise and low harmonic distortion making them ideal for use in high-fidelity audio amplifier applications.

These devices are available in single, dual and quad operational amplifiers which are pin-compatible with the industry standard MC1741, MC1458, and the MC3403/LM324 bipolar products. Devices with an "M" suffix are specified over the military operating temperature range of -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$ and those with a "C" suffix are specified from 0°C to $+70^{\circ}\text{C}$.

- Low Input Noise Voltage — 18 nV/√Hz Typ
- Low Harmonic Distortion — 0.01% Typ
- Low Input Bias and Offset Currents
- High Input Impedance — $10^{12} \Omega$ Typ
- High Slew Rate — 13 V/μs Typ
- Wide Gain Bandwidth — 4.0 MHz Typ
- Low Supply Current — 1.4 mA per Amp

ORDERING INFORMATION

Op Amp Function	Device	Temperature Range	Package
Single	TL071ACD, BCD, CD	0 to $+70^{\circ}\text{C}$	SO-8
	TL071ACJG, BCJG, CJG		Ceramic DIP
	TL071ACP, BCP, CP		Plastic DIP
	TL071MJG	-55 to -125°C	Ceramic DIP
Dual	TL072ACD, BCD, CD	0 to $+70^{\circ}\text{C}$	SO-8
	TL072ACJG, BCJG, CJG		Ceramic DIP
	TL072ACP, BCP, CP		Plastic DIP
	TL072MJG	-55 to -125°C	Ceramic DIP
Quad	TL074ACD, BCD, CD	0 to $+70^{\circ}\text{C}$	SO-14
	TL074ACJ, BCJ, CJ		Ceramic DIP
	TL074ACN, BCN, CN		Plastic DIP
	TL074MJ	-55 to -125°C	Ceramic DIP

LOW-NOISE JFET-INPUT OPERATIONAL AMPLIFIERS

SILICON MONOLITHIC INTEGRATED CIRCUITS



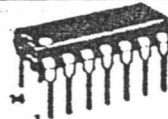
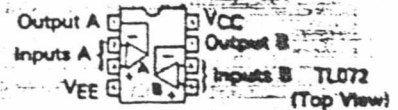
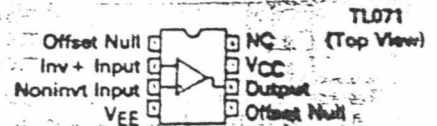
P SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 626-04



JA JG SUFFIX
CERAMIC PACKAGE
CASE 893-02



D SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 751-01
SO-8



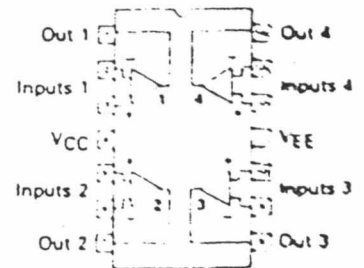
N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 646-05
(TL074 only)



J SUFFIX
CERAMIC PACKAGE
CASE 832-02
MO-001AA
(TL074 only)



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



MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	TL07_C TL07_AC TL07_BC		Unit
		TL07_M		
Supply Voltage	V _{CC} V _{EE}	+18 -18	+18 -18	V
Differential Input Voltage	V _{ID}	±30	±30	V
Input Voltage Range (Note 1)	V _{IDR}	±15	±15	V
Output Short-Circuit Duration (Note 2)	t _S	Continuous		
Power Dissipation				
Plastic Package (N,P) Derate above T _A = +47°C	P _D T/θ _{JA}	— —	680 10	mW mW/°C
Ceramic Package (J, JG) Derate above T _A = +82°C	P _D T/θ _{JA}	680 10	680 10	mW mW/°C
Operating Ambient Temperature Range	T _A	-55 to +125	0 to +70	°C
Storage Temperature Range	T _{stg}	-65 to +150	-65 to +150	°C

NOTES: 1. The magnitude of the input voltage must not exceed the magnitude of the supply voltage or 15 volts, whichever is less.
2. The output may be shorted to ground or either supply. Temperature and/or supply voltages must be limited to ensure that power dissipation ratings are not exceeded.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_{CC} = +15 V, V_{EE} = -15 V, T_A = +25° unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	TL07_M			TL07_C TL07_AC TL07_BC			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage (R _S < 10 k, V _{CM} = 0) TL071, TL072 TL074 TL07_A TL07_B	V _{IO}	—	3.0	6.0	—	3.0	10	mV
Average Temperature Coefficient of Input Offset Voltage R _S = 50 Ω; T _A = T _{low} to T _{high} (Note 3)	ΔV _{IO} /ΔT	—	10	—	—	10	—	μV/°C
Input Offset Current (V _{CM} = 0) (Note 4) TL07_— TL07_A, TL07_B	I _{IO}	—	5.0	50	—	5.0	50	pA
Input Bias Current (V _{CM} = 0) (Note 4) TL07_— TL07_A, TL07_B	I _{IB}	—	30	200	—	30	200	pA
Input Resistance	r _i	—	10 ¹²	—	—	10 ¹²	—	Ω
Common Mode Input Voltage Range TL07_— TL07_A, TL07_B	V _{ICR}	±11	+15, -12	—	±10	+15, -12	—	V
Large-Signal Voltage Gain (V _O = ±10 V, R _L ≥ 2.0 k) TL07_— TL07_A, TL07_B	A _{VOL}	35	150	—	25	150	—	V/mV
Output Voltage Swing (Peak-to-Peak) (R _L = 10 k)	V _O	24	28	—	24	28	—	V
Common Mode Rejection Ratio (R _S < 10 k) TL07_— TL07_A, TL07_B	CMRR	80	100	—	70	100	—	dB
Supply Voltage Rejection Ratio (R _S < 10 k) TL07_— TL07_A, TL07_B	PSRR	80	100	—	70	100	—	dB
Supply Current (Each Amplifier)	I _D	—	1.4	2.5	—	1.4	2.5	mA
Unity Gain Bandwidth	BW	—	4.0	—	—	4.0	—	MHz
Slew Rate (See Figure 1) V _{in} = 10 V, R _L = 2.0 k, C _L = 100 pF	SR	10	13	—	—	13	—	V/μs

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_{CC} = +15 V, V_{EE} = -15 V, I_A = I_B = 0 unless otherwise noted)

Characteristics	Symbol	TL07_M			TL07_C TL07_AC TL07_BC			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Rise Time (See Figure 1)	t _r	—	0.1	—	—	0.1	—	μs
Overshoot Factor V _{in} = 20 mV, R _L = 2.0 k, C _L = 100 pF	—	—	10	—	—	10	—	%
Equivalent Input Noise Voltage R _S = 100 Ω, f = 1000 Hz	e _n	—	18	—	—	18	—	nV/√Hz
Equivalent Input Noise Current R _S = 100 Ω, f = 1000 Hz	i _n	—	0.01	—	—	0.01	—	pA/√Hz
Total Harmonic Distortion V _O (RMS) = 10 V, R _S = 1.0 k R _L ≥ 2.0 k, f = 1000 Hz	THD	—	0.01	—	—	0.01	—	%
Channel Separation A _v = 100	—	—	120	—	—	120	—	dB

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_{CC} = +15 V, V_{EE} = -15 V, T_A = T_{high} to T_{low} [Note 3])

Characteristics	Symbol	TL07_M			TL07_C TL07_AC TL07_BC			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage (R _S = 10 k, V _{CM} = 0) TL071, TL072 TL074 TL07_A TL07_B	V _{IO}	—	—	8.0 18	—	—	18 18 2.5 5.0	mV
Input Offset Current (V _{CM} = 0) (Note 4) TL07_A, TL07_B	I _{IO}	—	—	30	—	—	2.0 2.0	nA
Input Bias Current (V _{CM} = 0) (Note 4) TL07_A, TL07_B	I _B	—	—	80	—	—	7.0 7.0	nA
Large-Signal Voltage Gain (V _O = ±10 V, R _L ≥ 2.0 k) TL07_A, TL07_B	A _{VOL}	20	—	—	18 25	—	— —	V/mV
Output Voltage Swing (Peak-to-Peak) (R _L ≥ 10 k) (R _L ≥ 2.0 k)	V _O	24 20	—	—	24 20	—	— —	V

NOTES (Continued):

3. T_{low} = -55°C for TL071M, TL072M, TL074M T_{high} = +125°C for TL071M, TL072M, TL074M
 = 0°C for TL071C, TL071AC, TL071BC = +70°C for TL071C, TL071AC, TL071BC
 TL072C, TL072AC, TL072BC TL072C, TL072AC, TL072BC
 TL074C, TL074AC TL074C, TL074AC

4. Input Bias currents of JFET input op amps approximately double for every 10°C rise in Junction Temperature as shown in Figure 3. To maintain Junction Temperature as close to ambient temperatures as possible, pulse techniques must be used during test.

