

การมัลติเพล็กซ์ด้วยการแบ่งช่วงเวลา เพื่อส่งสัญญาณเคตา  
สำหรับการวัดและควบคุมผ่านใยนำแสง

TIME DIVISION MULTIPLEXED FIBER OPTIC DATA LINK



วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาโท  
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2529

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ii
สัญลักษณ์และความหมาย	iii
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 โยหน้าแสง	7
2.1 การสื่อสารด้วยโยหน้าแสง	7
2.2 คุณสมบัติโยหน้าแสง	13
2.3 คุณภาพสัญญาณเมื่อผ่านโยหน้าแสง	22
2.4 แหล่งกำเนิดแสง LED	30
2.5 ตัวรับสัญญาณแสง p-i-n	41
บทที่ 3 การจักรูปสัญญาณ	46
3.1 แบนควิตซ์	46
3.2 การมอดูเลตสัญญาณ	46
3.3 การมัลติเพล็กซ์	49
3.4 การนำระบบไปใช้ทดลอง	50
บทที่ 4 การออกแบบวงจร	51
4.1 แนวคิดในการออกแบบวงจร	51
4.2 เครื่องส่ง	52
4.3 เครื่องรับ	62
บทที่ 5 การทดสอบการทำงานของวงจร	75
5.1 คุณสมบัติเชิงเส้น และการรบกวนภายในช่องสัญญาณ	76
5.2 การรบกวนข้ามช่องสัญญาณ	82
บทที่ 6 สรุป	92
6.1 คุณภาพการใช้งาน	92
6.2 ข้อเสนอแนะ	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	96
เอกสารอ้างอิง	97
ภาคผนวก	
ภาคผนวก 1 เปรียบเทียบผลการทดลองกับวิธีอื่น	98
ภาคผนวก 2 ข้อมูลรุ่นต่าง ๆ ของการสื่อสารควายโยนนำแสง	103
ภาคผนวก 3 คุณสมบัติของ LM 331	104



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตารางประกอบ

ตารางที่	เรื่อง	หน้า
2.1	ช่วงความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืน เนื่องจาก OH	24
2.2	คุณสมบัติโยนนำแสงราคาถูก พวกแกนแก้วแคลดดิ้งพลาสติก และแกน และแคลดดิ้ง เป็นสารสังเคราะห์ทั้งหมด	29
5.1	ข้อมูลการทดสอบคุณสมบัติเชิงเส้น	78
5.2,5.3	คามีคผลากเทียบ OUTPUT กับ INPUT	79,80
5.4	วิธีการทดสอบการรบกวนข้ามช่องสัญญาณ	84
5.5,5.6,5.7,5.8	ข้อมูลการรบกวนข้ามช่องสัญญาณ	85-88
5.9	ข้อมูลการรบกวนข้ามช่องสัญญาณทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนทาง OUTPUT	89

## สารบัญภาพประกอบ

ภาพที่	เรื่อง	หน้า
2.1	บล็อกโคอะแกรมของระบบใยนำแสง	12
2.2	ส่วนประกอบของใยนำแสง	14
2.3	ใยนำแสงแบบต่าง ๆ การกระจายของครรชนหักเห และแนวการเคลื่อนที่ของลำแสง	15
2.4	ทางเดินของลำแสงจากตัวกลางที่มีครรชนหักเหมากสู่ตัวกลางที่มีครรชนหักเหน้อยกว่า	16
2.5	ทางเดินของแสงในใยนำแสงแบบชั้นบันได	17
2.6	แสงกระจายออกจากแหล่งกำเนิดแสงขนาดเล็ก	18
2.7	พลังงานแสงออกในหน่วยมมตัน	19
2.8	กราฟแสดงค่าการลดทอนของเนื้อแก้วบริสุทธิ์ และค่าการลดทอนของใยนำแสงราคาถูก	28
2.9	ลักษณะของลำแสงที่สามารถออกไปจากแหล่งกำเนิดแสง	32
2.10	วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการคับปลิงแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเข้าสู่ใยนำแสง	34
2.11	โครงสร้างของ LED สารเนื้อเคียวพลอยแสงออกจากผิวหน้าเข้าสู่ใยนำแสง	36
2.12	วงจรถัดเทียมของแหล่งกำเนิดแสง LED	37
2.13	โครงสร้าง LED หลายรอยต่อแบบชั้นคู่ โห้แสงออกจากผิวหน้าเข้าสู่ใยนำแสง	39
2.14	LED หลายรอยต่อแบบชั้นคู่ มีเลนส์ทรงกลมติดจากขบวนการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการคับปลิง	40
2.15	การไบอัส pin โฟโตไดโอด วงจรถัดเทียม และสถานะทางไฟฟ้าภายใน	43

ภาพที่	เรื่อง	หน้า
4.1	บล็อกไดอะแกรมเครื่องส่งเครื่องรับ	51
4.2	บล็อกไดอะแกรมรายละเอียดเครื่องส่ง	53
4.3	วงจรมัลติเพล็กซ์ของเครื่องส่ง	54
4.4	ลักษณะของพัลส์สำหรับเลือกช่องสัญญาณ	55
4.5	วงจรมอดูเลทสัญญาณทางไฟฟ้า แบบเปลี่ยนโวลเตจเป็นความถี่	56
4.6	วงจรถัดเทียมแสดงการทำงานของ LM 331	57
4.7	ลักษณะของพัลส์ จาก VFC และพัลส์ของช่องสัญญาณที่ใช้ซิงค์	58
4.8	สัญลักษณ์ของ X - NOR และตารางความจริง	59
4.9	วงจรมอดูเลททางแสง และการกลับขั้วแบบใช้หัวต่อเกลียว	61
4.10	บล็อกไดอะแกรมแสดงรายละเอียดเครื่องรับ	62
4.11	วงจรถ่ายสัญญาณแสงเป็นไฟฟ้า	64
4.12	ภาพถ่ายสัญญาณการเปลี่ยนกระแสเป็นโวลเตจสัญญาณที่ได้จากการขยาย และการเปรียบเทียบสัญญาณจากออสซิลโลสโคป	65
4.13	ระดับสัญญาณที่จุดต่าง ๆ ในวงจรถ่ายแสงเป็นไฟฟ้า	66
4.14	วงจรมอดูเลเตอร์ เปลี่ยนความถี่เป็นโวลเตจ กรองความถี่ต่ำผ่าน และจุดนำสัญญาณออกเพื่อแยกซิงค์	67
4.15	วงจรถองความถี่ต่ำผ่านและการเลือกค่า R-C	68
4.16	การแยกซิงค์ พัลส์ด้วย D-FLIP-FLOP	69
4.17	วงจรมัลติเพล็กซ์	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่	เรื่อง	หน้า
4.18	วงจรแยกช่องสัญญาณ และนำ output ออก	72
4.19	แสดงพลัสการเลือกช่องสัญญาณ และ output	73
4.20	วงจรความถี่ต่ำผ่านแบบ R-C	74
5.1	แผนผังการทดสอบวงจร	76
5.2	กราฟการทำลีสท์สแควร์ของการรบกวนภายในช่องสัญญาณ	81
5.3	ระดับการรบกวนข้ามช่องสัญญาณ	83
5.4	กราฟการทำ ลีสท์สแควร์ของการรบกวนข้ามช่องสัญญาณ	90





## Abstract

Analogue data signals modulate a voltage to frequency converter to give signals compatible with a digital transmitter - receiver optical link. Multiplexing is by time division where one channel is denoted to synchronization. A total of sixteen channels allows each data channel to be monitored once per second. Good signal to noise levels for the channels and reliable operation are achieved using simple methods of signal conversion, and multiplexing.



## สัญลักษณ์และความหมาย

A	พื้นที่
a	รัศมีแกนโยนนำแสง
a	มุมโคก ๆ
a	คาบการกระจายแสง
a	สัมประสิทธิ์การหักเหของโฟตอน
a <sub>f</sub>	คาบการลมหอนสัญญาณของโยนนำแสง
a <sub>m</sub>	มุมตกกระทบของแสงโหมคสูงในอากาศ
B	แบนควีคิต์
b	รัศมีแคลคคิง
β	ค่าคงที่กำหนดคุณสมบัติการเคลื่อนที่ในตัวกลางโคก ๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
C	คาปาซิเตอร์
C <sub>O</sub>	คาปาซิเตอร์ตรงรอยต่อขดขมยั้งไมโบอัส
C <sub>D</sub>	คาปาซิเตอร์เกิดจากการเพอร์
C <sub>J</sub>	คาปาซิเตอร์บริเวณรอยต่อ
C <sub>t</sub>	คาปาซิเตอร์กำหนดความถี่ในวงจรออสซิลเลเตอร์
c	ความเร็วแสงในสุญญากาศ หรือ ในอากาศ
d	ความหนาแน่นชั้น active
d	ความหนาของบริเวณปลดคพาหะหรือชั้น active
E <sub>C</sub>	พลังงานแถบความนำ
E <sub>g</sub>	ช่องว่างพลังงานระหว่างแถบความนำกับแถบวาเลนซ์
E <sub>ph</sub>	พลังงานของโฟตอน
E <sub>v</sub>	พลังงานของแถบวาเลนซ์
e	ประจุของอิเล็กตรอน
ev	พลังงานในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์

$\eta$	สัมประสิทธิ์ทางควอนตัม
$\eta_{int}$	สัมประสิทธิ์ควอนตัมภายในของแหล่งกำเนิดแสง หมายถึงความสามารถในการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็นโฟตอน
$\eta_f$	สัมประสิทธิ์การคับปลิงแสง เข้าสู่อิยอนำแสง
$\eta_{ext}$	สัมประสิทธิ์ควอนตัมภายนอก หมายถึงความสามารถที่แหล่งกำเนิดแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะปล่อยโฟตอนออกจากผิวหน้าได้
$F_{out}$	output frequency
$f'$	อัตราส่วนของแสงที่หักเหผ่านผิวหน้าของแหล่งกำเนิดแสงออกสู่อากาศได้
$f_c$	ความถี่จุดกลาง
$f_m$	ความถี่มอดูเลต
$f_0$	ความถี่ fundamental
$f_s$	ความถี่ฮาร์โมนิค
$h$	ควคงที่ของพลังค์
$I$	กระแสซี
$I_o$	ความเข้มแสงออกในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว
$I_{in}$	input current
$I(\theta)$	ความเข้มแสงออกในแนวทำมุมใด ๆ กับพื้นผิว
$I_{ph}$	กระแสที่เกิดจากโฟตอน
$I_b$	กระแส back ground ในโฟโตไดโอด
$I_d$	dark current
$I_{so}$	ความเข้มแสงออกจากผิวหน้าแหล่งกำเนิดแสงในแนวตั้งฉาก
$I_{sh}$	กระแสรบกวน short noise ในโฟโตไดโอด
$i$	กระแส เอ ซี
$J$	ความหนาแน่นกระแส

$J_0$	ความหนาแน่นกระแสไบอัส
$J_{cr}$	ความหนาแน่นกระแสวิกฤติ
$J_m$	ความหนาแน่นกระแสสมมูล
$L$	ค่าพลังงานแสงที่สูญเสียไปในระบบใยนำแสง
$l$	ความยาว
$l_c$	การสูญเสียพลังงานไปเนื่องจากการเชื่อมต่อหรือการคับปลิง
$\lambda$	ความยาวคลื่น
$\lambda_{th}$	ความยาวคลื่นจุดเริ่มต้น
$N$	ความหนาแน่นอะตอมต่อหน่วยพื้นที่
$N$	สารกึ่งตัวนำชนิด N ความต้านทานสูง
$NA$	Numerical Aperture บอกถึงความสามารถในการรับแสงของใยนำแสง
$n$	ดรรชนีหักเหของตัวกลางใด ๆ
$n$	ดรรชนีหักเหเฉลี่ยของแกนกับแคลคดิง
$n, n^+$	สารกึ่งตัวนำชนิด n ความต้านทานต่ำ
$n_a$	ดรรชนีหักเหของอากาศ
$n_1, n_2$	ดรรชนีหักเหระบุบริเวณของตัวกลาง
$n_A$	ความหนาแน่นประจุพาหะผู้ให้ หรือความหนาแน่นประจุ เนื่องจากการโคปี
$n_s$	ดรรชนีหักเหของสารกึ่งตัวนำในแหล่งกำเนิดแสง
$\Delta n$	ความแตกต่างของดรรชนีหักเหของแกนกับแคลคดิง
$\Delta$	ความแตกต่างของดรรชนีหักเหของแกนกับแคลคดิงเทียบกับของแกน
$\nu$	ความถี่
$\Omega$	มุมตัน
$\omega$	ความถี่เชิงมุม
$P$	สารกึ่งตัวนำชนิด p ความต้านทานสูง
$P_o$	output power
$P_{in}$	input power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$P_M$	พลังงานมอดูเลท
$P_R$	ระดับพลังงานที่โฟโตไดโอดคือเท็คได
$P_S$	พลังงานที่เข้าสู่ใยนำแสง
$P_w$	พลังงานที่ความถี่มอดูเลท
$p, p^+$	สารกึ่งตัวนำชนิด p ความต้านทานค่า
$\phi$	ฟลักซ์ของแสง
$\phi_o$	ฟลักซ์ของแสงในแนวตั้งฉากกับผิวหน้าแหล่งกำเนิดแสง
$\phi_a$	ฟลักซ์ของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงออกสู่อากาศ
$\phi_f$	ฟลักซ์ของแสงที่เข้าสู่ใยนำแสง
$\phi_s$	ฟลักซ์ของแสงในแหล่งกำเนิดแสงเกิดจากการเปลี่ยนกระแสเป็นโฟตอนได้ทั้งหมด
$\phi_t$	ฟลักซ์แสงที่หักเหผ่านชั้นสารกึ่งตัวนำออกสูผิวหน้า LED ได้
$\phi_m$	มุมที่ลำแสงโหมคสูงทำกับแกนใยนำแสง
R	ค่าคงที่ของการกระจายแสงแบบ Rayleigh
R	responsivity
R	ความต้านทาน
$R_t$	ความต้านทานกำหนดความถี่ในวงจรรอซซิลเลเตอร์
r	รัศมี
r	สัมประสิทธิ์การรวมตัว
$r_D$	ความต้านทานบริเวณปลดพาหะ
s	ความเร็วในการรวมตัวของประจุพาหะ
$\Delta T$	ความกว้างพัลส์เกิดจากการกระจายแสงเนื่องจากโหมค
t	ความหนา
t	สัดส่วนที่แสงทะลุผ่านตัวกลางประเภทสารกึ่งตัวนำที่โปร่งใสออกไปได้