TEST CIRCUITS

FIGURE 1 — UNITY GAIN VOLTAGE FOLLOWER

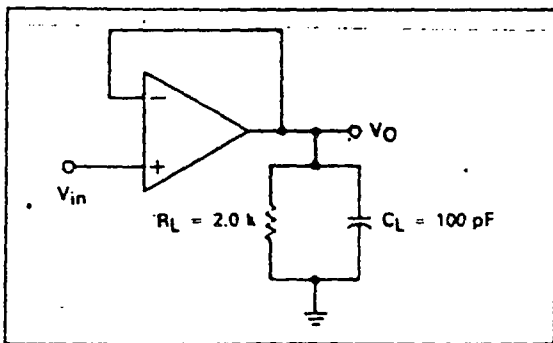


FIGURE 2 — INVERTING GAIN OF 10 AMPLIFIER

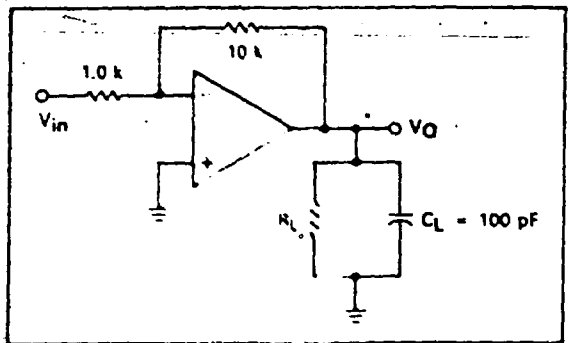


FIGURE 3 — INPUT BIAS CURRENT
versus TEMPERATURE

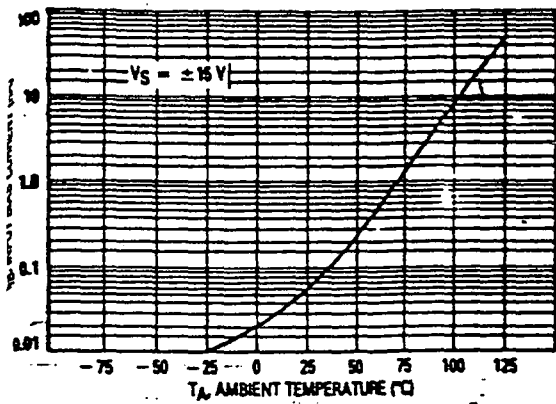


FIGURE 4 — OUTPUT VOLTAGE SWING
versus FREQUENCY

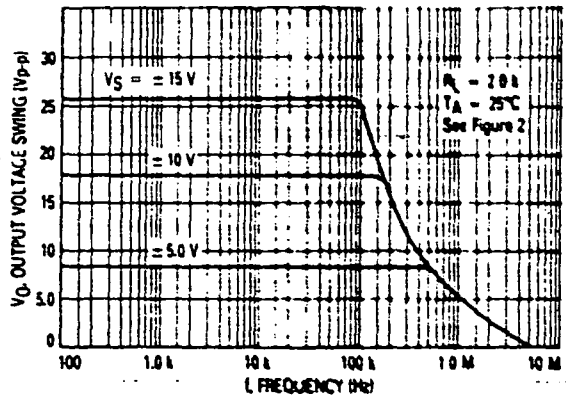


FIGURE 5 — OUTPUT VOLTAGE SWING
versus LOAD RESISTANCE

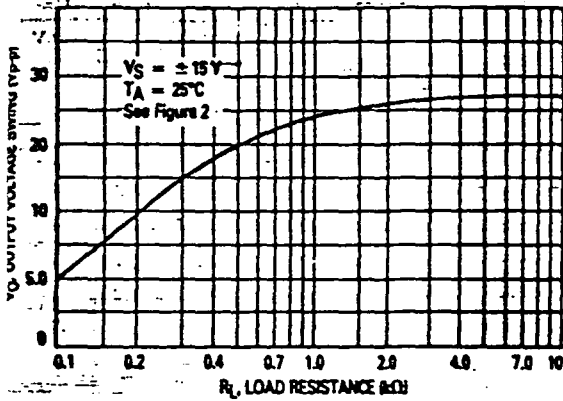


FIGURE 6 — OUTPUT VOLTAGE SWING
versus SUPPLY VOLTAGE

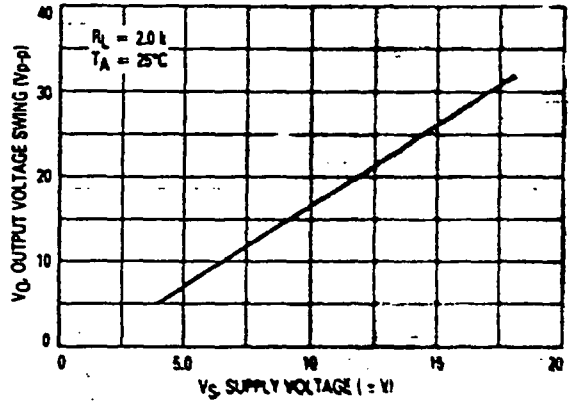


FIGURE 7 — OUTPUT VOLTAGE SWING
versus TEMPERATURE

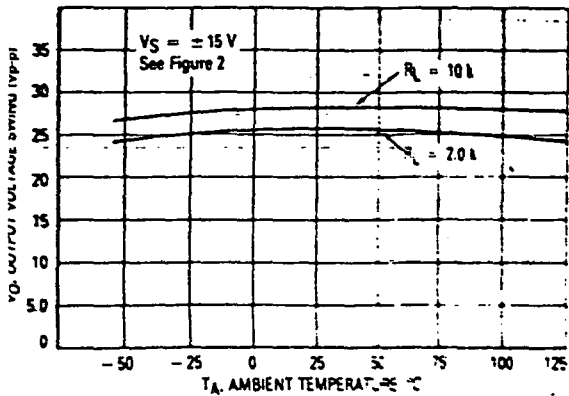
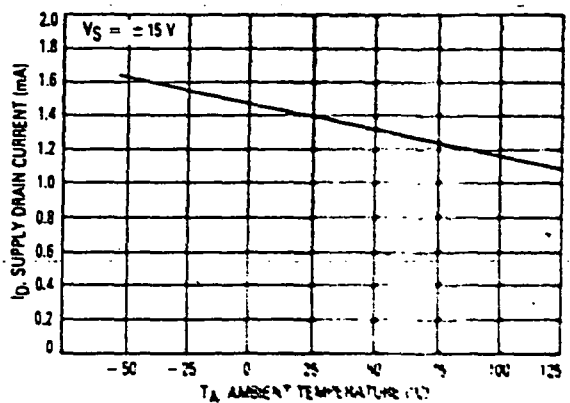