$t_o$	เวลาที่แสงในแนวแกนใช้ในการเคลื่อนที่ในใยนำแสง
$t_H$	ความกว้างพัลส์ช่วงการ " High "
$t_L$	ความกว้างพัลส์ช่วงการ " Low "
$t_m$	เวลาที่แสงโหมคสูงใช้ในการเคลื่อนที่ในใยนำแสง
$t_{tr}$	เวลาการแพร่ของอิเล็กทรอนิกส์บริเวณผลตกพาหะ
$\tau$	ค่าเวลาคงที่ของการรวมตัวยังผล
$\tau_{nr}$	อายุของประจุพาหะที่รวมตัวแล้วไม่ให้โฟตอน
$\tau_p$	อายุประจุพาหะส่วนน้อย
$\tau_{rr}$	อายุประจุพาหะที่รวมตัวแล้วให้โฟตอน
$\tau_{rr1}$	อายุประจุพาหะรวมตัวแล้วให้โฟตอนระบอบบริเวณ
$\theta$	มุมกระหนบของแสงในตัวกลางใด ๆ
$\theta_c$	มุมวิกฤติ
$\theta'$	มุมหักเหหรือสะท้อนของแสง
$v$	ศักย์ไฟฟ้าหรือความต่างศักย์มีหน่วยเป็นโวลต์
$V_{in}$	input voltage
$V_{max}$	โวลเตจสูงสุดที่วัดได้
$V_{out}$	output voltage
$\Delta V$	ความแตกต่างระหว่างโวลเตจ
$v$	ความเร็วแสงในตัวกลางใด ๆ
$v_{se}$	ความเร็วอิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนข้ามบริเวณผลตกพาหะ หรือบริเวณใด ๆ ในสารกึ่งตัวนำ
$w$	ความหนาของชั้น active ที่สามารถโบอัสให้ศักย์ตกคร่อมได้ทั้งหมด

หากนับย้อนหลังไปก่อนคริสต์ศักราชหลายพันปี มนุษย์เริ่มรู้จักการสื่อสาร และมีความจำเป็นต้องใช้การสื่อสารติดต่อกันมากขึ้นตามความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีของมนุษย์ ในแต่ละยุคสมัยมนุษย์หาเครื่องมือได้เหมาะสมตามสภาพของการพัฒนาทางเทคโนโลยีในยุคสมัยนั้น ความสำคัญของการสื่อสารอยู่ที่ความสามารถในการนำปริมาณข่าวสาร ความรวดเร็ว ปลอดภัย การสื่อสารยุคใหม่นับได้จาก ที่มนุษย์ใช้การส่งสัญญาณในรูปกระแสไฟฟ้าไปตามสายทองแดงหรือตัวนำอื่น เริ่มจาก ค.ศ. 1838 [ 1 ] Samuel F.B. Morse คิดการสื่อสารเป็นรหัสเรียกว่าโทรเลข ค.ศ. 1876 [ 2 ] Alexander Graham Bell คิดประดิษฐ์โทรศัพท์ ปี ค.ศ. 1887 [ 1 ] Heinrich Hertz สร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในห้องปฏิบัติการได้ตามทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ James C. Maxwell (ค.ศ. 1831 - 1879) ซึ่งอยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์และต่อมาในปี ค.ศ. 1897 [ 2 ] Guglielmo Marconi สื่อสารด้วยคลื่นวิทยุได้สำเร็จ และไม่ควรรลือว่าการพัฒนาระบบสื่อสารแบบต่าง ๆ ขึ้นมาได้เกิดจากทฤษฎีพื้นฐาน ตามกฎของโอห์ม (ค.ศ. 1826) และความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับสนามไฟฟ้า ตามการค้นพบของ Micheal Faraday ( Joseph Henry 1831)

การพัฒนาทางเทคโนโลยีต่าง ๆ ต้องมีพื้นฐานทางทฤษฎีรองรับ จนในคริสต์ศตวรรษที่ 20 วิทยาศาสตร์ได้ก้าวหน้าไปมากโดยเฉพาะด้านเทคโนโลยี ทำให้การสื่อสารพัฒนาไปด้วยอย่างมีประสิทธิภาพนำเอาคลื่นสัญญาณตั้งแต่ความถี่ 300 Hz ซึ่งเป็นความถี่เสียงจนถึง 90 GHz เป็นช่วงความยาวคลื่นเป็นมิลลิเมตรมาใช้ในการติดต่อสื่อสารทั้งที่เป็นสัญญาณข่าวสารโดยตรงและเป็นคลื่นพาหะยังมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงของแสง ตั้งแต่ความยาวคลื่น 50 nm (อุลตราไวโอเล็ต) จนถึง 10  $\mu\text{m}$  (อินฟราเรดคลื่นยาว) ซึ่งครอบคลุมช่วงของแสงสว่าง ความยาวคลื่น 400-700 nm อยู่ด้วย คลื่นแสงนี้สามารถนำข่าวสารผ่านไปในตัวกลางบางชนิด ในปัจจุบันให้ความสำคัญกับใยนำแสง (Optic fiber) และได้ทำการค้นคว้าทดลองทางด้านนี้กันอย่างจริงจัง เพราะมีความเด่นหลายประการ โดยเฉพาะมีแบนด์วิธที่กว้างและการลดทอนสัญญาณน้อย มีจำนวนข่าวสารที่มากขึ้น และการทวนสัญญาณน้อยลงทำให้ประหยัดสำหรับการสื่อสารในระยะไกล โดยปกติแล้วการสื่อสารที่ใช้คลื่น

ของความถี่สูงมีแบนด์วิดท์กว้าง ย่อมมีจำนวนช่องสัญญาณที่จะใช้ได้ยิ่งมากขึ้น ในกรณีของการใช้แสง เลเซอร์ที่เป็นฮีเลียม-นีออน มีความถี่ประมาณ  $5 \times 10^{14}$  Hz คิดกันว่า 1 % ของความยาวคลื่นที่จะนำมาใช้ในการสื่อสารได้ จะมีแบนด์วิดท์ได้ถึง 5,000 GHz ซึ่งประมาณ  $10^5$  เท่าของไมโครเวฟที่ใช้กันอยู่ปัจจุบัน หรือนำมาส่งโทรทัศน์ได้ไม่ต่ำกว่าหนึ่งล้านช่อง [ 3 ] และในปัจจุบันในประเทศญี่ปุ่นได้มีการทดลองสื่อสารด้วยใยนำแสงโหมดเดียว ( Single mode ) ด้วยความยาวคลื่น 1.55  $\mu\text{m}$  มีการลดทอนสัญญาณ 0.2 dB/km เป็นระยะทาง 15 km โดยไม่ต้องมีการทวนสัญญาณ [ 4 ]

ความคิดในการสื่อสารด้วยแสงได้เริ่มต้นและทำกันมาแล้วหลายศตวรรษ ในปลายคริสต์ศตวรรษที่ 18 Claude Chappe ได้ส่งสัญญาณด้วยแสงเป็นระยะทาง 423 km ระหว่าง Paris กับ Strasbourg โดยมีสถานีทวนสัญญาณด้วยกล้องโทรทรรศน์ แต่ทำได้ด้วยขอมูลข่าวสารจำนวนน้อย เสียเวลามากและยุ่งยากจนในปี ค.ศ.1960 [ 3 ] T.H.Maiman ได้เสนอรายงานเกี่ยวกับทำให้เกิดแสงเลเซอร์จากผลึก Ruby โดยการกระตุ้นด้วยแฟลช ( flash light ) และถัดจากนั้นมาหนึ่งปี A.Javan และผู้ร่วมงานได้ผสมสัญญาณเข้ากับแสงเลเซอร์จากฮีเลียม-นีออน นับเป็นการสื่อสารด้วยแสงที่ผ่านอากาศได้สมบูรณ์แบบครั้งแรก ทำให้มีผู้สนใจที่จะพัฒนาการสื่อสารด้วยแสงกันกว้างขวางขึ้น จนถึงปัจจุบันการสื่อสารด้วยลำแสงเลเซอร์ผ่านอากาศได้พัฒนาขึ้นมา แต่ยังมีข้อจำกัดในด้านการลดทอนสัญญาณ ของอากาศมีค่ามาก แตกต่างตามความยาวคลื่นและส่วนประกอบ ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง จึงนิยมทำกันเฉพาะจุดที่ไม่สามารถจะวางสายเคเบิลได้ และเป็นสถานการณ์ที่ถูกเลือก อย่างไรก็ตามจากความเป็นไปได้และมองเห็นส่วนดีของการสื่อสารด้วยแสง ทำให้มีผู้ทดลองใช้การสื่อสารด้วยแสงโดยมีท่อนำแสง จึงทำให้มีการค้นหาคำตอบที่จะใช้ขนาดความยาวคลื่น และชนิดของท่อนำแสง จนในปี ค.ศ.1966 [ 3 ] Kao และ Hockham ได้ส่งสัญญาณสื่อสารผ่านใยนำแสงเป็นครั้งแรก และพบสิ่งผิดปกติเพราะใยนำแสงมีการลดทอนต่ำสุดถึง 1000 dB/km ซึ่งมากกว่าผ่านอากาศในวันที่แจ่มใส และเขาอธิบายว่าการที่มีการลดทอนสัญญาณมากมายอย่างนี้ต้องเกิดจากความไม่บริสุทธิ์ของเนื้อแก้ว และถ้าหากสามารถผลิตใยนำแสงที่เป็นแก้วให้มีค่าการลดทอนไม่เกิน 20 dB/km แล้ว การสื่อสารด้วยใยนำแสงจะได้รับการพัฒนาขึ้นมาอย่างรวดเร็ว แนอน และในปี ค.ศ.1970 Kapron, Keck และ Maurer สามารถผลิตใยนำแสงที่มีการลดทอน 20 dB/km ได้ ซึ่งนับเป็นการเริ่มต้นของการสื่อสารยุคใหม่ที่ใช้การส่งสัญญาณผ่านใยนำแสง ในปี ค.ศ.1970 [ 3 ] Corning Glass ผลิตใยนำแสงที่มีการลดทอน 2 dB/km และในประเทศญี่ปุ่นได้ทำการผลิตใยนำแสงที่มีการลดทอนได้ 0.5 dB/km ในปี ค.ศ.1976 และ 0.2 dB/km

ในปี ค.ศ. 1980 [ 3 ] แแต่การลดทอนที่มีค่าต่ำนี้ใช้กับความยาวคลื่น  $1.55 \mu\text{m}$  จึงนับได้ว่าตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 เป็นต้นมา การสื่อสารด้วยใยนำแสงได้รับการพัฒนาทดลองนำมาใช้กับการสื่อสารประจำวัน เช่น โทรศัพท์เคเบิลทีวี บริการข้อมูลข่าวสาร และการสื่อสารด้านอื่น ๆ ที่ต้องการช่องสัญญาณมาก ๆ ผู้ใช้ได้โดยตรง

ระบบการสื่อสารผ่านใยนำแสง จำเป็นต้องพัฒนาควบคู่ไปทั้งระบบ คือ ตัวใยนำแสงซึ่งนำสัญญาณแหล่งกำเนิดแสงใช้ส่งสัญญาณ และตัวรับแสงในเครื่องรับปลายทาง ถ้าหากว่าสามารถผลิตใยนำแสงที่มีการลดทอนสัญญาณได้ต่ำ แต่หาไม่สามารถผลิตแหล่งกำเนิดแสงที่ให้ความยาวคลื่นที่มีการลดทอนต่ำ และตัวรับแสงที่มีความไวเพียงพอแล้วก็ไม่มีความจำเป็นอะไร ความก้าวหน้าในการสื่อสารด้วย ใยนำแสงนี้จึงต้องพัฒนาเทคโนโลยีให้ทั้งระบบ ทั้งตัวส่งสัญญาณแสง คือ แหล่งกำเนิดแสง ( Source ) ใยนำแสง ( fiber ) และตัวรับแสง ( Photo detector )

ปัจจุบันประเทศที่พัฒนาแล้วหลายประเทศกำลังทำการวิจัย และนำระบบการสื่อสารด้วยแสง โดยใช้ใยนำแสงเป็นตัวนำสัญญาณ การสื่อสารในอนาคตมุ่งที่ตัวใยนำแสง เราจะเห็นได้ว่า การสื่อสารระยะไกลโดยไม่ต้องอาศัยพลาสมาสารในสมัยแรกก็ใช้สัญญาณแสงเป็นรหัสถึงกัน และการสื่อสาร ในอนาคตนี้ของใช้การส่งข้อมูลข่าวสารจำนวนมาก ๆ เพื่อให้เพียงพอกับความต้องการและความก้าวหน้าเกี่ยวกับอุปกรณ์ของผู้ใช้และถึงผู้ใช้โดยตรง ซึ่งก็มุ่งมาที่การสื่อสารด้วยแสง ผิดกันแต่เพียงเทคโนโลยีที่ใช้ เป็นคนละยุคสมัย จึงเห็นได้ว่าในอดีตมนุษย์ใช้การสื่อสารด้วยแสงเมื่อต้องการความรวดเร็ว และมนุษย์กำลังพัฒนาการสื่อสารด้วยแสงขึ้นมาใช้ในอนาคต