FIGURE 8 — SUPPLY CURRENT PER AMPLIFIER
versus TEMPERATURE



MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES

FIGURE 9 — LARGE-SIGNAL VOLTAGE GAIN AND PHASE SHIFT versus FREQUENCY

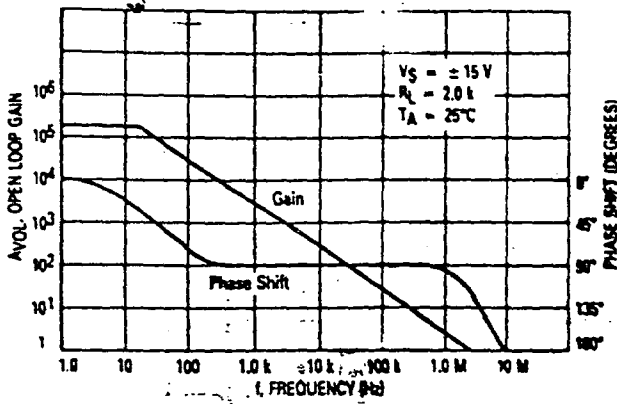


FIGURE 10 — LARGE-SIGNAL VOLTAGE GAIN versus TEMPERATURE

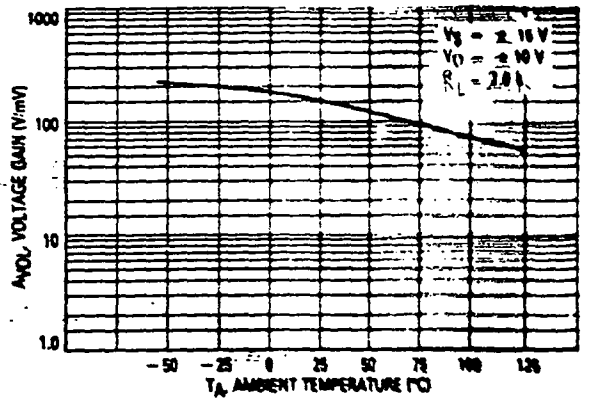


FIGURE 11 — NORMALIZED SLEW RATE versus TEMPERATURE

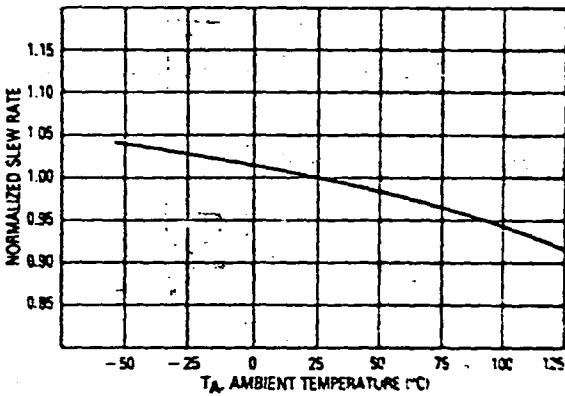


FIGURE 12 — EQUIVALENT INPUT NOISE VOLTAGE versus FREQUENCY

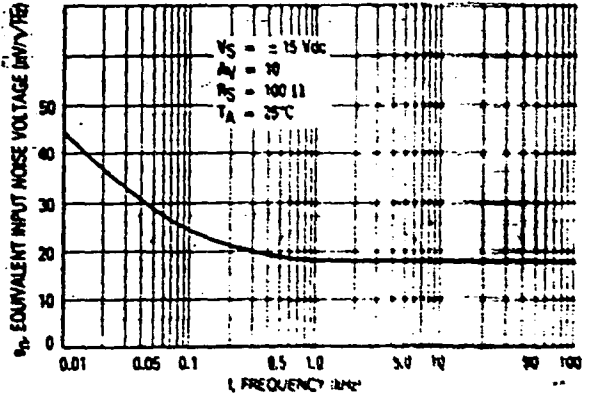
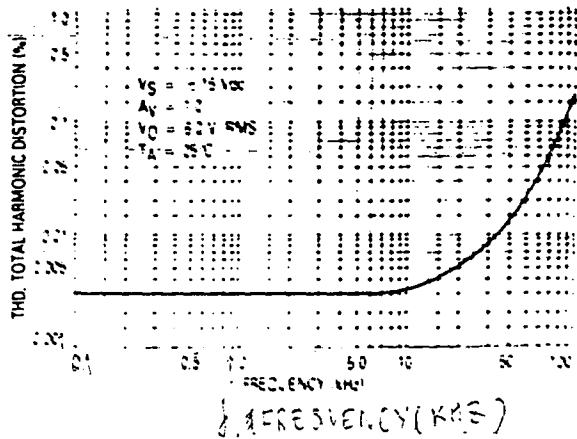


FIGURE 13 — TOTAL HARMONIC DISTORTION versus FREQUENCY



$V_S = \pm 15Vdc$
 $A_V = 1.0$
 $V_O = \pm 10V (RMS)$
 $T_A = 25^\circ C$

REPRESENTATIVE CIRCUIT SCHEMATIC
(Each Amplifier)

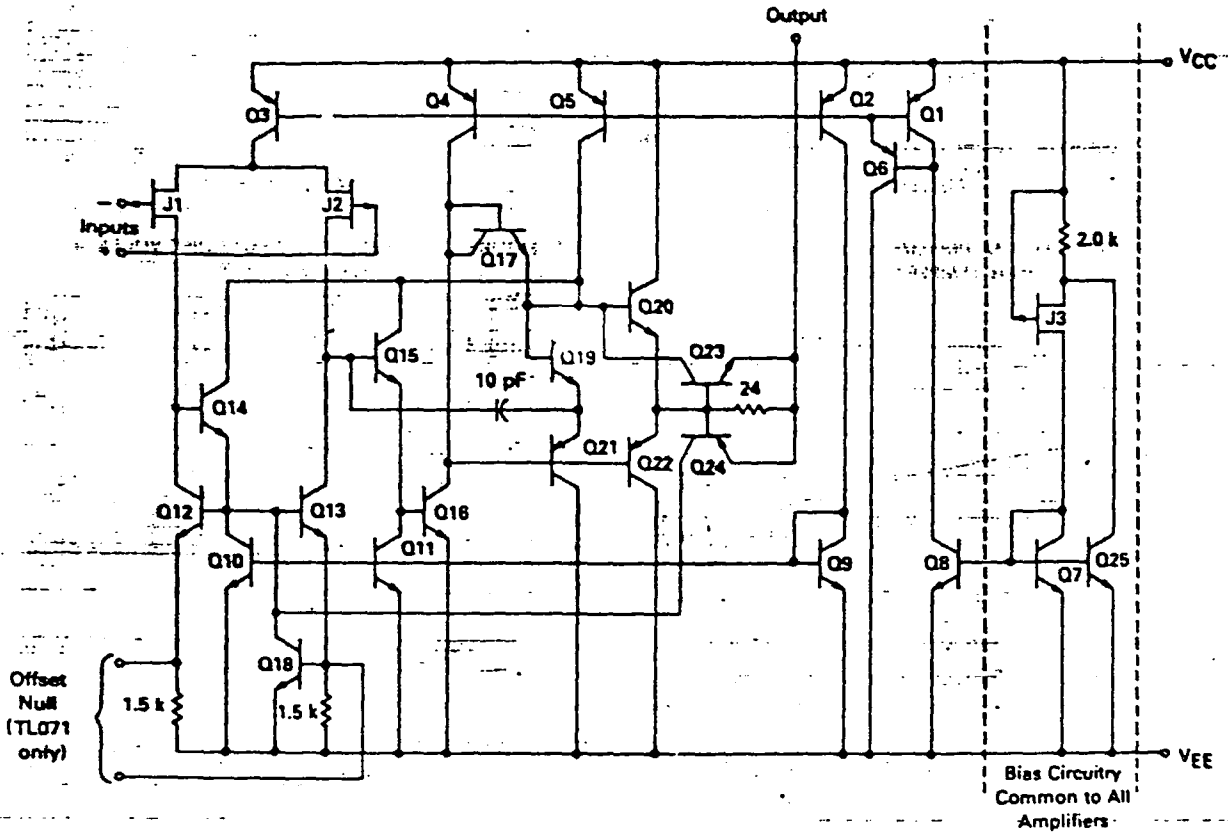


FIGURE 14 — AUDIO TONE CONTROL AMPLIFIER

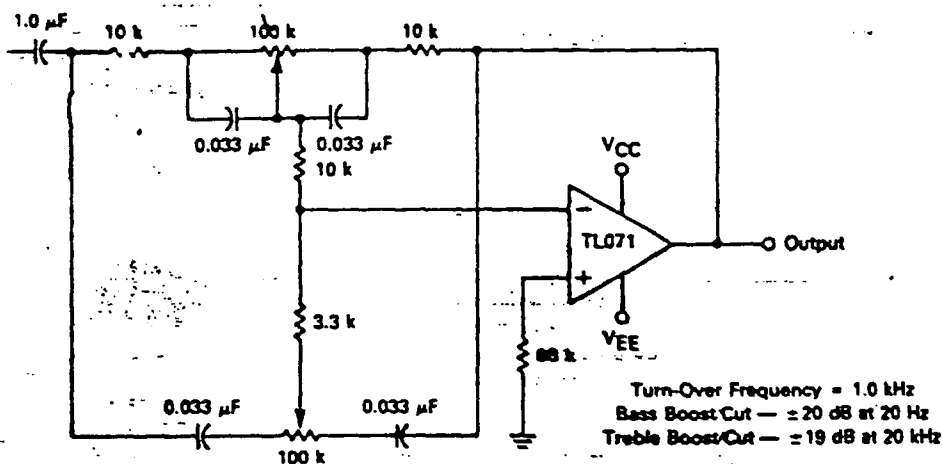
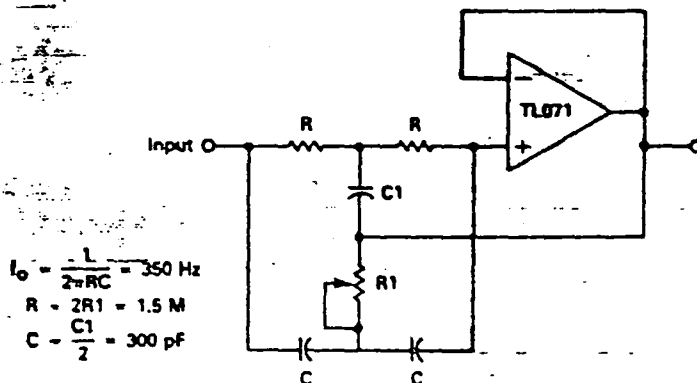


FIGURE 15 — HIGH Q NOTCH FILTER



CHARACTERISTICS OF LASER DIODES

A BRIEF DESCRIPTION OF LASER DIODES

Laser diodes are similar in many ways to light emitting diodes (LED's). Laser diodes emit very intense coherent light at only a few discrete wavelengths, whereas LED's emit broadband incoherent light over a relatively wide spectral range. Figure 1 shows a sketch of a Power versus Current curve for an LED and laser diode.

During the past decade, the unique advantages of laser diodes have found increasing commercial applications. They are now mass produced at very reasonable costs for use in such areas as audio and video disc players, laser pointers, laser printers, pumping solid-state lasers, fiber optic telecommunications and fiber optic instrumentation and sensors.

High power laser diode arrays and the new 660 nm "red" laser diodes now rival gas lasers in many applications. Laser diodes are much smaller, use less power, are highly reliable and are capable of many hundreds of thousands of hours of trouble-free operation. Advanced laser diodes such as the distributed feedback (DFB) narrow linewidth devices are finding applications in ultra high speed coherent fiber optic communications. Also, continuing research in new laser diode structures, such as grating surface emitting units, promise additional novel developments and new uses for this elegant technology.

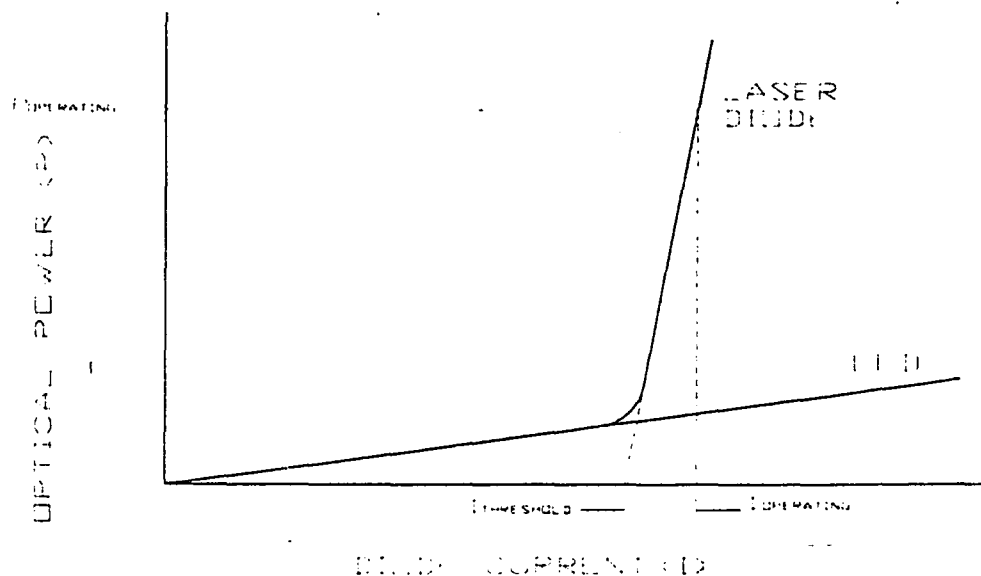


Figure 1. Sketch of Power-Current Curve for an LED and Laser Diode.

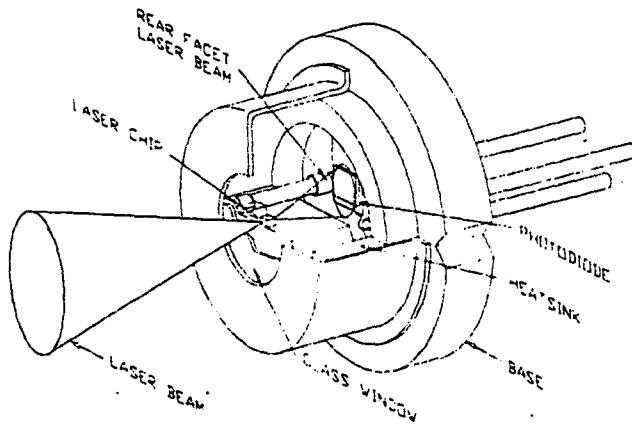


Figure 2. Cut-away view of a typical laser diode mounted in a protective hermetically sealed can. The heat sink serves as one of the electrical contacts.

LASER DIODE CONSTRUCTION

There are many shapes and sizes of commercial laser diodes available. Figure 2 illustrates a mass produced hermetically sealed laser diode in a standard TO package. Figure 3 shows the laser diode structure.

Most laser diodes also include a "back facet" photodiode. Since the laser diode beam emits light from both the front and back facets, it is convenient to monitor the light output from the back facet to regulate the front facet output power using optical feedback electronics.

The electrical connections used with commercial TO packaged laser diodes varies between manufacturers and even between laser diodes made by the same manufacturer. Figure 4 illustrates the most common 3-pin configurations.

There are some laser diodes that have 4 pins - two for the laser diode and two separate ones for the photodiode. These devices are only used in a few specialized applications.

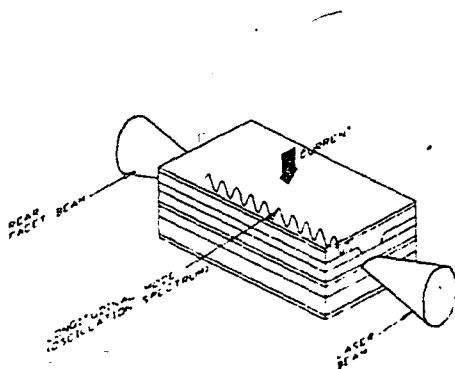


Figure 3. Sketch of a simple laser chip.

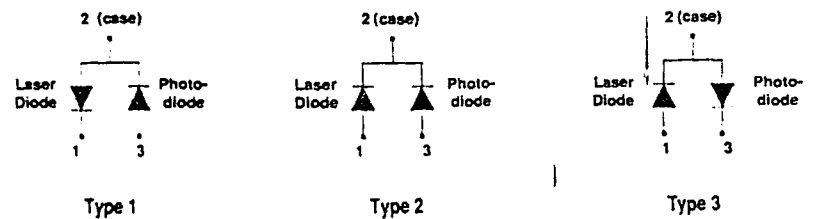


Figure 4. Commonly used laser diode and photodiode electrical connections.

LASER DIODE OPERATING PRINCIPLES

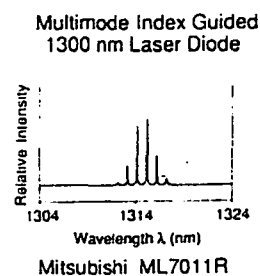
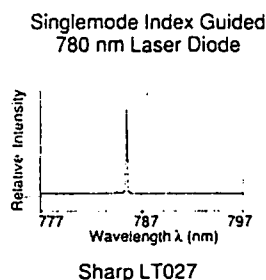
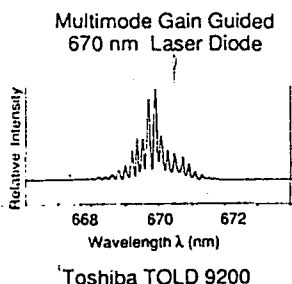
Most laser chips are formed from semiconductor alloys such as GaAlAs (Gallium Aluminum Arsenide) and InGaAsP (Indium Gallium Arsenide Phosphide). In both cases, the atomic ratio is varied to produce the p and n-type semiconductor layers necessary to produce a p-n junction diode capable of giving rise to laser action.

When current flows across the "active" p-n interface, large numbers of electrical carriers (holes and electrons) recombine, releasing energy in the form of photons (light). In an LED this occurs by a process called spontaneous emission producing photons with a broad range of energies (wavelengths). In a laser diode chip, the density of combining carriers is very high. There is a significant probability of a photon colliding with a carrier before spontaneous emission can occur. The carriers now release photons in a process called stimulated emission. In this process, a photon with a certain energy, direction of propagation, polarization, and phase, causes production of a second photon with identical properties. This amplification is the basis for all laser action. Both ends of the laser chip are smooth facets which have been cleaved or polished to act as mirrors, forming a Fabry-Perot laser cavity, or resonator. This type of optical cavity supports several standing waves with different wavelengths. These are termed the longitudinal modes of the laser. How-

ever, a laser diode will usually emit in only a few (often just one) of the longitudinal modes because the semiconductor alloy can only emit over a narrow wavelength range as defined by its band gap energy. The output also depends on the device design (architecture).