ในระบบใยนำแสง ราคาของระบบขึ้นอยู่กับ ตัวส่ง ตัวรับ และตัวใยนำแสงเองด้วยอุปกรณ์การทวนสัญญาณมีราคาค่อนข้างแพง การส่งสัญญาณที่มีจำนวนข้อมูลมาก ๆ โดย มีการทวนสัญญาณน้อยครั้งหรือไม่ต้องมีการทวนสัญญาณเลย จึงจะเป็นข้อได้เปรียบกว่าระบบไฟฟ้า เช่น ในระบบส่งสัญญาณ  $140 \text{ Mb/s}$  (1920 วงจร) เมื่อใช้คู่สายระบบไฟฟ้าต้องมีการทวนสัญญาณทุก  $2 \text{ km}$  ค่าใช้จ่ายเฉพาะการวางสาย และการทวนสัญญาณ ประมาณ 4500 ดอลลาร์ต่อกิโลเมตร ส่วนระบบใยนำแสงจำนวนข้อมูล เท่ากัน ระยะการทวนสัญญาณ 10 กิโลเมตร ค่าใช้จ่ายในการวางสายและทวนสัญญาณ 2500 ดอลลาร์ ต่อกิโลเมตร [ 3 ] ถ้าคิดค่าใช้จ่ายตามพลังงานในระยะยาวด้วยระบบใยนำแสงจะถูกกว่าส่งไปอดีต เพราะใช้พลังงานน้อยกว่ามาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการทดลองที่นำมาเขียนเป็นวิทยานิพนธ์เป็นการส่งสัญญาณด้วยระบบใยนำแสง จัดเป็นรุ่นที่ 1 ซึ่งได้มีการพัฒนามาใช้งานได้อย่างสมบูรณ์แล้ว (การสื่อสารด้วยใยนำแสงในรุ่นต่าง ๆ มีแสดงในภาคผนวกที่ 2 ) เลือกเอาระบบโดยมีจุดประสงค์ คือ ท้าทายและประหยัด สามารถนำมาใช้แก้ปัญหาบางอย่างแทนระบบไฟฟ้าได้ และออกแบบระบบการส่งสัญญาณด้วยใยนำแสงให้ครบขั้นตอนทั้งระบบ

ในระบบการวัดและควบคุมจำเป็นต้องมีสัญญาณจากอุปกรณ์ หรือ เครื่องมือต่าง ๆ หลายชนิด การส่งสัญญาณจากแหล่งต่าง ๆ เพื่อเข้าเครื่องควบคุม เช่น อาจจะใช้ ไมโครเซสเซอร์ หรือ ไมโครคอมพิวเตอร์ เป็นตัวควบคุมสั่งให้ระบบทำงานตามสัญญาณที่ได้รับจากเครื่องมือต่าง ๆ จากระยะไกล ในระบบไฟฟ้ามักจะมีปัญหาคือ

1. ขั้วไฟฟ้า หรือ การกราวน (ground loop ) ซึ่งต้องระวังมาก เพราะแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงในเครื่องมือต่าง ๆ อาจมีระดับกราวนไม่เหมือนกัน จึงอาจมีอันตรายจากการลัดวงจรได้

2. มาตรฐานของอุปกรณ์เชื่อมต่อ การส่งการรับต้องมีการจัดรูปสัญญาณให้เป็นมาตรฐานเดียวกันจึงจะใช้ได้ ในปัจจุบันมีระบบ RS - 232 C นิยมใช้กันมากแต่ไม่สามารถเข้ากันได้กับ ไมโครคอมพิวเตอร์ทุกระบบ

3. ระยะการส่งจำกัดในระบบไฟฟ้าที่ใช้โวลต์ต่ำมักจะส่งสัญญาณได้ไม่ไกลนัก เช่นระบบ RS - 232 C ส่งได้ 50 ฟุต (ประมาณ 15 เมตร) อาจจะไม่เพียงพอับระบบควบคุมที่ต้องส่งสัญญาณระยะไกล ๆ ออกไป

ระบบที่สร้างขึ้นอาจนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้นได้ โดยเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นแสงส่งเข้าสู่ใยนำแสงไปยังระบบอื่น ใยนำแสงเป็นตัวนำสัญญาณไม่มีปัญหาระบบขั้วไฟฟ้า ไม่ต้องกังวลเรื่องมาตรฐานของระบบการส่ง และยังสามารถเลือกระบบการส่งสัญญาณด้วยใยนำแสงให้มี ระยะไกล ๆ เพียงพอกับความต้องการของอุปกรณ์ที่ต้องใช้เพื่อควบคุมการทำงานได้

ได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานของระบบการสื่อสารด้วยใยนำแสง เกี่ยวกับแหล่งกำเนิดแสงคุณสมบัติของใยนำแสง และตัวรับแสงไว้ในบทที่ 2 เพื่อทำความเข้าใจในการสื่อสารด้วยระบบนี้ สำหรับในบทที่ 3 พิจารณาแนวทางในการจัดรูปสัญญาณที่นำมาใช้กับระบบใยนำแสง โดยความเหมาะสม แล้วสัญญาณควรเป็นพัลส์ หรือ ดิจิตอล เพราะสามารถแก้ปัญหาคูสมบัติเชิงเส้นของตัวส่ง และตัวรับและเวลาของการที่เลยสัญญาณ เนื่องจากคุณสมบัติการกระจายแสงของใยนำแสง จึงเลือกเอาการมอดูเลตสัญญาณแบบ FM โดยเปลี่ยนโวลเตจ เป็นความถี่ ( VFC ) ด้วย IC LM 331 ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงเส้น ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IC ที่ที่พอสมควร สามารถเปลี่ยนสัญญาณได้ออกจาก 0 - 10 V โวลต์ในช่วงนี้มีความเหมาะสมกับอุปกรณ์ควบคุมหลายชนิด ให้ความถี่ออก 0 - 10 kHz เป็นช่วงเต็มสเกลมีความถี่ไม่สูงมากทำให้เลือกอุปกรณ์ประกอบอื่นมาใช้ได้ในราคาไม่แพง การส่งสัญญาณจะต้องใช้ใยนำแสงเพียงเส้นเดียว สัญญาณต้องอนุกรมกัน จึงมีการมัลติเพล็กซ์ ใช้ระบบการแบ่งช่วงเวลา โดยมีวงจรสร้างพัลส์สำหรับการสุ่ม เพื่อเลือกสัญญาณแต่ละช่องวนตามลำดับด้วยเวลาที่เท่ากัน ทำการสุ่มแต่ละช่องสัญญาณอย่างน้อย วนาทีละครั้ง สัญญาณได้ออกของแต่ละช่องที่สุ่มได้จะเข้าวงจร VFC วงจรเดียวกันจึงเป็นการประหยัดได้อีกชั้นหนึ่ง ในการมัลติเพล็กซ์ต้องมีการซิงค์ ( Synchronization ) จึงต้องใช้ช่องสัญญาณหนึ่ง สำหรับซิงค์โดยทำให้พัลส์ของสัญญาณช่องที่ใช้ซิงค์มีลักษณะแตกต่างจากพัลส์ของสัญญาณช่องอื่น เพื่อใช้แยกช่องสัญญาณสำหรับซิงค์ได้ในเครื่องรับ

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบวงจรด้านเครื่องส่ง และเครื่องรับจุดประสงค์หลักต้องการใช้ส่งสัญญาณจากอุปกรณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของ output voltage ซ้ำ เช่น เทอร์โมมิเตอร์ เครื่องตรวจระดับความรอน วัฏจักรดับแสง ครวัฏจักรดับของเหลว เป็นต้น จะให้ output voltage เป็นแบบต่อเนื่อง 0 - 10 V หรือแบบ "ON " , " OFF " ที่สามารถเลือกระดับภาวะ "ON " ได้ด้วยการเปรียบเทียบสัญญาณ เมื่อการเปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์เหล่านี้ค่อนข้างช้า การสุ่มแต่ละช่องสัญญาณอย่างน้อย วนาทีละครั้งก็เป็นการเพียงพอ ทำการมัลติเพล็กซ์ได้ 16 ช่องสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณมีเวลามากพอที่จะให้วงจร VFC ซึ่งมีความถี่เต็มสเกล 10 kHz ได้ทำงานโดยเกิดความผิดพลาดในการสวิตช์คร่อม ช่องสัญญาณน้อยลง ส่วนในวงจรเครื่องรับใช้ p-i-n โฟโตไดโอด ใช้วงจรเปลี่ยนกระแสเป็นโวลต์ และวงจรขยายให้มีระดับสัญญาณที่แรงขึ้น ใช้วงจรเปรียบเทียบสัญญาณเพื่อคัดเอาระดับการรบกวนออกไป ให้แบนด์วิดธ์ประมาณ 30 kHz ซึ่งถูกกำหนดโดยวงจรเปลี่ยนกระแสโวลต์ และวงจรขยาย การขยายแบนด์วิดธ์ของระบบ จึงทำได้ไม่เกิน 30 kHz สัญญาณที่ได้รับมีการเปลี่ยนแปลงจากแสงมาเป็น กระแสไฟฟ้าในเครื่องรับต้องนำไปทำการแยกเอาช่องสัญญาณที่ใช้ซึ่งค้อออกมาและทำการตีมัลติเพล็กซ์ แยกเอาสัญญาณแต่ละช่องออกด้วยวงจร sample and hold amplifier

ในการออกแบบวงจรพยายามเลือกวงจรง่าย ๆ ค่าใช้จ่ายถูก แต่ต้องมีแบนด์วิดธ์ และคุณภาพของ output ที่ดี ในบทที่ 6 จึงแสดง การทดสอบคุณภาพของ output โดยเทียบกับ input ได้ข้อคร่าส่วนสัญญาณต่อการรบกวนภายในช่องสัญญาณ 34 dB และการรบกวนข้ามช่องสัญญาณ 36 dB นับว่ามีคุณภาพเพียงพอกับการส่งในระบบใยนำแสงที่ต้องการเพียง 20 dB และจากคุณภาพทาง output

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้อัตราส่วนสัญญาณต่อการรบกวนที่สูงแสดงว่าสามารถส่งได้ไกล

ในการทดลองนับว่าได้ทำครบขั้นตอนของระบบการส่งสัญญาณด้วยใยนำแสง คือมีการจัดรูปสัญญาณให้เหมาะสมโดยการทำมัลติเพล็กซ์ การมอดูเลท แบบ VFC กระทำในส่วนที่เป็นสัญญาณไฟฟ้า และการมอดูเลทในระดับสัญญาณแสง เพื่อให้แสงออกเข้าใยนำแสง ส่วนวิธีการคัปปลิงอาศัยเทคนิคใช้หัวต่อแบบเกลียวที่ผลิตสำเร็จจากโรงงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านการคัปปลิงในด้านตัวรับนั้นใช้ p-i-n โฟโตไดโอดประกอบเป็นวงจร เปลี่ยนกระแสเป็นโวลเตจ วงจรขยายสัญญาณและวงจรเปรียบเทียบ ซึ่งเป็นรูปแบบทั่วไปของวงจรด้านเครื่องรับในส่วนที่เปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นกระแสไฟฟ้า หลังจากนั้นจะเป็นการจัดการเกี่ยวกับสัญญาณไฟฟ้า โดยทำการคิมัลติเพล็กซ์ให้ได้สัญญาณแต่ละช่องกลับคืน

คุณภาพการใช้งานของวงจรพิจารณาเทียบ output กับ input ถ้าหากใช้งานได้ตามความต้องการ คือมีอัตราการรบกวนที่ต่ำก็ไม่ต้องแก้ไขวงจรส่วนใด ถ้าหากเกิดปัญหาคุณภาพของ output ไม่ดีพอก็พิจารณาแก้ไขวงจรส่วนที่ น่าจะเป็นปัญหามากก่อนไปตามลำดับ คือ วงจร sample and hold , วงจรความถี่ต่ำผ่าน, วงจร PLL วงจรขยายสัญญาณและเปลี่ยนกระแสเป็นโวลเตจ.