Various designs have been employed to improve laser diode efficiency. Improving device efficiency is highly desirable since it leads to lower threshold and normal operating currents. This in turn increases device longevity by reducing the heat generated within the chip. Efficiency can be improved by increasing the carrier and/or photon densities within a given active region, i.e. by "squeezing" carriers and photons into a relatively small lasing region. In **gain guided** laser diodes, carriers are confined by a potential gradient defined by a narrow electrical contact. In **index guided** lasers, the photons are also confined by refractive index gradients, and these devices thus have higher efficiency. The most common type of index guided structure is the double heterojunction.

Typical short wavelength gain guided laser diodes (670 nm to 850 nm) output between 12 and 24 longitudinal modes, with a mode spacing of 0.2 nm. In contrast, long wavelength (1300 nm) index guided lasers typically output only 3 to 6 modes with a spacing of about 0.9 nm. A selection of output spectra are shown below.

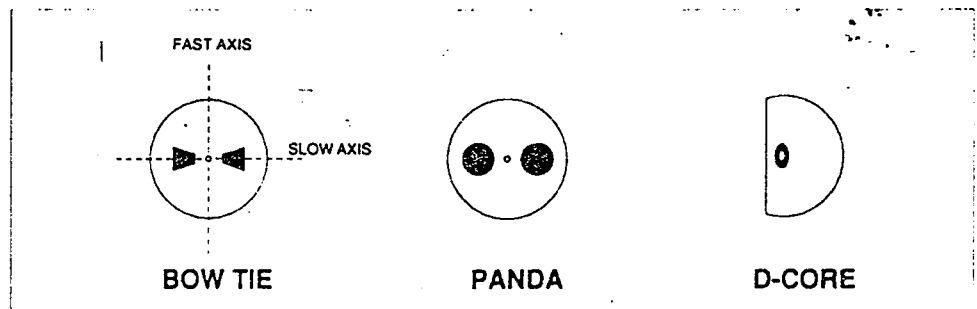


TYPES OF FIBERS

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 $\lambda_{\text{cut-off}} = 0.58 (a^2/v)$ to give:

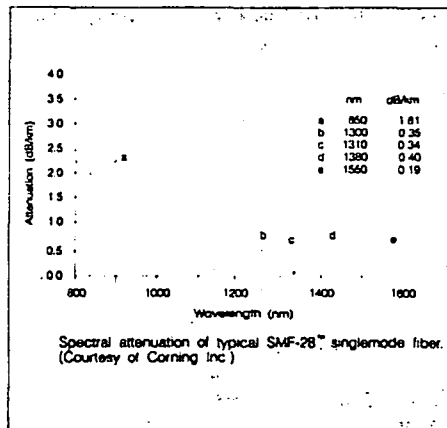
Wavelength	Approx. Core Diameter (2a)
670 nm	3.0 μm
780-850 nm	5.0 μm
1,300 nm	9.0 μm
1,550 nm	10.0 μm

- 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:

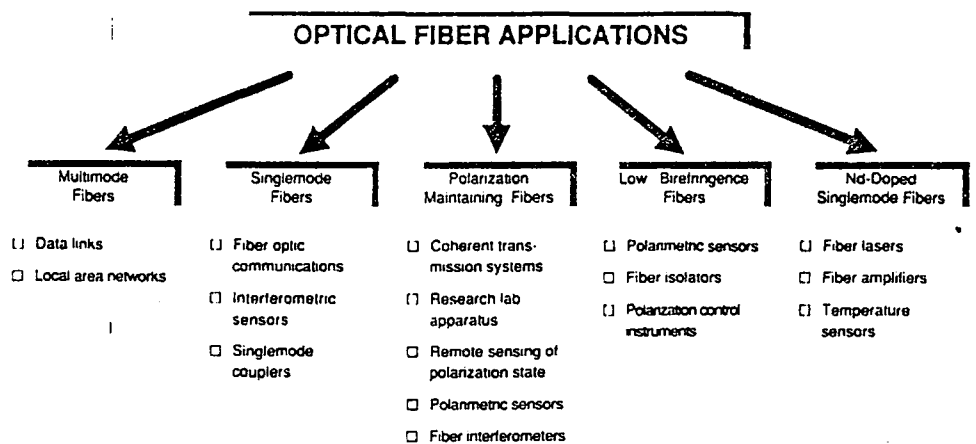
$$P(z) = P_0 \exp(-\alpha z)$$

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)

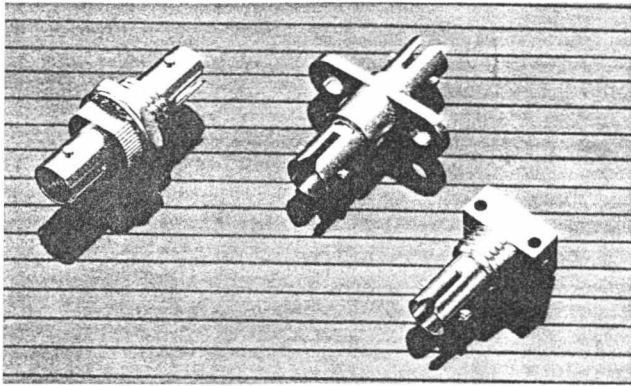
The graph below shows the typical attenuation for a singlemode fiber.



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



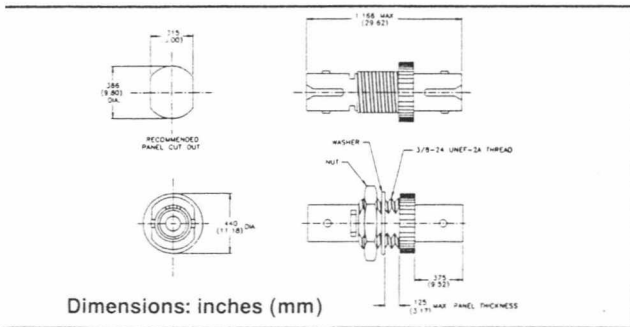
08 Series ST[®] Style Couplings and Receptacles



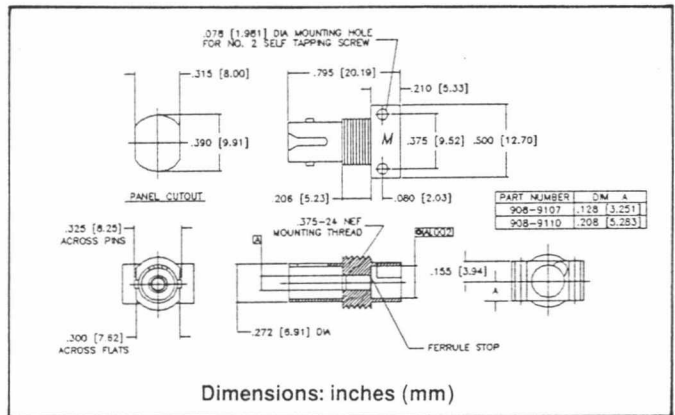
Methode Couplings are available in single mode and multimode formats. Single mode couplings employ a precision zirconia alignment sleeve and multimode couplings utilize a precision polymer alignment sleeve. Threaded couplings also include a panel nut and lock washer.

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.

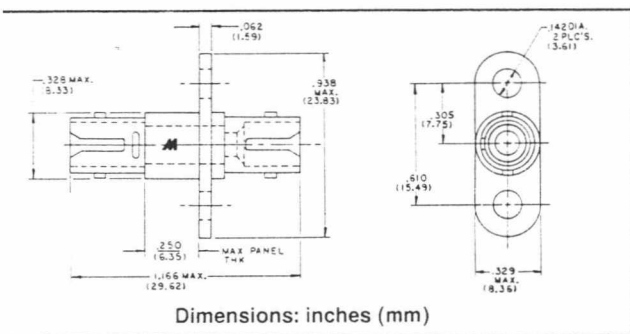
Threaded Coupling



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 MEFE Fax: 8614777

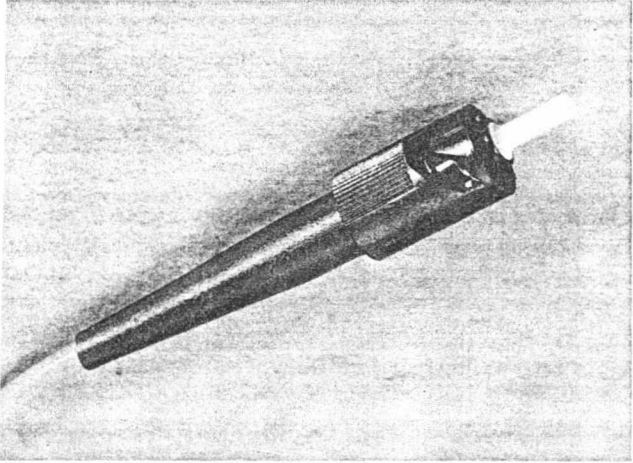
7444 West Wilson Avenue • Chicago, IL 60656
708/867-9600 • 800/323/6858 • FAX: 708/867-9130

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.