ในตอนท้ายสุดเป็นภาคผนวก โดยภาคผนวกที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดลองกับการส่งสัญญาณในระบบใยนำแสงแบบง่าย ๆ อีก 2 วิธีที่นักศึกษาคณะวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง เขียนไว้เป็นปริญา นีพนธ์ และในภาคผนวกที่ 2 ได้แสดงข้อมูลของการสื่อสารด้วยใยนำแสงทั้ง 3 รุ่น

## ใยนำแสง (Optical fiber)

การส่งข่าวสารในลักษณะกระจายคลื่นออกไปทุกทิศทาง แบบการส่งวิทยุและโทรทัศน์บางบริเวณไม่มีประโยชน์เพราะไม่มีผู้รับข่าวสาร และต้องใช้พลังงานสูง การกำหนดจุดและทิศทางการส่งคลื่นเพื่อการทวนสัญญาณสู่แหล่งชุมชนอื่น หรือตามความต้องการของผู้ใช้จึงมีความจำเป็น เช่นในระบบไมโครเวฟใช้จานสายอากาศยิงคลื่นตรงระหว่างสถานีส่งกับรับ จะอย่างไรก็ตามคลื่นยังบานออกเป็นรูปกรวย ทำให้ความหนาแน่นพลังงานลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระยะทางมากขึ้น การส่งพลังงานในรูปที่ต้องทำให้คลื่นแผ่กระจายออกไปจะมีการสิ้นเปลืองพลังงานมาก ระบบการส่งจึงต้องใช้พลังงานสูง นอกจากนั้นยังมีการรบกวนสัญญาณจากสนามแม่เหล็ก หรือสนามไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในบรรยากาศของโลก การใช้ท่อหรือสายนำสัญญาณเพื่อรวมสัญญาณให้ไปทางเดียวกัน ถ้าใช้เทคนิคให้สูงขึ้น อาจลดการใช้พลังงานลงได้ แต่มีปัญหากับแบนด์วิดท์สำหรับใยนำแสง (Optical fiber) จัดว่าเป็นท่อส่งสัญญาณช่วงความถี่แสง ที่สามารถพัฒนาให้มีประสิทธิภาพในการนำสัญญาณได้สูงมาก ซึ่งถ้าหากได้รับการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องให้ถึงที่สุดแล้วจะนำมาแก้ปัญหาในระบบการสื่อสารได้มากมาย

### 2.1 การสื่อสารด้วยใยนำแสง

ปัจจุบันมนุษย์ได้นำเอาเทคโนโลยีต่าง ๆ มากมาย มาช่วยแก้ปัญหาในการทำงาน และเพื่อความสะดวกสุขสบายในการดำรงชีวิต การบริการข้อมูลข่าวสารจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณ และต้องวางแผนเตรียมรับการขยายตัวของความต้องการด้านการสื่อสาร ความแออัดของช่องสัญญาณที่มีอยู่ในระบบการสื่อสารแบบต่าง ๆ ค่อนข้างสูง ทั้งที่ไคขยายระบบออกไปมากมาย เช่น ใช้ดาวเทียมสื่อสารสายเคเบิลทั้งใต้น้ำและบนบก วิทยุคลื่นสั้น และระบบไมโครเวฟ แบนด์ของความถี่คลื่นพาหะถูกใช้ไปแทบหมดสิ้น จนถึงระดับคลื่นเป็นมิลลิเมตร ก็ยังไม่เป็นการพอเพียงสำหรับอนาคต การพัฒนาระบบใหม่คือการสื่อสารด้วยใยนำแสงจะช่วยเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณ เป็นการลดความแออัด และเพิ่มขีดความสามารถโดยจะสามารถให้บริการแก่ผู้ใช้โดยตรงได้แม้จะเป็นอุปกรณ์ที่ต้องการแบนด์วิดท์กว้าง เช่น การเรียนการสอนโดยอาศัยเทคโนโลยี พวกโทรทัศน์ หรือคอมพิวเตอร์ ความถี่ที่สำคัญของใยนำแสงที่ใช้ส่งสัญญาณคือการลดทอนสัญญาณต่ำ มีแบนด์วิดท์กว้าง (Low loss - broad bandwidth) นอกจากนั้นยังมีส่วนที่เด่นที่ทรงพลังมาอีก ซึ่งพอประเมินส่วนดีของใยนำแสงในการนำมาใช้ส่งสัญญาณในการสื่อสาร เมื่อเทียบกับการใช้สายทองแดง คือ

1. การลดทอนสัญญาณต่ำ (Low loss) เช่นใยนำแสงผลิตด้วยวิธี MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition) หรือ VAD (Vapor phase axial deposition) แบบโหมดเดี่ยว (Single mode = SM) มีการลดทอนสัญญาณ 0.35 dB/km ที่ความยาวคลื่น 1.3  $\mu\text{m}$  และ 0.2 dB/km ที่ความยาวคลื่น 1.55  $\mu\text{m}$  การที่มีการลดทอนสัญญาณต่ำ ทำให้ส่งไต่ระยะมากขึ้นโดยไม่ต้องมีการทวนสัญญาณ หรือมีน้อยลงทำให้ระบบมีค่าใช้จ่ายถูกลง และมีความมั่นใจได้มากขึ้น ประมาณว่าส่งได้ไกลกว่าระบบสายแกนรวมไม่น้อยกว่า 10 เท่า ปี 1986 ญี่ปุ่นจะสร้างระบบเคเบิลใต้น้ำ F-400 M ระยะ 40 กิโลเมตรโดยไม่ต้องทวนสัญญาณ [ 4 ]

2. มีแบนด์วิดท์กว้าง (Broad bandwidth) การที่มีแบนด์วิดท์กว้างทำให้บรรจุข่าวสารหรือช่องสัญญาณได้มากขึ้น ได้มีการทดลองส่งสัญญาณดิจิทัล 140-560 Mbit/s ผ่านใยนำแสงที่ Heinrich Hertz Institute ใน Berlin ในใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยว (SM) [ 3 ]

แบนด์วิดท์ของใยนำแสงแบบ SM ถูกกำหนดด้วยค่าการกระจายแสงเนื่องจากคุณสมบัติของสารที่นำมาทำใยนำแสง (material dispersion) และคุณสมบัติการกระจายแสงเนื่องจากท่อนำคลื่น (waveguide dispersion) โดยที่ยังระยะทางมากขึ้นสัญญาณที่เป็นพัลส์จะยิ่งถูกขยายกว้างออก จึงพิจารณาความสามารถในการส่งข่าวสารจากแบนด์วิดท์  $\times$  ระยะทาง หรือ บิตเรท (bit rate)  $\times$  ระยะทาง โดยถือเอาจุดที่สามารถแยกพัลส์สองพัลส์ที่ติดกันออกจากกันได้ จากระดับการเปรียบเทียบสัญญาณที่ครั้งหนึ่งของสัญญาณไฟฟ้าในวงจรเครื่องรับ สำหรับที่ความยาวคลื่น 1.55  $\mu\text{m}$  ซึ่งมีการลดทอนสัญญาณต่ำสุด มีการกระจายแสงเนื่องจากคุณสมบัติท่อนำคลื่น ทำให้ความกว้างของพัลส์ขยายเพิ่มขึ้นไม่เกิน 10 ps/km จะได้บิตเรท  $\times$  ระยะทาง ถึง 50 Gb/s.km ซึ่งหวังว่าจะทำได้ถึง 250 Gb/s.km [ 3 ]

3. ขนาดเล็กน้ำหนักเบา ใยนำแสงเป็นท่อนำคลื่น ในช่วงความยาวคลื่น 0.5-1.6  $\mu\text{m}$  จึงสามารถสร้างใยนำแสงทั้งส่วนที่เป็นแกน (core) แคลดดิ้ง (Cladding) และส่วนเคลือบภายนอก (Coating) เพื่อกันการขีดข่วน รวมเป็นใยนำแสงขนาดเพียง 125  $\mu\text{m}$  เส้นใยที่มีความยาว 1 กิโลเมตร ทำด้วยสารพวกซิลิกา เจือออกไซด์ของแก้ว ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ 2.3 จะมีเนื้อสารเพียง 12 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีน้ำหนักเพียง 28 กรัม แต่หากนำไปทอหุ้มเพื่อความแข็งแรง ก็จะมีขนาดโตขึ้นเป็นเคเบิลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร อาจบรรจุใยนำแสงไว้ได้ถึง 10 เส้น ในบางสถานการณ์ที่ต้องการสายเคเบิลน้ำหนักเบา เช่นบนเครื่องบิน การสื่อสารด้วยใยนำแสงจึงมีประโยชน์อย่างยิ่ง และ

ประหยัดในการขนส่ง

#### 4. มีความยืดหยุ่น ( Flexibility ) ทั้งคุณสมบัติและการเลือกใช้

เนื้อแก้วโดยทั่วไปที่เราสังเกตเห็นมักเปราะแตกหักง่ายแต่เมื่อดึงให้เป็นเส้นเล็กขนาดใยนำแสงจะสามารถโค้งงอได้ แต่ตัวใยนำแสงเองไม่ทานต่อแรงดึง หรือการโค้งงอด้วยความรุนแรงได้มากนัก การทำเป็นสายเคเบิล เพื่อส่งสัญญาณจึงต้องมีสารที่ทนต่อแรงดึง และพวกป้องกันการขีดข่วนมัดรวมกันเข้าไป จึงเพิ่มความแข็งแรงตามความต้องการที่สารที่มัดรวมเข้าไป เช่น อาจจะใช้เหล็กกล้า แต่โดยทั่วไปมักเป็นใยสังเคราะห์ สารสังเคราะห์ หรือ พวกพลาสติก เพราะมีน้ำหนักเบา ถ้าไม่ใช่สถานการณ์ที่ต้องการทนต่อการดึง หรือ การกระแทกรุนแรงแล้วจะไม่ใช้เหล็กกล้า เพราะมีน้ำหนักมาก เป็นการเพิ่มน้ำหนักเคเบิล ทำให้เสียคุณสมบัติที่น้ำหนักเบาไปเสีย การออกแบบใยนำแสงเพื่อเป็น สายเคเบิลจึงต้องมีวัสดุที่รับแรงดึงและแรงกระแทกตามที่ต้องการนำเคเบิลไปใช้งาน โดยที่ต้องให้ใยนำแสงยืดได้ไม่เกิน 1 % ของความยาว

นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบใยนำแสงรวมทั้งการทำเป็นเคเบิล ให้มีคุณสมบัติต่าง ๆ เหมาะที่จะใช้งานเฉพาะอย่างตามความต้องการ เช่น เกี่ยวกับความยาวคลื่นที่จะใช้กับแหล่งกำเนิดแสง ความเหมาะสมในการปฏิบัติงานและค่าใช้จ่าย และบางสถานการณ์สามารถสร้างให้มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น ในบริเวณที่มีกัมมันตรังสี เป็นต้น จึงทำให้ประหยัดในการนำมาใช้งานได้มากกว่า

#### 5. ปราศจากการเหนี่ยวนำเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

( Non electromagnetic induction )

ในสายทองแดงมักจะมีปัญหาเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในลักษณะต่าง ๆ ได้ เช่น

- สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากต้นกำลัง ในบริเวณที่เป็นเครื่องต้นกำลังมักจะมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความแรงมาก จะมีการเหนี่ยวนำให้เกิดการรบกวนในสายทองแดงที่นำสัญญาณ

- สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ในพื้นที่บางจุด อยู่ในบริเวณอาคารส่งวิทยุกำลังสูง สนามอาจจะเหนี่ยวนำเข้าไปรบกวนสัญญาณในอุปกรณ์อื่นได้

- การเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าข้ามคู่สาย ในการส่งสัญญาณหลายคู่สายและมีระบบกราวด์รวมการรบกวนข้ามคู่สายไปยังช่องสัญญาณอื่นกลายเป็นสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นได้เสมอในระบบที่ใช้สายทองแดง

หากใช้ระบบส่งสัญญาณด้วยใยนำแสง ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กทริก ไม่มีการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสอันเป็นสาเหตุของการรบกวนเกิดขึ้นได้ โดยเฉพาะการรบกวนข้ามช่องสัญญาณระหว่างคู่สาย จะไม่เกิดขึ้นอย่างเด็ดขาด จึงอาจนำไปใช้แก้ปัญหาแทนสายทองแดงในบางจุดได้

## 6. ลัพัญญาของการรบกวนเนื่องจากการแผ่รังสีของสารกัมมันตรังสี

( Radiation resistant )

ในพวกทองแดงหรือโลหะเมื่อถูกคลื่นกัมมันตรังสี มักจะมีการแตกตัวเป็นไอออนหรือเปลี่ยนโครงสร้างของผลึก ทำให้คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเปลี่ยนไปในใยนำแสง โครงสร้างของออกไซด์ ที่ผสมอยู่จะถูกรบกวน ทำให้มีการลดทอนสัญญาณเพิ่มขึ้นได้ 0.1 - 10 dB/km แต่สามารถออกแบบใยนำแสงที่ พิเศษใช้ในบริเวณที่มีกัมมันตรังสี [ 3 ]

## 7. ปัญหาลูปกราวด์ (Ground - loop Problem )

ในกรณีที่ต้องมีการกราวด์ เมื่อใช้ส่งสัญญาณด้วยสายทองแดง บางทีก็เกิดปัญหา เช่นในถึงน้ำมันหรือสารเป็นฉนวนอื่น หรือ เมื่อกราวด์อาจมีอันตราย การใช้ใยนำแสงใช้ส่งสัญญาณ ได้เพียงเส้นเดียว และไม่ต้องคำนึงถึงการกราวด์

## 8. มีความปลอดภัย ( Security )

ในการทำงานด้วยตัวนำที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงอาจเป็นอันตรายในการแตะต้อง จึงอาจต้องมีการหยุดการใช้งานเมื่อมีความจำเป็นต้องซ่อมบำรุงบางส่วนซึ่งส่วนที่ไม่มีการเสียหายอาจกระทบกระเทือนไปทั่ว แต่ใยนำแสงไม่มีพลังงานไฟฟ้าที่จะเป็นอันตรายเพราะใช้แหล่งกำลังไฟฟ้าต่ำ หรือไม่เป็นอันตรายจากการแตะต้องสายและปลอดภัยจากการลัดวงจรที่จะทำให้เกิดไฟไหม้

เสียหายอาจกระทบกระเทือนไปด้วย แต่ใยนำแสงไม่มีพลังงานไฟฟ้าที่จะเป็นอันตรายเพราะใช้แหล่งกำลังไฟฟ้าต่ำ หรือไม่เป็นอันตรายจากการแตกตอขั้วสายและปลอดภัยจากการลัดวงจรที่จะทำให้เกิดไฟไหม้

9. ค่าใช้จ่ายต่ำคุมค่าการดำเนินงาน (Low Cost) ถ้าหากว่าได้พัฒนาระบบการผลิตให้นำไปใช้งานได้จริง ๆ แล้ว ค่าใช้จ่ายในการผลิตมาก ๆ จะถูกลง และราคาในการเพิ่มช่องสัญญาณไม่ได้เพิ่มไปมากเช่นระบบปัจจุบัน โดยเฉพาะการสื่อสารระยะไกลจัดว่าสามารถออกแบบระบบให้ประหยัดคุมค่าได้ดีมาก

แม้ว่าใยนำแสงจะมีคุณสมบัติเหมาะสมในการ เป็นท่อนำคลื่นช่วงความถี่แสงก็ตาม แต่มีข้อจำกัดในการพัฒนาระบบการสื่อสารซึ่งต้องใช้เทคนิคค่อนข้างสูงในด้านต่าง ๆ คือ

### 1. การนำแสงเข้าใยนำแสงและการเชื่อมต่อ (Coupling, Splicing)

เนื่องจากใยนำแสงมีขนาดเล็กมาก การที่จะส่งแสงเข้าไปทำได้ยากมาก เพราะลำแสงต้องเป็นจุดเล็ก ๆ แสงจากต้นกำเนิดแสงส่วนใหญ่จึงไม่ได้เข้าสู่ใยนำแสง ประสิทธิภาพการส่งแสงจากต้นกำเนิดแสงเข้าสู่ใยนำแสงค่อนข้างต่ำ การเชื่อมต่อหรือแยกสัญญาณระหว่างใยนำแสงด้วยกันกระทำได้ยากมาก และจะมีการสูญเสียพลังงานแสงไปที่จุดนี้สูงมาก ในระบบสั้น ๆ การสูญเสียพลังงานไป ตรงจุดการเชื่อมต่อไม่ว่าระหว่างต้นกำเนิดแสงกับใยนำแสง หรือระหว่างใยนำแสงด้วยกัน หรือระหว่างใยนำแสงกับตัวรับสัญญาณแสงมากกว่าการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการลดทอนในใยนำแสงเอง

### 2. แหล่งกำเนิดแสง (Light Source)

แหล่งกำเนิดแสงต้องเป็นจุดเล็ก ๆ และมีความเข้มสูงเพื่อจะส่งให้ไครระยะทางไกลมากพอที่ไม่ต้องทวนสัญญาณโดยไม่จำเป็น (เช่นต้องไครระยะไกลพอกับความกว้างของพัลส์สองพัลส์ที่ไกลกัน เมื่อผ่านใยนำแสงแล้วความกว้างของพัลส์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการกระจายแสง แต่ยังสามารถแยกพัลส์ทั้งสองออกได้) แหล่งกำเนิดแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำสามารถทำได้ขนาดเล็กโดยเป็น LED หรือ LD LED มีปัญหาให้พลังงานแสงออกต่ำและจัดว่ายังมีขนาดใหญ่เมื่อใช้กับใยนำแสงโหมดเดี่ยวจึงใช้ได้กับการส่งสัญญาณระยะไกลกับระยะปานกลาง ส่วนระยะไกลต้องใช้ LD ให้ความเข้มแสงออกสูงและลำแสงมีขนาดเล็ก แต่มีปัญหาเรื่องอายุการใช้งาน จึงต้องมีการพัฒนาต้นกำเนิดแสงทั้งที่เป็น LED และ LD ให้มีความเข้มที่ให้แสงออกสูง ในช่วงความยาวคลื่นที่ใช้กับใยนำแสง ( 0.9 $\mu\text{m}$  หรือ 1.3  $\mu\text{m}$  หรือ 1.55  $\mu\text{m}$ ) มีแผนคิววิตกว้าง มีอายุการใช้งานเพียงพอกับความต้องการ แต่การพัฒนาสิ่งเหล่านี้จะต้องใช้เทคโนโลยี

ระดับสูง เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

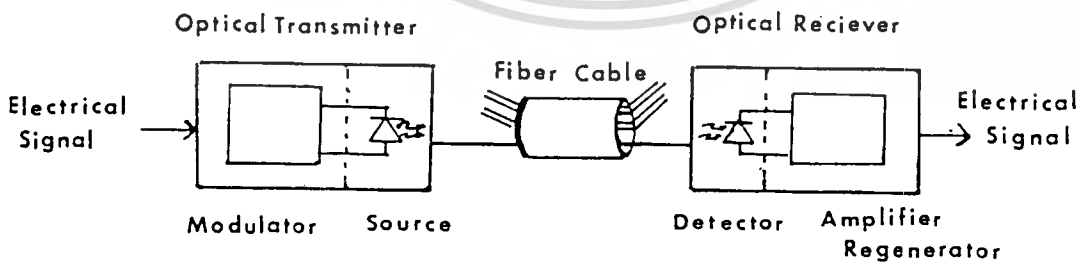
### 3. ตัวรับแสง (Photodiode)

การส่งคลื่นสัญญาณจากแหล่งกำเนิดแสงเข้าใยนำแสงจากต้นทาง จะต้องมี การรับคลื่นสัญญาณ นั้นที่ปลายทางด้วยตัวรับแสง ตัวรับแสงจึงต้องมีความไว และแบนด์วิธเพียงพอในการรับคลื่นตามคุณลักษณะ ของคลื่นแสงที่ส่งมา โดยปกติความไวกับแบนด์วิธพวกตัวรับแสงหรือโฟโตไดโอดมักสวนทางกันคือ พวก แบนด์วิธสูง ความไวมักจะต่ำ และมีราคาแพง นอกจากนี้การต้องการความไวสูง ๆ ที่แบนด์วิธสูงย่อมมี การรบกวนที่สูงด้วย จึงต้องแยกเรขาคณิตของพวกตัวรับแสงออกเพื่อให้เลือกใช้ตามเหมาะสม และต้องพัฒนา ไปให้สอดคล้องกับแหล่งกำเนิดแสง

### 4. การวิจัยและพัฒนา (Research and Development)

เนื่องจากการพัฒนาระบบใยนำแสงเพิ่งเริ่มกระทำที่จัดว่าก้าวหน้าขึ้นมาในระยะไม่เกิน 20 ปี (นับแต่มีการผลิตใยนำแสงที่มีการลดทอนสัญญาณต่ำกว่า 20 dB/km ในปี ค.ศ.1970) ซึ่งนับว่าเป็นระยะ อันสั้น การพัฒนาจึงยังไม่ถึงขีดสุด แต่ในช่วง 5-6 ปีหลังนี้การสื่อสารด้วยใยนำแสงได้ก้าวหน้าอย่าง - รวดเร็ว ตามความก้าวหน้าของเทคโนโลยีปัจจุบัน จะอย่างไรก็ตามเมื่อการพัฒนาต้องใช้เทคโนโลยีสูง จึงมักทำกันในหมู่ประเทศที่พัฒนาแล้ว ส่วนประเทศที่กำลังพัฒนาทั้งหลายให้ความสนใจน้อย การสื่อสารด้วย ใยนำแสงคงไม่ใช้การสื่อสารที่นำเข้ามาแทนสายทองแดง เพราะทรัพยากรด้านทองแดงมีจำกัดอย่างที่บางคน คิดกัน แต่การสื่อสารด้วยใยนำแสงควรเป็นระบบใหม่สำหรับที่จะใช้ในอนาคต ที่จะถึงมีผู้ใช้โดยตรง และ ต้องเข้ากันได้กับระบบปัจจุบัน

ถ้าหากพิจารณาถึงการส่งสัญญาณผ่านใยนำแสงแล้วต้องมียุคประกอบต่าง ๆ ที่สำคัญ ได้จาก ภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมสำหรับการสื่อสารด้วยใยนำแสง

อุปกรณ์ส่วนใหญ่ในบรรดาที่มีอยู่มักแปลงสิ่งที่เราต้องการ เพื่อสื่อสารกัน ให้อยู่ในรูปของ สัญญาณกระแสไฟฟ้า เช่น ไมโครโฟน โทรศัพท์ โทรทัศน์ หรือข้อมูลต่าง ๆ อาจอยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้า ที่เป็นสัญญาณอนาล็อก ( Analogue ) หรือดิจิทัล ( Digital ) เราต้องนำสัญญาณเหล่านี้มาจัดการ มอดูเลท ให้ออกเป็นสัญญาณแสงออกที่แหล่งกำเนิดแสงผ่านเข้าไปสู่ใยนำแสงซึ่งมีคุณสมบัติต่าง ๆ ทำให้รูป สัญญาณเปลี่ยนไป เช่น มีการลดทอนสัญญาณ การทำให้พัลส์มีความกว้างมากขึ้น แต่ทั้งนี้ต้องสามารถ รับ สัญญาณด้วยตัวรับแสงแล้วสามารถแปลงกลับคืนสู่ลักษณะเดิม เช่น การพูดโทรศัพท์ เสียงพูดจะถูกเปลี่ยนเป็น สัญญาณกระแสไฟฟ้า และจะต้องนำเข้ามามอดูเลทเป็นสัญญาณแสงออกที่ตัวส่งเข้าไปใยนำแสง ถึงตัวรับ เปลี่ยน สัญญาณแสงเป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้า เข้าหูโทรศัพท์ถึงผู้รับฟัง รู้เรื่องกันได้ว่าผู้พูดคนทางพูดว่าอะไร การ ส่งข่าวสาร หรือการสื่อสารกันจึงจัดว่าสมบูรณ์ จึงสมควรได้กล่าวถึงคุณสมบัติของอุปกรณ์ต่าง ๆ พอเป็น พื้นฐานเพื่อประโยชน์ในการพิจารณา เลือกใช้ให้เหมาะสมคือ

- คุณสมบัติของใยนำแสง
- แหล่งกำเนิดแสง
- ตัวรับแสง

## 2.2 คุณสมบัติของใยนำแสง

การพัฒนาการสื่อสารในระบบใยนำแสงเป็นใยนำแสงสิ่งแรกที่ควรพิจารณาคือคุณสมบัติที่สำคัญ คือตัวใยนำแสงซึ่งทำหน้าที่นำคลื่น คุณสมบัติที่สำคัญที่เกี่ยวกับการนำคลื่นคือการกระจายคลื่น (dispersion) ซึ่งเกี่ยวข้องกับแบนด์วิดธ์ของสัญญาณที่จะส่งผ่านไปได้ และการลดทอนสัญญาณ (Attenuation) ถ้าหาก แก้ปัญหาแบนด์วิดธ์ที่เกิดจากการกระจายคลื่นได้แล้ว ระยะการส่งได้ไกลแค่ไหนขึ้นอยู่กับค่าการลดทอน สัญญาณ อันเกิดจากโครงสร้างของเนื้อสารที่นำมาทำใยนำแสง กรรมวิธีการผลิตนับว่าสำคัญในการลดการ กระจายคลื่น และการลดทอนสัญญาณ ซึ่งมีวิธีผลิตแตกต่างกันหลายวิธี นำมาใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะของ ใยนำแสงที่ต้องการ เมื่อทราบถึงปัญหาคุณสมบัติในการนำคลื่นของใยนำแสงแล้ว คุณภาพสัญญาณที่ไปถึง ปลายทางเป็นอย่างไรต้องนำมาพัฒนาตัวกำเนิดสัญญาณแสง และตัวรับควบคู่กันต่อไป

คุณสมบัติที่ทนต่อการนำคลื่นของใยนำแสงซึ่งเป็นตัวกลางโปร่งใสทำมาจากสารพวกไดออกไซด์ซิลิกา มี ซิลิกาเป็นส่วนประกอบหลัก เติมสารประกอบออกไซด์บางชนิดเจือลงไปเพื่อให้ได้โครงสร้างของเนื้อแก้ว ที่ขึ้น ลดค่าการกระจายแสงและการลดทอนสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงผ่านใยนำแสงไปได้โดยอาศัยการสะท้อนกลับหมด

(Total Internal Reflection = TIR)



ภาพที่ 2.2 แสดงส่วนสำคัญของใยนำแสงคือส่วนแกน แคลคูลิง และส่วนเคลือบภายนอก

ดัชนีหักเหของแกนมีค่ามากกว่าส่วนที่เป็นแคลคูลิง ทำให้เกิดมุมรับแสงค่าหนึ่งเรียก Numerical Aperture (NA) โดยแสงที่ตกกระทบผ่านเข้าไปด้วยค่าของมุมนี้ จะเคลื่อนที่สะท้อนไปมาในท่อนำแสงได้ ใยนำแสงที่ผลิตขึ้นมาในปัจจุบันเพื่อให้เหมาะกับการใช้งานมี 3 แบบคือ

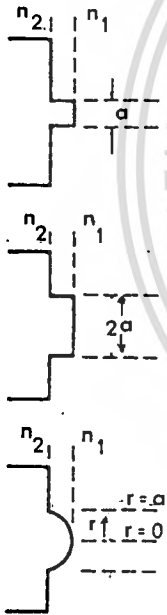
1. แบบหลายโหมดการกระจายของดัชนีหักเหแบบขั้นบันได (Multimode Step Index Fiber)
2. แบบหลายโหมดการกระจายของดัชนีหักเหแบบเกรด (Multimode Graded Index Fiber)
3. แบบโหมดเดียวการกระจายของดัชนีหักเหแบบขั้นบันได (Single Mode Fiber)

ทั้งสามชนิดอาจเรียกสั้น ๆ ได้ว่า

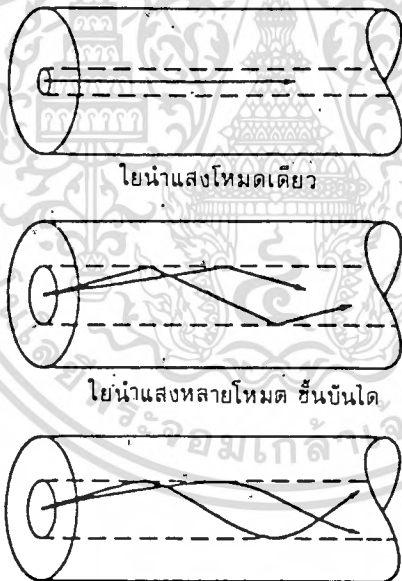
- แบบขั้นบันได ( Step Index = SI )
- แบบเกรด ( Graded Index = GI )
- แบบโหมดเดียว ( Single Mode = SM )

ในระบบง่าย ๆ มุ่งที่ราคาถูกทำได้สะดวก ใช้ใยนำแสงหลายโหมดแบบขั้นบันได เป็นพวกแก้วทั้งแกน และแคลคูลิง หรือแกนแก้วแคลคูลิงพลาสติก ( Plastic - clad ) หรือพลาสติกทั้งหมด