08 Series MST (ST® Style) Fiber Optic Connectors



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)

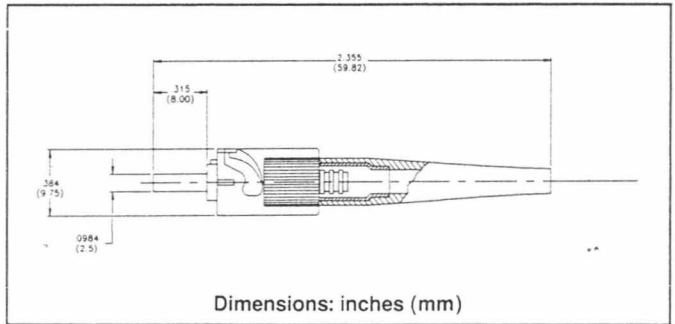
- ☐ Connector Termination Kit (US): 900-118-3010
- ☐ Connector Termination Kit, 220V: 900-118-3014
- ☐ Connector Polishing Disk: 900-118-9002
- ☐ Termination Video Tape (US): 900-118-9004
- ☐ Termination Video Tape (European): 900-118-9005

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.



- ☐ 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	-40 to +85	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

APPENDIX

A

Acceptance Angle

The half-angle of the cone within which all incident light is totally reflected by the fiber core. For graded index fibers, acceptance angle is a function of position on the entrance face of the core.

Adapter

In fiber optics, a device for coupling two connectors.

Adjustable Attenuator

An attenuator in which the level of attenuation is varied with an internal adjustment. Also known as Variable Attenuator.

Amplitude Modulation (AM)

A transmission technique in which the amplitude of the carrier is varied in accordance with the signal.

Analog

Any physical property indexed, controlled, or represented by another physical property capable of representing it accurately. Usually refers to a system that codes data by measuring voltages, rather than discrete signals (digitally).

Analog-to-Digital Converter

A device that converts an analog signal, that is, a signal in the form of a continuously variable voltage or current, to a digital signal, in the form of bits .

Angle of Incidence

The angle between an incident ray and the normal to a reflecting

or refracting surface. See also: Critical Angle; Total Internal Reflection

Angle of Refraction

The angle formed between a refracted ray and the normal to the surface. This angle lies in a common plane with the angle of incidence.

ASCII(American Standard Code for Information Interchange)

A system used to represent letters, numbers, symbols and punctuation as bytes of binary signals (ones and zeros).

Async

A mode of data transmission wherein the occurrence of each character is not related to a fixed time frame of reference. Compare with synchronous transmission.

Asynchronous Transmission

A mode of data transmission where by each bit of information is generated separately with some stop/start code to indicate the interval between bits.

Attenuator

An electronic transducer, either fixed or adjustable, that reduces the amplitude of a wave without causing significant distortion.

Average wavelength

The average of the two wavelengths for which the peak optical power has dropped to half.

B

Backscattering

That portion of scattered light which returns in a direction generally reverse to the direction of propagation.

Bandwidth

The range of frequencies handled by a device or system.

Baseband

A method of communication in which a signal is transmitted at its original frequency without being impressed on a carrier.

Baud

A unit of signaling speed equal to the number of signal symbols per second, which may or may not be equal to the data rate in bits per second.

Bend Loss

A form of increased attenuation in a fiber that results from bending a fiber around a restrictive curvature (a macrobend) or from minute distortions in the fiber (microbends)

Bit Error Rate (BER)

In digital applications it is the ratio of bits received in error to bits sent. BERs of 10^{-10} (one error bit to a billion sent) are common.

Bit Rate

The number of bits of data transmitted over a phone line per second. You can usually figure how many characters per second you will be transmitting, in synchronous communications, if you

divide the bit rate by ten. The total bits transmitted will depend on re-transmissions, which depends on the noise of the line

Broadband

A method of communication in which the signal is transmitted by being impressed on a higher-frequency carrier.

Bus

Wiring or cables that carry signals around inside a computer, or between computers and other devices.

Bypass

The ability of a station to isolate itself optically from a network while maintaining the continuity of the cable plant.

C

Cable Bend Radius

Cable bend radius during installation infers that the cable is experiencing a tensile load. Free bend infers a lower allowable bend radius since it is at a condition of no load.

Carrier Frequency

The electromagnetic wave frequency selected to transmit information. Optical carrier frequency is from the infrared, visible or ultraviolet spectrum areas (10^{12} Hz and above).

Center Wavelength (Laser)

The nominal value central operating wavelength defined by a peak mode measurement where the effective optical power resides.

Central Wavelength (LED)

The average of the two wavelengths measured at the half amplitude points of the power spectrum.

Channel

A communications path or the signal sent over a channel. Through multiplexing several channels, voice channels can be transmitted over an optical channel.

Cladding

A low-refractive-index, glass or plastic that surrounds the core of a fiber. Optical cladding promotes total internal reflection for the propagation of light in a fiber.

Cladding Mode

A mode confined to the cladding; a light ray that propagates in the cladding.

Coating

A material put on a fiber during the drawing process to protect it from the environment.

Coder

Digital information transformed into pulses of electricity, digitized as ones and zeros with no errors.

Collimator

An optical instrument consisting of a well-corrected objective lens with an illuminated slit or reticle at its focal plane. Collimators are used in lens testing to determine focal lengths, and in other metrological applications where a distant object at a known location is required.

Compression Utilities

Applications that squeeze data into smaller files by coding them into special formats or algorithms that take less space.

Conduit

Pipe or tubing through which cables can be pulled or housed.

Connector

A junction which allows an optical fiber or cable to be repeatedly connected or disconnected to a device such as a source or detector.

Connector Return Loss

the amount of power reflected from the connector to connector interface. Return loss values are expressed as dB. A typical specification could range from -15 to -60 dB, where, in most cases, -60 is more desirable.

Connector Variation

The maximum value in dB of the difference in insertion loss between mating optical connectors. Also known as Optical Connector Variation.

Combiner

A measure of the displacement of the center of the core relative to the cladding center.

Core

The light conducting portion of a fiber, defined by its high refractive index. The core is normally in the center of a fiber, bounded by concentric cladding of lower refractive index.

Coupler

A device whose purpose is to distribute optical power among two or more ports, or to concentrate optical power from two or more fibers into a single port. Couplers may be active or passive.

Coupling Efficiency

The efficiency of optical power transfer between two components.

Critical Angle

The smallest angle at which a meridional ray may be totally reflected within a fiber at the core-cladding interface. When light propagates in a homogeneous medium of relatively high refractive index (n_1) onto an interface with a homogeneous material of lower index (n_2)

Crosstalk

The phenomenon of light leakage or information transfer from a waveguide to one adjacent.

Cutoff Wavelength

For a single mode fiber, the wavelength above which the fiber exhibits single mode operation.

CW

Abbreviation for continuous wave. Usually used to refer to the constant optical output from an optical source when it is biased but not modulated with a signal.

D

Dark Current

The external current that under specified biasing conditions,

flows in a photodetector when there is no incident radiation.

Data Bus

A system incorporated into fiber optic data communications characterized by several spatially distributed terminals that are served with the same multiplexed signal.

Data Compression

Storing of digital data with techniques that consume less memory space than basic methods.

Data Rate

The maximum number of bits of information which can be transmitted per second, as in a data transmission link; typically expressed as megabits per second (Mb/s).

Decibel (dB)

The standard unit used to express gain or loss of optical power. A standard logarithmic unit for the ratio of two powers, voltages or currents. In fiber optics, the ratio is power.

Decoding

Validity checking of received transmission characters and generation of valid data bytes and special codes from those characters.

Detector

A transducer that provides an electrical output signal in response to an incident optical signal. The current is dependent on the amount of light received and the type of device.