การกระจาย  
ดรรชนีหักเห



ใยนำแสงแบบต่างๆ และ  
ทางเดินของแสง



ขนาดของใยนำแสง

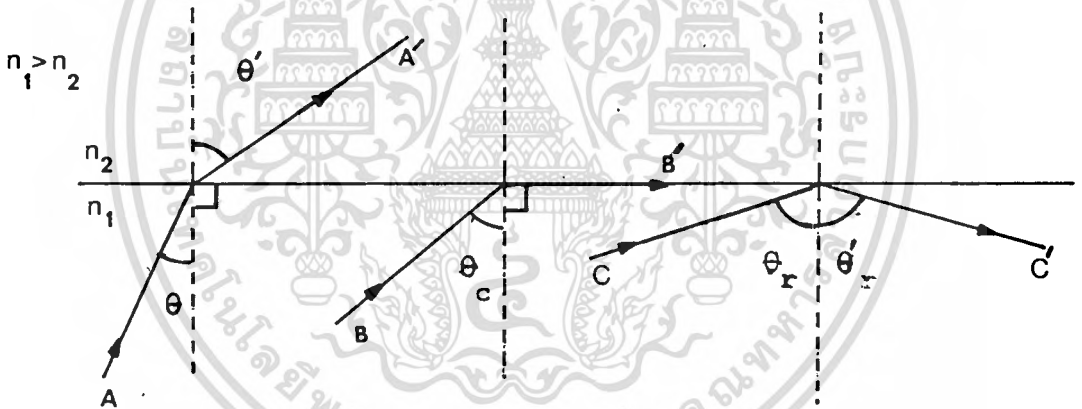
เคสลดตึง	125 $\mu\text{m}$
แกน	8 - 12 $\mu\text{m}$
เคสลดตึง	125 - 400 $\mu\text{m}$
แกน	50 - 200 $\mu\text{m}$
เคสลดตึง	125 $\mu\text{m}$
แกน	50 $\mu\text{m}$

ใยนำแสงแบบเกรด

ภาพที่ 2.3 แสดงใยนำแสงแบบต่าง การกระจายดรรชนีหักเห และ  
แนวการเคลื่อนที่ของลำแสง [1]

### ใยนำแสงแบบขั้นบันได (Step-index Fibers)

การส่งสัญญาณด้วยใยนำแสงในระยะสั้น และสะดวกในการปฏิบัติงาน ทั้งการเชื่อมต่อและการส่งพลังงานแสงเข้าสู่ใยนำแสง นิยมใช้ใยนำแสงแบบขั้นบันได มีขนาดของแกนใหญ่กว่าขนาดความยาวคลื่นหลายเท่า จึงอาจจะใช้เรขาคณิตของแสงมาวิเคราะห์ได้ เพราะถือว่าลำแสงมีขนาดใหญ่ (การวิเคราะห์ที่ซับซ้อน ในลักษณะท่อนำคลื่น ตัวกลางเป็นสารไดอิเล็กทริกต้องใช้สมการของแมกเวลล์) สิ่งสำคัญของใยนำแสงหลายโหมดแบบขั้นบันไดคือ พื้นที่หน้าตัดรับแสง ซึ่งเรียกว่า N.A. (Numerical Aperture) เกี่ยวกับพลังงานแสงที่จะเข้าสู่ใยนำแสง และการกระจายแสงอันเนื่องมาจากทิศทางของลำแสงที่เข้าสู่ใยนำแสงทำมุมกับแกนมากน้อยต่างกัน ซึ่งเรียกว่าการกระจายแสงเนื่องจากโหมด(modal dispersion)



ภาพที่ 2.4 แสดงการหักเหและการสะท้อนกลับหมดของลำแสงที่ออกจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเห มากกว่าตัวกลางที่มีดัชนีหักเหน้อยกว่า [3]

- a) การหักเหตาม Snell's law  $n_1 \sin \theta = n_2 \sin \theta'$
- b) มุมตกกระทบเท่ากับมุมวิกฤติ  $n_1 \sin \theta_c = n_2$
- c) การสะท้อนกลับหมด  $\theta_r = \theta'_r$

จาก  $n_1 \sin \theta = n_2 \sin \theta'$

$n_1, n_2$  คือดัชนีหักเหของตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2 ตามลำดับ และ  $n_1 > n_2$

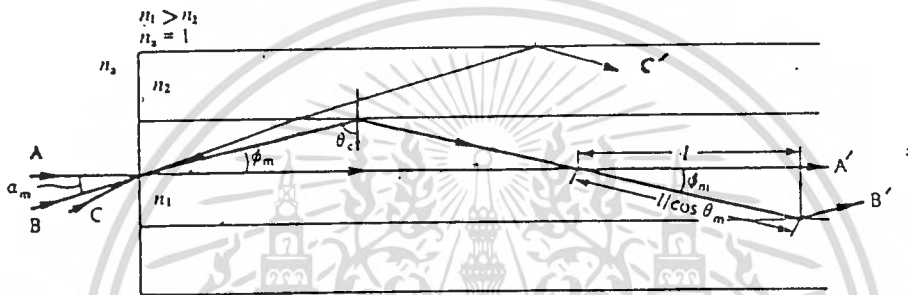
$\theta, \theta'$  เป็นมุมตกกระทบของรังสีตกกระทบและรังสีหักเห ซึ่งกระทำกับเส้นปกติตามลำดับ

กรณีที่มุมตกกระทบที่เป็นมุมวิกฤติ  $\theta_c$  ทำให้เกิดมุมหักเห  $\theta' = \pi/2$  จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานโดยไม่ได้รับอนุญาต (2.1) ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าหากว่า มุมตกกระทบมีค่ามากกว่า  $\theta_c$  จะเกิดการสะท้อนกลับหมดที่ผิวรอยต่อของตัวกลาง ซึ่งเป็นหลักการที่นำมาใช้ส่งสัญญาณความถี่แสงผ่านใยนำแสง โดยมีแกนกลาง ( core ) รูปทรงกระบอกยาวมี ดรรชนีหักเห  $n_1$  และส่วนห่อหุ้มรอบแกนคือ แคลคดิง ( Cladding ) มีดรรชนีหักเห  $n_2$  โดย  $n_1 > n_2$  สองส่วนนี้มีความสำคัญต่อการนำคลื่น ส่วนประกอบอื่นที่ห่อหุ้มเข้าไปภายนอกเพื่อจุดประสงค์เฉพาะอย่างอื่น เช่น กันการขีดข่วน เพื่อความแข็งแรง กันความชื้น



ภาพที่ 2.5 แสดงขนาดรับแสงเข้าสู่ใยนำแสง ซึ่งต้องเป็นบริเวณที่ลำแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเข้าสู่ใยนำแสง โดยมีมุมตกกระทบโตกว่ามุมวิกฤติ [3]

ลำแสง AA' เคลื่อนตามแนวแกนของใยนำแสงไม่มีการหักเหและสะท้อนที่ผิวใด ๆ  
 CC' ลำแสงตกกระทบบนที่เข้าสู่ใยนำแสงแล้วมีมุมตกกระทบที่ผิวรอยต่อของแกนกับแคลคดิงโตกว่ามุมวิกฤติจะหักเหเข้าไปสู่แคลคดิง และมักจะถูกหักเหจนจางหายไปที่สุดในที่สุด

BB' ลำแสงที่ตกกระทบบนแนวทำมุมกับแกน  $\alpha$  เข้าสู่ใยนำแสงไปตกกระทบบนผิวรอยต่อของแกนกับแคลคดิง เป็นมุมเท่ากับมุมวิกฤติ ( $\theta_c$ ) ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมด

ถ้าแสงออกจากอากาศ  $n_a = 1$  เข้าสู่ใยนำแสง  
 พิจารณาได้ว่า

$$n_a \sin \alpha = n_1 \sin \theta = n_1 \sin (\pi/2 - \theta_c)$$

$$\sin \alpha = n_1 \cos \theta_c$$

จากสมการ (2.1)

$$n_1 \sin \theta_c = n_2$$

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\sin \theta_c = \sqrt{1 - \cos^2 \theta_c} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\cos^2 \theta_c = 1 - (n_2/n_1)^2$$

$$\cos \theta_c = \frac{(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}}{n_1}$$

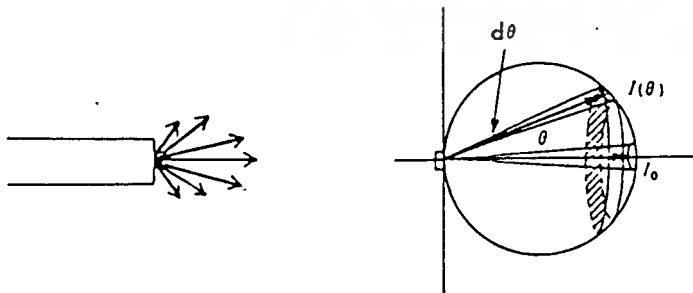
$$\sin a_m = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

$$\Delta n = n_1 - n_2$$

$$n = \frac{n_1 + n_2}{2}$$

$$NA = \sin a_m = (2n \Delta n)^{1/2} \dots \dots \dots (2.2)$$

จากสมการ (2.2) พิจารณาความสามารถในการที่จะให้แสงเข้าสู่ใยนำแสงได้จาก NA (Numerical Aperture) สังเกตได้ว่าการรับแสงเข้าสู่ใยนำแสงขึ้นอยู่กับค่า NA จะมีค่ามากที่สุดเมื่อ  $\Delta n$  มีค่ามากที่สุดคือแคลคิติงเป็นอากาศ แกนเป็นเนื้อแก้ว



ภาพที่ 2.6 แสดงแสงออกจากแหล่งกำเนิดแสงขนาดเล็กในพื้นที่หน่วยมุมตัน

โดยที่  $d\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta$  [3]

พลังงานแสงแผ่รังสีออกในหนึ่งหน่วยมุมตัน (Solid angle) ที่มุม  $\theta$  ใด ๆ ซึ่งทำกับแนวตั้งฉากของพื้นที่กระจายแสงออก

$$I(\theta) = I_0 \cos \theta$$

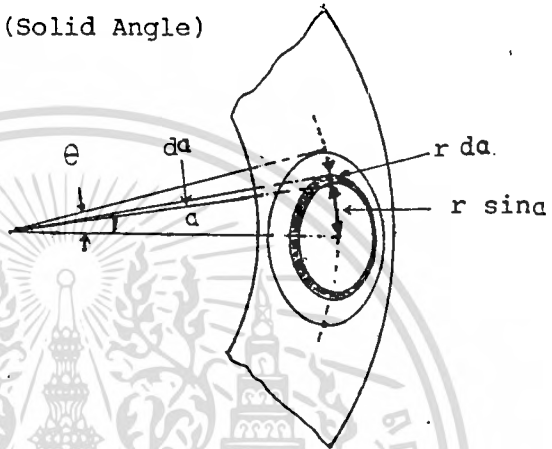
พลังงานทั้งหมด  $\Phi_0$  ที่ออกจากแหล่งกำเนิดแสง

$$\Phi_0 = \int_{\Omega} I(\theta) d\Omega$$

$\Omega$  = มุมตัน (Solid Angle)

ภาพที่ 2.7

แสดงพลังแสงออกจากแหล่งกำเนิดแสงในหน่วยมุมตัน



พื้นที่แถบแรเงา  $dA = 2\pi(r \sin \theta)(r d\theta)$

$$A = \int dA = \int_0^\theta 2\pi r^2 \sin \theta \cdot d\theta$$

$$= 2\pi r^2 [-\cos \theta]_0^\theta$$

$$= 2\pi r^2 (1 - \cos \theta)$$

$$\Omega = \frac{A}{r^2} = 2\pi(1 - \cos \theta)$$

$$d\Omega = 2\pi d(1 - \cos \theta) = 2\pi \sin \theta d\theta \dots\dots\dots(2.3)$$

$$\Phi_0 = \int_0^{\pi/2} I_0 \cos \theta (2\pi \sin \theta d\theta)$$

$$= -2\pi I_0 \left[ \frac{1}{2} \cos^2 \theta \right]_0^{\pi/2}$$

$$= \pi I_0 \dots\dots\dots (2.4)$$

พลังงานแสงที่ออกจากแหล่งกำเนิดแสงจะเข้าสู่โขนำแสงได้ทั้งหมด หรือมากที่สุดเมื่อโขนำแสงมีขนาดโตกว่าโขนำแสงปริมาณแสง  $\Phi$  ที่เข้าสู่โขนำแสงได้

$$\begin{aligned} \Phi &= \int I(\theta) d\Omega \\ &= \int_0^{\alpha_m} I_0 \cos \theta \cdot 2\pi \sin \theta d\theta \\ &= I_0 \pi [\cos^2 \theta]_0^{\alpha_m} \\ &= I_0 \pi (1 - \cos^2 \alpha_m) \\ &= I_0 \pi \sin^2 \alpha_m = I_0 \pi (NA)^2 \dots \dots \dots (2.5) \\ \frac{\Phi}{\Phi_0} &= (NA)^2 = 2n \Delta n \dots \dots \dots (2.6) \end{aligned}$$

อัตราส่วนของแสงที่จะเข้าไปสู่อินพุทแสงได้เมื่อเทียบกับที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงขนาดเล็ก เท่ากับ  $(NA)^2$  จะมีค่ามากเมื่อ  $n$  และ  $\Delta n$  มีค่ามาก แต่จำเป็นต้องทำการทอหุ้มแกนใยนำแสงด้วยเคลดดิ้งแทนที่จะให้เป็นอากาศดังกล่าวยแล้ว เพื่อให้มีครรชนหักเหที่ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามต้องการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม และกันการรบกวนข้ามสายเมื่อใยนำแสงสัมผัสกัน แต่จะเลือกเอาสารที่เป็นเคลดดิ้งที่มีครรชนหักเหน้อยกว่าแกนเพียงเล็กน้อยทำให้เกิดผล 3 ประการ [ 3 ]