Diameter-Mismatch Loss

The loss of power at a joint that occurs when the transmitting half has a diameter greater than the diameter of the receiving half. The loss occurs when coupling light from a source to fiber to fiber, or from fiber to detector.

Diffraction

As a wavefront of light passes by an opaque edge or through an opening, secondary weaker wavefronts are generated, apparently originating at that edge. These secondary as well as with each other to form various diffraction patterns.

Digital

A data format that uses discrete or separate physical levels to contain information.

Dispersion

The cause of bandwidth limitations in a fiber. Dispersion causes a broadening of input pulses along the length of the fiber. The major types are: mode dispersion caused by differential optical path lengths in a multimode fiber and material dispersion caused by a differential delay of various wavelengths of light in a waveguide material.

Duplex transmission

Transmission in both directions, either one direction at a time (half duplex) or both directions simultaneously (full duplex).

Duty Cycle

In a digital transmission, the ratio of high levels to low levels.

E

Encoding

Generation of the transmission characters from valid data bytes and special codes.

Excess Loss

In a fiber optic coupler, the optical loss from that position of light that does not emerge from the nominally operational ports of the device.

Extrinsic Loss

In a fiber interconnection, that portion of loss that is not intrinsic to the fiber but is related to imperfect joining, which may be caused by the connector or splice. Contributors include angular misalignment, axial misalignment, end separation, and end finish. Generally synonymous with insertion loss.

F

Fall Time

The time required for the trailing edge of a pulse to fall from 90% to 10% of its amplitude; the time required for a component to produce such a result. "Turnoff time." Sometimes measured between the 80% and 20% points.

Fiber Buffer

Material used to protect an optical fiber or cable from physical damage, providing mechanical isolation or protection. Fabrication techniques include both tight jacket or loose tube buffering as well as multiple buffer layers.

Fiber Core

The inner portion of the fiber that transmits light. The index of refraction is higher than that of the cladding that surrounds it.

Fiber Optic Attenuator

A component that is installed in a fiber optic transmission system to reduce the power in the optical signal. It is often used to limit the optical power received by the photodetector to within the limits of the optical receiver.

Fiber Optic communication System

The transfer of modulated or unmodulated optical energy through optical fiber media which terminates in the same or different media.

Fiber Optic Link

Any optical transmission channel designed to connect two end terminals or to be connected in series with other channels.

Footprint

1. In an electronic package, the amount of space occupied by a component on the surface upon which it is mounted. 2. the space on an optical component occupied by a light beam.

Free-Space Optical Interconnect

A type of internal photonic connection in an integrated circuit in which a holographic grating is used to focus light at points on a silicon chip, maximizing the speed of signal propagation.

Frequency-Division Multiplexing (FDM)

A system that allows the transmission of more than one signal over a common path, by assigning each signal a different

frequency band.

Frequency Modulation (FM)

A method of transmission in which the carrier frequency varies in accordance with the signal.

Fundamental Mode

The lowest order mode of a waveguide.

Fusion Splice

A splice accomplished by the application of localized heat sufficient to fuse or melt the ends of two lengths of optical fiber, forming a continuous single fiber.

G

Gateway

Relay at any layer above the network layer.

Graded-index Fiber

An optical fiber whose core has a nonuniform index of refraction. The core is composed of concentric rings of glass whose refractive indices decrease from the center axis. The refractive index is changed in a systematic way from the center to the edges to decrease modal dispersion.

H

Harmonic Distortion

Interference resulting from some type of harmonic signal, measured in decibels (dB).

I

Index Matching Material

A material, often a liquid or a cement, whose refractive index is nearly equal to the core index, used to reduce Fresnel reflections from an optical fiber's end face.

Index of Refraction

The ratio of the velocity of light in a vacuum to the velocity of light in a given medium.

Insertion Loss

Total optical power loss caused by insertion of an optical component such as a connector, splice, or coupler into a previously continuous path.

I/O application

The device used to insert information, data or instructions into a computing system, or the device used to transfer information or data, usually processed data from a computing system to the external world. Input/output also refers to the act of entering or retrieving information.

ISDN

(Integrated Services Digital Network) A standard protocol (format) for digital telecommunications transmissions. ISDN is an international standard for transmitting digital information

J

Junction

The intersection of three or more bundles from different

directions in a harness assembly.

K

KPSI

Tensile strength in thousands of pounds per square inch.

L

Laser Modulation

Turning the laser on and off.

Launch Angle

The angle between the light ray and the optical axis of an optical fiber bundle.

Launch Fiber

An optical fiber used to couple and condition light from an optical source into an optical fiber. Often the launch fiber is used to create an equilibrium modal distribution in multimode fiber. Also referred to as Launching Fiber.

Light

1. In a strict sense, the visible spectrum nominally covering the wavelength range of 400 nm to 750 nm. 2. In laser and optical communications fields, the much broader portion of the electromagnetic spectrum that can be handled by the basic optical techniques used for the visible spectrum extending from the near-ultraviolet region of approximately 0.3 micrometers through the visible region and into the mid-infrared region to 30 micrometers.

Light Diffusion

The scattering of light by reflection or transmission. Diffuse reflection results when light strikes an irregular surface such as frosted window or the surface of a frosted or coated light bulb.

Light Emitting Diode (LED)

A semiconductor device which emits incoherent light from a p-n junction (when biased with an electrical current). Light may exit from the junction strip edge or from its surface (depending on the device's structure.).

Link

A fiber optic cable with connectors attached to a transmitter (source) and receiver (detector).

Local Area Network (LAN)

A geographically limited network interconnecting electronic equipment.

Longitudinal Mode

An optical waveguide mode with boundary conditions determined along the length of the optical cavity.

M

MAN

Metropolitan Area Network linking LAN's and other networks at many sites within a city area.

Material Dispersion

Light impulse broadening caused by various wavelengths of light traveling at differing velocities through a fiber. Material

dispersion increases with the increasing spectral width of the source.

Mechanical Splicing

Joining two fibers together by mechanical means to enable a continuous signal. Elastomeric splicing is one example of mechanical splicing.

Misalignment Loss

The loss of power resulting from angular misalignment, lateral displacement and end separation.

Modal Dispersion

Term for multimode dispersion, which is pulse broadening due to optical power running via different waveguide modes.

Mode

In any cavity or transmission line, one of those electromagnetic field distributions that satisfies Maxwell's equations and boundary conditions. The field pattern of a mode depends on the wavelength, refractive index and cavity or waveguide geometry.

Modem

Short for modulator-demodulator; a device that converts audio tones of an analog telephone system to digital pulses and vice versa, suitable for data communications through an analog telephone data network.

Modulation

1. The process by which the characteristic of one wave (the carrier) is modified by another wave (the signal). Examples include amplitude modulation (AM), frequency modulation (FM),

and pulse-coded modulation (PCM). 2. Electrical switch to control the light source.

Multimode Distortion

In a multimode optical fiber, the pulse distortion resulting from differential mode propagation rates.

Multimode Fiber

A fiber that supports propagation of more than one mode.

Multiplexing

The process by which two or more signals are transmitted over a single communications channel. Examples include time-division multiplexing and wavelength-division multiplexing.

N

NA-mismatch Loss

The loss of power at a joint that occurs when the transmitting half has numerical aperture greater than the NA of the receiving half. The loss occurs when coupling light from a source to fiber to detector.

Narrowband

Refers to analog or voice-band data rates or transmission

Node

In a communications network, a point at which data is received or from which it is sent. Though the term is often used synonymously with workstations, interconnection points in a network are also called nodes.

Numerical Aperture (NA)

The "lightgathering ability" of a fiber, defining the maximum angle to the fiber axis at which light will be accepted and propagated through the fiber. $NA = \sin\theta$, where θ is the acceptance angle. NA also is used to describe the angular spread of light from a central axis, as in exiting a fiber, emitting from a source, or entering a detector. For multimode fiber, the numerical aperture usually ranges from .2 to approximately .5. Singlemode fiber generally has a numerical aperture on the order of .1.



Optical Bandpass

The range of optical wavelengths which can be transmitted through a component.

Optical Channel

An optical wavelength band for wavelength division multiplexing optical communications.

Optical Isolator

A component used to block out reflected and other unwanted light.

Optical Link

Any optical transmission channel designed to connect two end terminals or to be connected in series with other channels. (EIA)

Optical Time Domain Reflectometer (OTDR)

A method of characterizing a fiber and the resulting backscatter and reflections are measured as a function of time. Useful in estimating attenuation coefficient as a function of distance and

identifying defects and other localized losses.

Optical Waveguide

Dielectric waveguide with a core consisting of optically transparent material of low attenuation (usually silica glass) and with cladding consisting of optically transparent material of lower refractive index than that of the core. It is used for the transmission of signals with lightwaves and is frequently referred to as a fiber. In addition, there are some optical components, such as laser diodes, which are referred to as optical waveguides.

P

Packet

A group of binary digits, including data and call control signals, switched as a composite whole. The data, all control signals and possible error control information, are arranged in a specific format.

Peak Wavelength

The wavelength at which the optical power of a source is at maximum.

Photoconductivity

The conductivity increase exhibited by some nonmetallic materials resulting from the free carriers generated when photon energy is absorbed in electronic transitions.

Photocurrent

The current that flows through a photosensitive device as the result of exposure to radiant power.

Photodetector

An optoelectronic transducer, such as a pin photodiode or avalanche photodiode.

Photodiode

A two-electrode, radiation-sensitive junction formed in a semiconductor material in which the reverse current varies with illumination. Photodiodes are used for the detection of optical power and for the conversion of optical power to electrical power.

Photovoltaic Effect

Production of a voltage difference across a p-n junction resulting from the absorption of photon energy. The voltage difference is caused by internal drift of holes and electrons.

PIN Photodiode

A diode with a large intrinsic region sandwiched between p and n doped semiconducting regions. Photons absorbed in this region create electron-hole pairs that are separated by an electric field, thus generating electric current in a load circuit.

Point-to-point

A connection established between two specific locations, as between two buildings.

Polarization

The direction of the electric field in the lightwave.

Power Efficiency

The ratio of emitted optical power of a source to the electrical input power.

Pulse-Coded Modulation (PCM)

A technique in which an analog signal, such as a voice, is converted into a digital signal by sampling the signal's amplitude and expressing the different amplitudes as a binary number. The sampling rate must be twice the highest frequency in the signal.

Pulse Dispersion

The widening of an optical pulsed pulse as it travels the length of a fiber. This property limits the useful bandwidth of the fiber and is usually expressed in terms of nanoseconds of widening per kilometer. The principal mechanisms are material dispersion and multimode distortion effect.

Q

Quantum Efficiency

In a photodiode, the ratio of primary carriers (electron-hole pairs) created to incident photons. A quantum efficiency of 70% means 7 out of 10 incident photons create a carrier.

R

Radiation

The emission and/or propagation of energy through space or through a medium in the form of either waves or corpuscular emission.

Receiver Sensitivity

The minimum acceptable value of average received power at point R to achieve a 10⁻¹² bit error ratio. It takes into account power penalties caused by use of a transmitter with worst-case values of extinction ratio, jitter, pulse rise and fall times, optical

return loss at point S , receiver connector degradations , and measurement tolerances. The receiver sensitivity does not include power penalties associated with dispersion, jitter, or reflections from the optical path; these effects are specified separately in the allocation of maximum optical path penalty. Sensitivity takes into account worst-case operating and end-of-life (EOF) conditions.

Reflectance

The ratio of reflected power to incident power. Note; In optics, frequently expressed as optical density or as a percent; in communication applications, generally expressed in dB.

Reflection

The abrupt change in direction of a light beam at an interface between two dissimilar so that the light beam returns into the medium from which it originated.

Reflectometer

An instrument for measuring the reflectance of a surface.

Refraction

The bending of a beam of light at an interface between two dissimilar media or in a medium whose refractive index is a continuous function of position (graded-index medium).

Refractive Index (of a medium)

The ratio of the velocity of light in a vacuum to its velocity in the medium. Synonym: Index of Refraction.

Repeater

In an optical-fiber communication system, an optoelectronic

device or module that receives an optical signal, converts it to electrical form, amplifies it (or in the case of a digital signal, reshapes, retimes or otherwise reconstructs it) and retransmits it in optical form.

Responsivity

The ratio of an optical detector's electrical output to its optical input. The precise definition depends on the detector type; generally expressed in amperes per watt or volts per watt of incident optical power.

Ring Network

A network topology in which terminals are connected in a point-to-point serial fashion in an unbroken circular configuration.

S

Scattering

The change in direction of light rays or photons after striking a small particle or discontinuity. It may also be regarded as the diffusion of a light beam caused by the inhomogeneity of the transmitting medium.

Sensitivity

For a fiber optic receiver, the minimum optical power required to achieve a specified level of performance, such as bit error ratio.

Serial

Transmitting or processing data one bit at a time rather than many bits concurrently (parallel).

Shot Noise

Noise caused by random current fluctuations arising from the discrete nature of electrons.

Signal to Noise ratio (S/N,SNR)

The ratio of the received optical power, with full signal averaging, divided by the noise floor for the detector; the ratio of signal level to noise level, related to bit error ratio performance.

Single-line laser

Synonym for single-longitudinal mode laser.

Singlemode Fiber

An optical fiber that supports only one mode of light propagation above the cutoff wavelength.

Skew Ray

A ray that does not intersect the optical axis of a fiber (in contrast with a meridional ray).

Spectral Width

A measure of the extent of a spectrum. For a source, the width of wavelengths contained on the output at one half of the wavelength of peak power. Typical spectral widths are 20 to 60 nanometer for an LED and 2 to 5 nanometer for a laser diode.

Splicing

The permanent joining of fiber ends to identical or similar fibers, without the use of a connector.

Step-Index Fiber

An optical fiber, either multimode or single mode, in which the core refractive index is uniform throughout so that a sharp step in refractive index occurs at the core-to-cladding interface. It usually refers to a multimode fiber.

Sync

Data transmission in which the occurrence of each signal representing a bit is related to a fixed timeframe.

T

Thermal Noise

Noise resulting from thermally induced random fluctuation in current in the receiver's load resistance.

Time-Division Multiplex (TDM)

The process or device by which more than one signal can be sent over a single channel by using different time intervals for the different signals. This may be done by varying the pulse duration, pulse amplitude and pulse position.

Transmission Loss

Total loss encountered in transmission through a system.

Trunk

The main bundle of a harness assembly.

U

UTP to OF Converter

Unshielded twisted pair to fiber optic converter.

V

Virtual Connections (Header Connection Identifier)

Each Asynchronous Transfer Mode (ATM) cell contains a virtual connection identifier. Many virtual connections can be established over the same physical link, using a signaling protocol.

W

WAN (Wide Area Network)

A network of connected computers that covers a great geographical area.

Waveguide

A conducting or dielectric structure able to support and propagate one or more electromagnetic field patterns (modes).

Wavelength

The physical distance covered by one cycle of wave.

Z

Zirconium Arc

A small bulb containing a conducting gas, an arc being formed between a metal ring and a tiny zirconium electrode near the center of the ring. The heated zirconium emits light, and constitutes a convenient laboratory point source.

ประวัติผู้เขียน

นายพงษ์พันธ์ ศรีจิตติ เกิดเมื่อวันที่ 21 กรกฎาคม 2515 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จ การศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนพันธะศึกษา มัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนจันทร์หุ่น บำเพ็ญ สำเร็จระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้าเมื่อปีการ ศึกษา 2532 และเข้าศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษา ในสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ (โพลีเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์) คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตั้งแต่ ปีการศึกษา 2533 เลขประจำตัว 33504023

ประวัติการฝึกงาน

บริษัท จัสมินอินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ระหว่างวันที่ 1 เมษายน - 15 พฤษภาคม 2536 ผลงาน ติดตั้งและทดสอบระบบ Trunk Radio ณ ชุมสาย นครปฐม ออยุธยา หลักสี่ อินทามระ

นายจิปไตย ตัณฑ์ประพันธ์ เกิดเมื่อวันที่ 9 ตุลาคม 2516 ที่โรงพยาบาลเด็ก กรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา มัธยมศึกษาตอนต้น และมัธยมศึกษาปีที่ 5 จากโรงเรียน เซนต์คาเบรียลเมื่อปีการศึกษา 2532 และสอบเทียบได้ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก กศน. เมื่อปีการศึกษา 2532 และเข้าศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษา ในสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ (โพลีเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์) คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตั้งแต่ปีการศึกษา 2533 เลขประจำตัว 33504013

ประวัติการฝึกงาน

บริษัท จัสมินอินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ระหว่างวันที่ 1 เมษายน - 15 พฤษภาคม 2536
ผลงาน ติดตั้งและทดสอบระบบ Trunk Radio ณ ชุมสาย นครปฐม ออยุธยา หลักสี่
อินทามระ