1. ถ้าเคลดดิ้งมีความหนาแน่นมากพอจะมีการลดทอนต่อลำแสงที่เข้าไปในบริเวณเคลดดิ้งและจางหายไปไม่สามารถกลับเข้ามารบกวนในบริเวณแกนได้
2. การกระจายแสงเนื่องจากโหมดจะน้อยลง ทำให้มีแบนด์วิดธ์มากขึ้น
3. พลังงานแสงที่จะเข้าไปสู่อินพุทแสงได้น้อยลงประการที่ 1 และ 2 เป็นความต้องการที่สำคัญ แม้ประการที่ 3 จะเป็นข้อเสีย แต่มีวิธีที่จะเพิ่มพลังงานให้เข้าไปสู่อินพุทแสงได้ด้วยวิธีอื่น และแม้พลังงานแสงจะเข้าไปสู่อินพุทแสงได้เพียงเล็กน้อย แต่ก็ยังส่งสัญญาณได้ไกลเพียงพอกับความต้องการจึงมักจะให้ค่า  $n_1 \approx n_2$  มีเงื่อนไขคือ

$\Delta = (n_1 - n_2) / n_1$  ไม่เกิน 1 % แต่จะทำให้รับแสงจากแหล่งกำเนิดแสงได้น้อยลง

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = [(n_1 - n_2)(n_1 + n_2)]^{1/2}$$

เมื่อ  $\Delta = (n_1 - n_2) / n_1$        $n_1 \approx n_2$

$$\begin{aligned} NA &\approx [2n_1(n_1 - n_2)]^{1/2} = n_1 [2(n_1 - n_2) / n_1]^{1/2} \\ NA &\approx n_1 \sqrt{2\Delta} \dots \dots \dots (2.7) \end{aligned}$$

ปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งของใยนำแสงแบบชั้นบันไดคือ การกระจายแสงอันเนื่องมาจากโหมด (modal dispersion)

ตามภาพที่ 2.5 ลำแสงที่อยู่ในแนวอนซึ่งถือว่ามีค่าโหมดนับเบอร์ต่ำ (mode number หรือ mode order) ส่วนลำแสงที่ทำมุมกับแนวแกนยิ่งมาก ยิ่งมีโหมดนับเบอร์มาก โหมดต่างกันจะใช้เวลาในการผ่านใยนำแสงต่างกัน จึงทำให้เกิดการกระจายแสง ถ้าสัญญาณเป็นพัลส์ ก็จะกระจายกว้างออก ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับแบนด์วิดท์ สามารถใช้คุณสมบัติทางเรขาคณิตของลำแสงและ Snell's Law มาวิเคราะห์ได้

ความเร็วแสง  $v$  ในตัวกลางใด ๆ

$$v = c/n$$

ลำแสงที่เคลื่อนที่ในแนวแกนระยะ  $l$  ใช้เวลา  $t_0$

$$t_0 = n_1 l / c$$

โหมดสูง ลำแสงจะเคลื่อนเป็นระยะทาง  $l / \cos \phi_m$  ใช้เวลา

$$t_m = \frac{n_1 l}{c \cos \phi_m}$$

จาก  $\theta_c = 90^\circ - \phi_m$

$$\therefore \cos \phi_m = \sin \theta_c = \frac{n_1}{n_2}$$

$$\therefore t_m = \frac{n_1^2 l}{n_2 c}$$

ให้  $t_m - t_0 = \Delta T = \frac{n_1^2 l}{n_2 c} - \frac{n_1 l}{c} = \frac{n_1 l}{n_2 c} (n_1 - n_2)$

$$= \frac{n_1 l}{n_2 c} \Delta n$$

$$\Delta T / l = \frac{n_1}{n_2} \frac{\Delta n}{c} \dots \dots \dots (2.8)$$

ถ้าหาก  $n_1 \approx n_2 \gg \Delta n$

$$\Delta T / l \approx \Delta n / c = n_1 \cdot \Delta / c \dots \dots \dots (2.9)$$

เช่น ในใยนำแสงแบบชั้นบันได ตามภาพที่ 2.8

$$n = \frac{n_1 + n_2}{2} = 1.5 \quad \Delta n = 0.01$$

$$\frac{\Delta T}{L} = 0.01/3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$= 33 \text{ ns/km}$$

ถ้าหากสัญญาณเป็นพัลส์แคบมาก เมื่อสัญญาณถึงปลายอีกด้านหนึ่งของใยนำแสงที่ยาว 1 กิโลเมตร ความกว้างของพัลส์จะเป็น  $\Delta T$  แบนด์วิดธ์ ที่พิจารณาจากที่สามารถแยกพัลส์ติดกันออกจากกันได้ โดยพัลส์สองพัลส์ห่างกันเป็นช่วงเวลา  $2 \cdot \Delta T$  จึงหาแบนด์วิดธ์ได้

$$B \approx \frac{1}{2 \cdot \Delta T}$$

$$B \cdot L \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{\Delta n} = 15 \text{ MHz} \cdot \text{km}$$

ใยนำแสงแบบชั้นบันไดจึงความีแบนด์วิดธ์ค่อนข้างต่ำ จึงเหมาะกับการส่งสัญญาณในระยะสั้น เพราะใยนำแสงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ ประสิทธิภาพในการรับแสงจากแหล่งกำเนิดแสงสูง จึงทำให้ง่าย การแก้ปัญหาเรื่องแบนด์วิดธ์ จากข้อจำกัดของการกระจายแสงเนื่องจากโหมดต่างกัน ทำได้โดยใช้ใยนำแสงแบบเกรต หรือแบบโหมดเดียว ที่ความยาวคลื่น  $1.3 \mu\text{m}$  อาจขยายแบนด์วิดธ์ได้ถึง 1 GHz.km หรือ 50 GHz.km ตามลำดับ แต่นอกเหนือไปจากระบบที่จะนำมากล่าวถึงในที่นี้

### 2.3 คุณภาพสัญญาณเมื่อผ่านใยนำแสง

ในการรับการส่งสัญญาณ ต้องการให้สัญญาณส่งไปได้ไกลมากที่สุด และมีการผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณน้อยที่สุด การลดทอนสัญญาณทำให้แสงไปถึงปลายใยนำแสงอีกด้านหนึ่งน้อย เกิดจากการดูดกลืนพลังงานของเนื้อสาร ( adsorption ) และการกระจัดกระจายแสง ( scattering ) สำหรับการผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณเมื่อผ่านใยนำแสง คือ พัลส์จะกว้างออก เนื่องจากการกระจายแสงโดยทั่วไปมีการกระจายแสงเนื่องจากโหมดต่างกัน ( modal dispersion ) การกระจายแสงเนื่องจากเนื้อสาร ( material dispersion ) และการกระจายแสงเนื่องจากคุณสมบัติของท่อนำคลื่น ( waveguide dispersion )

## การลดทอนสัญญาณ ( Attenuation )

เป็นคุณสมบัติของสารโปร่งใสที่ยอมให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น แสงผ่านทะลุไปได้ โดยมีการสูญเสียพลังงานไป เนื่องจากเนื้อสารทั้งในส่วนที่เป็นโครงสร้างระดับผลึก โมเลกุล และอนุภาค หรือไอออนภายในโมเลกุล ในใยนำแสงที่ผลิตได้ในปี ค.ศ.1970 มีการลดทอนสัญญาณต่ำกว่า 20 dB/km ได้รับการปรับปรุง จนในปี ค.ศ.1980 ผลิตใยนำแสงที่ลดทอนสัญญาณ 0.2 dB/km มีความยาวคลื่น 1.55 ไมครอน ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงเป็นคุณสมบัติสำคัญโดยตรงต่อการลดทอนสัญญาณการผลิตราย - นำแสงจึงทำเฉพาะให้มีการลดทอนสัญญาณที่ความยาวคลื่นใดก็ตามที่น้อยที่สุดได้ แต่เป็นเรื่องที่ไม่ดีนัก ใยนำแสงที่ดีใช้งานได้ทั่วไป ต้องมีการลดทอนสัญญาณที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะในช่วงคลื่นที่ใช้กับการสื่อสารด้วยใยนำแสง คือ 0.8 - 1.7 ไมครอน

การลดทอนสัญญาณในใยนำแสงมีสาเหตุใหญ่สำคัญคือ การดูดกลืนพลังงาน ( Absorption ) กับการกระจัดกระจายแสง ( Scattering ) แต่อาจมีการสูญเสียพลังงานไปโดยลักษณะอื่นอีก เช่น การแผ่รังสี ( Radiation losses ) ของโหมคสูง ๆ อันเกิดจากการงอโค้ง ( หรือเรียกว่า bending losses ) แต่ถ้าหากมีการระวังป้องกันให้ดี การสูญเสียพลังงานไปเนื่องจากสาเหตุสุดท้ายจะเกิดขึ้นได้น้อยมาก

### การดูดกลืนพลังงาน ( Absorption losses )

เกิดจากเนื้อสารที่ทำใยนำแสงดูดกลืนพลังงานในส่วนที่เป็นโครงสร้างของผลึกที่เกิดจากอะตอมของสารต่าง ๆ พลังงานที่ดูดกลืนมีทั้งในระดับอิเล็กทรอนิกส์ และการสั่นของอะตอม การดูดกลืนพลังงานพิจารณาตามโครงสร้างอะตอม มีสาเหตุใหญ่ 3 ประการคือ atomic defect absorption extrinsic absorption และ intrinsic absorption

1. Atomic defect absorption เกิดจากความบกพร่องของโครงสร้างผลึก มีการรวมตัวของอะตอมในผลึกบางอะตอม มีแรงยึดเหนี่ยวที่ไม่มั่นคงพอ ใยนำแสงเนื้อแก้วส่วนใหญ่เป็น  $SiO_2$  ซึ่งมีโครงสร้างของผลึกที่สมบูรณ์ แต่มีความประสงค์บางอย่างในการเติมสารเจือลงไป เช่น  $GeO_2$  เพื่อการกระจายดรรชนีหักเห หรือสารเจือบางชนิด เพื่อการดูดกลืนแสงหรือการกระจายแสงที่บางช่วง ความยาวคลื่นสั้นลงเพื่อขยายแบนด์วิดท์ สารเจือที่เติมลงไปอยู่ในรูปของออกไซด์ เกิดมีออกซิเจนบางอะตอมอยู่ในผลึกมีพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง เมื่ออยู่ในสนามของการแผ่รังสีที่รุนแรง จะทำให้ออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีแรงยึดเหนี่ยวไม่แข็งแรงแตกตัวเป็นไอออนจะมีการดูดกลืนพลังงานแสงเพิ่มขึ้นได้ 1-10 dB/km แต่ใยนำแสงที่ใช้ในภาวะปกติการดูดกลืนในกรณีนี้จะไม่เกิดขึ้น จึงควรระวังกับใยนำแสงที่ใช้ในบริเวณที่มีแก๊สมันสภาพรุนแรงที่ต้องหาใยนำแสงพิเศษ หรือคิดค่าการลดทอนสัญญาณเพื่อไว้ในระบบ

2. Extrinsic absorption เกิดจากความไม่บริสุทธิ์ของเนื้อแก้ว เช่นการเปราะเปื้อนจากขบวนการผลิตทุกลำดับอะตอมของโลหะที่แทรกเข้าไปอยู่ในผลึก จะมีผลต่อการลดทอนสัญญาณได้มาก โดยเฉพาะ OH จะมีการเปราะเปื้อนหรือแพร่เข้าไปได้ง่ายที่สุดตั้งแต่ลำดับที่ทำปฏิกิริยาเคมีและแหล่งที่เป็นเปลวให้ความร้อน ใยนำแสงที่มีการลดทอนสัญญาณต่ำจึงต้องมีกรรมวิธีในการผลิตที่มีการเปราะเปื้อน OH น้อยที่สุด และมีกรรมวิธีในการไล่ OH ไฮโดรเจนที่เข้าไปอยู่แม้เพียง 1 ในล้านส่วนจะมีผลต่อการลดทอนสัญญาณมาก การดูดกลืนพลังงานของ OH เกิดจากแสง ทำให้อนุมูล OH สั่นเป็นการเพิ่มพลังงานจนและกลายเป็นความร้อน มีความถี่ fundamental ( $f_o$ ) อยู่ที่ความยาวคลื่น 2.73  $\mu\text{m}$  มีฮาร์โมนิกที่สอง ( Second harmonic ) ที่ 1.4  $\mu\text{m}$  ฮาร์โมนิกที่สามที่ 0.950  $\mu\text{m}$  และฮาร์โมนิกสี่ที่ความยาวคลื่น 0.725  $\mu\text{m}$  ซึ่งเป็นช่วงสำคัญของการสื่อสารด้วยใยนำแสง และเมื่อประกอบกับผลที่เกิดจากการ resonance ของ Si-O เมื่อเป็นส่วนประกอบจะอยู่ที่ความถี่  $f_s$  ที่ความยาวคลื่น 12.5  $\mu\text{m}$

ตารางที่ 2.1 แสดงการดูดกลืนเนื่องจาก  $\text{OH}^-$  [3]

ความยาวคลื่นที่เกิดการ resonance โดยประมาณ ( $\mu\text{m}$ )	ความถี่ resonance	การดูดกลืนโดยประมาณเมื่อมี $\text{OH}^-$ 1 ในล้านส่วน (dB/km)
1.39	$2f_o$	65
1.24	$2f_o + f_s$	2.3
1.13	$2f_o + 2f_s$	0.1
0.95	$3f_o$	1
0.88	$3f_o + f_s$	0.1
0.72	$4f_o$	0.05

ใยน้ำแสงที่มี  $P_2O_5$  เป็นส่วนประกอบ จะมีการกำหนดเนื่องจาก P-OH ที่ 3.05  $\mu\text{m}$  ซึ่งมีสารโมโนคิสต์ระหว่าง 1.5 กับ 1.6  $\mu\text{m}$  ดังนั้นใยน้ำแสงที่ต้องการใช้ความยาวคลื่น 1.2, 1.3 หรือ 1.6  $\mu\text{m}$  ต้องมี OH อยู่ไม่เกิน 1 ใน 100 ล้านส่วน ส่วนที่ความยาวคลื่น 0.8 หรือ 0.9  $\mu\text{m}$  1 ในล้านส่วนก็จัดว่าเพียงพอ

3. Intrinsic absorption เกิดภายในโมเลกุลของสารที่ทำใยน้ำแสง ซึ่งส่วนใหญ่เป็น  $SiO_2$  มีการจัดรูปผลึก พลังงานระดับอิเล็กทรอนิกส์ และการสั่นของอะตอมในผลึก จะถูกดูดกลืนโดยถ่ายเทให้กับอิเล็กตรอนในผลึก ซึ่งจะอยู่ในช่วงความถี่ของอุลตราไวโอเล็ต (u.v.) ส่วนการดูดกลืนพลังงานเป็นการสั่นสะเทือนของอะตอม โดยมีการกำหนดกับความถี่ตัวเอง และสารโมโนคิสต์ สารที่มักนำมาทำเป็นส่วนประกอบใยน้ำแสงมีความถี่ fundamental

Si - O	9.0 $\mu\text{m}$	- ส่วนประกอบส่วนใหญ่ในใยน้ำแสง
Ge - O	11.0 $\mu\text{m}$	- เจือเพื่อการกระจายตรงขึ้นหักเห
P - O	8.0 $\mu\text{m}$	" "
B - O	7.3 $\mu\text{m}$	" "

การกำหนดในระดับอิเล็กทรอนิกส์ มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 0.3  $\mu\text{m}$  ส่วนระดับการสั่นของอะตอม มีสารโมโนคิสต์ที่ความยาวคลื่นสูงกว่า 1.8  $\mu\text{m}$  จึงไม่ค่อยมีผลในการสื่อสารด้วยใยน้ำแสงเพราะนิยมใช้ความถี่ 0.7-1.7  $\mu\text{m}$  เท่านั้น ซึ่งเป็นช่วงที่มีการกระจายแสงและการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดทำให้เกิดการลดทอนไม่เกิน 1 dB

การกระจัดกระจายแสง ( Scattering losses )

โดยธรรมชาติโครงสร้างของเนื้อแก้วหรือวัสดุโปร่งใสโดยทั่วไปมีความหนาแน่นโมเลกุลไม่สม่ำเสมอ และความไม่สม่ำเสมอของการกระจายของสารที่เจือเป็นส่วนประกอบในเนื้อแก้วที่เกิดจากขบวนการผลิต มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเห ซึ่งเกี่ยวข้องกับควมยาวคลื่นของแสงโดยตรง เมื่อแสงผ่านไปโมเลกุลหรือผลึกของเนื้อแก้ว ทำให้เกิดการกระจัดกระจายแสง เรียกว่า Rayleigh scattering ทำนองเดียวกับการกระจายแสงอาทิตย์ เนื่องจากบรรยากาศของโลกทำให้ท้องฟ้าเป็นสีน้ำเงิน เมื่อส่งแสงสว่างผ่านใยนำแสงทำให้มองเห็นเป็นเส้นสว่างได้ ถ้าผลึกมีเม็ดละเอียดการกระจายแสงจะน้อยลง การลดทอนสัญญาณเนื่องจากการกระจายแสงมีองค์ประกอบซับซ้อนยุ่งยากหลายอย่าง สรุปได้ว่าการกระจัดกระจายแสงเป็นส่วนผกผันกับกำลังสี่ของความยาวคลื่น ถ้าหากให้แสงผ่านตัวกลางโปร่งแสงที่มีดัชนีหักเห  $n$  หนา  $e$  มีความหนาแน่นอะตอมต่อพื้นที่หน้าตัด  $N$  เมื่อ  $a$  แทนการกระจัดกระจายแสงจะหาความสัมพันธ์ได้ว่า

$$a - 1 = \frac{\lambda^2}{2x\pi} \sqrt{a N} \dots\dots\dots 2.10$$

ในกรณีแสงผ่านใยนำแสง พอลจะเขียนเป็นสมการเพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ขององค์ประกอบที่เกี่ยวข้องได้อีกแบบหนึ่ง

$$a = \frac{8\pi^3}{3\lambda} (\delta n^2)^2 \delta V \dots\dots\dots 2.11$$

โดย  $\delta n$  หมายถึง ความไม่สม่ำเสมอของดัชนีหักเหในปริมาตร  $\delta V$

การวิเคราะห์การสูญเสียพลังงานเชิงทฤษฎีกระทำไคค่อนข้างยาก แต่อาจทำการทดลองผลการกระจัดกระจายแสงของใยนำแสงที่มีความยาวคลื่นอันหนึ่ง ก็สามารถนำมาพิจารณาการลดทอนสัญญาณในระบบได้

$$a = R \lambda^{-4} \text{ dB/km}$$

$$R = \text{ค่าคงที่จากการวัด dB/km} \cdot \mu\text{m}^{-4}$$

$$\lambda = \text{มีหน่วยเป็น } \mu\text{m}$$

การผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณ ( Signal distortion in optical fiber waveguide )

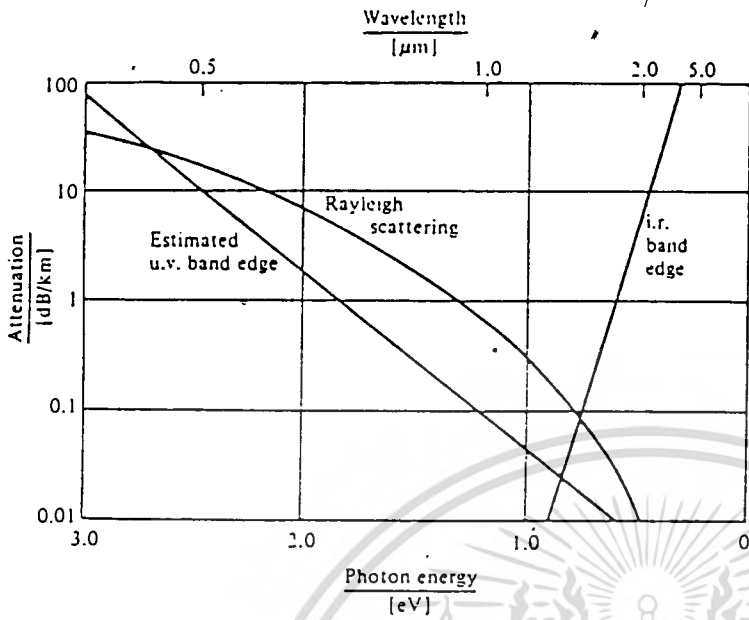
สัญญาณแสงเมื่อผ่านไปตามใยนำแสงยิ่งความยาวมากเท่าไร ความผิดเพี้ยนของสัญญาณจะยิ่งมีมากขึ้น .เกิดจากการกระจายแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันออกจากกัน เมื่อสัญญาณเป็นพัลส์(pulses) ความเร็วของพัลส์ในใยนำแสงถือเป็นความเร็วกลุ่มคลื่น (group velocity ) คุณสมบัติของตัวกลางที่เป็นท่อนำแสง มีผลให้พัลส์กว้างออก มีสาเหตุสำคัญ 3 ประการคือ

1. การกระจายแสงเนื่องจากโหมด (modal dispersion ) ในใยนำแสงแบบหลายโหมด โหมดคัมเบอร์สูงจะมีการเคลื่อนที่สะท้อนไปมาในส่วนที่เป็นแกนของใยนำแสง ระยะทางในการเคลื่อนที่มากจึงไปถึงปลายใยนำแสงหลังโหมดคัมเบอร์ต่ำหรือพวกที่อยู่ในแนวแกน แก้ไขได้จากการทำใยนำแสงแบบเกรดดิ่งที่โคกลางถึงแล้วในตอนต้น แต่ไม่ได้หมายความว่า การกระจายแสงเนื่องจากโหมดจะแก้ไขได้หมดด้วยใยนำแสงแบบเกรด .เพราะมีความไม่สม่ำเสมอของเนื้อแก้ว และการกระจายตรงนี้หักเหของใยนำแสง
2. การกระจายแสงเนื่องจากคุณสมบัติของเนื้อสาร(material dispersion ) เกิดจากตรงนี้หักเหของตัวกลางเป็นฟังก์ชัน ( function ) ของความยาวคลื่น การเปลี่ยนแปลงของตรงนี้หักเหและความกว้างของสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง จึงกระจายแสงให้พัลส์กว้างออกได้
3. การกระจายแสงเนื่องจากคุณสมบัติท่อนำคลื่น (waveguide dispersion ) ในคลื่นแต่ละโหมด กำหนดค่าคงที่ในการเคลื่อนที่ในตัวกลางของแต่ละโหมดด้วยค่า  $\beta$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ  $a/\lambda$  เมื่อ  $a$  เป็นรัศมีของแกนใยนำแสง และ  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่น ในใยนำแสงแบบหลายโหมดไม่ต้องคำนึงถึงค่านี้

แม้เราจะแยกแยะสาเหตุการกระจายแสงได้ 3 ประการและทำการทดลองได้ในห้องปฏิบัติการ แต่ยังมีสาเหตุที่ไม่แน่นอนอื่น ๆ อีก เช่น การกระจายตรงนี้หักเหไม่สม่ำเสมอ ภาวะของพลังงานแสงที่เข้าสู่ใยนำแสงโดยพลังงานของแต่ละโหมดไม่เท่ากัน การลดทอนของแต่ละโหมดไม่เท่ากัน โหมดมีการสอดแทรกกัน ซึ่งยากที่จะศึกษาเฉพาะลงไปอย่างแน่นอนได้

ในใยนำแสงชั้นบันไดหลายโหมดนั้นค่าการกระจายแสงที่สำคัญเกิดเนื่องจากโหมดต่างกัน และเป็นตัวกำหนดแบนด์วิดธ์ ส่วนการกระจายแสงเนื่องจากค่าอื่น ๆ เมื่อนำมาเทียบกันแล้วมีค่าน้อยมากจนไม่ต้องคำนึงถึงเลยก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1.)

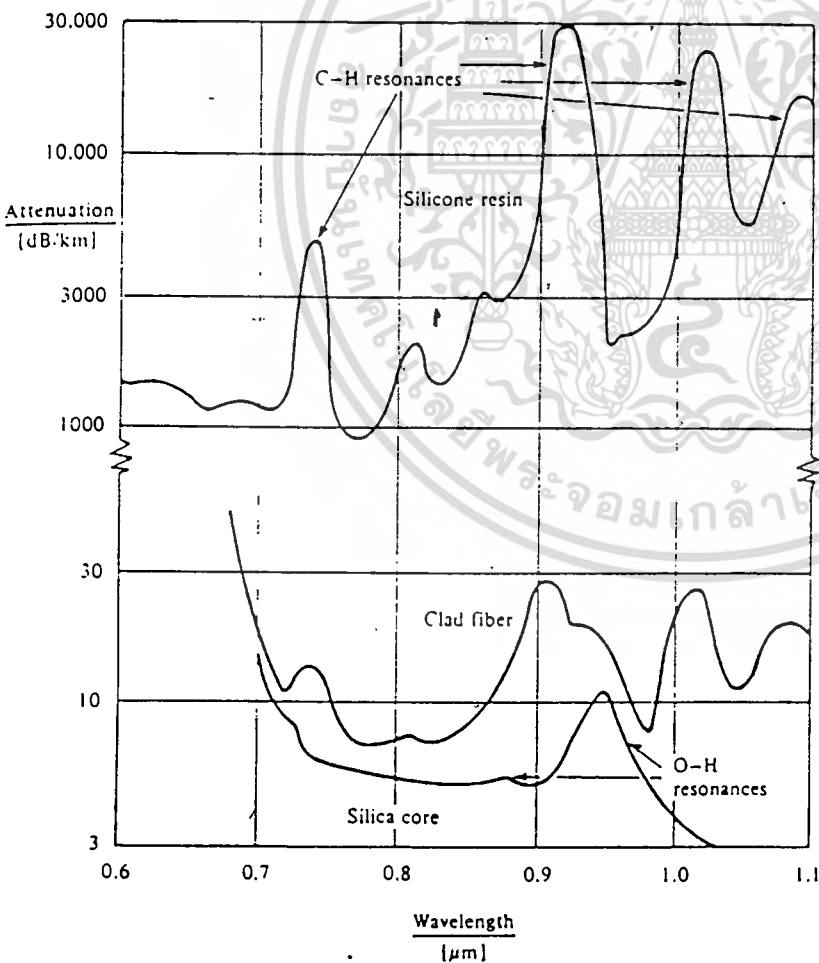
ภาพที่ 2.8 แสดงค่าการลดทอนพลังงานแสงเนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ [3]

1) ค่าการลดทอนของเนื้อแก้ว

บริสุทธิ์

2) ค่าการลดทอนของใยนำแสงที่ทำ

ด้วยสารสังเคราะห์



2.)

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติใยนำแสงราคาถูก พหุสารสังเคราะห์ [3]

	1	2	3	4
Core:				
material	PMMA <sup>†</sup>	PS <sup>‡</sup>	PS <sup>‡</sup>	Silica
refractive index	1.49	1.59	1.59	1.46
Cladding:				
material	Fluorocarbon polymer	PMMA <sup>†</sup>	Silicone resin	Silicone resin
refractive index	1.39	1.49	1.40	1.40
Numerical aperture	0.54	0.55	0.75	0.41
Theoretical dispersion ( $\Delta T/l = \Delta n/c$ ) (ns/km)	340	340	640	200
Minimum attenuation [dB/km]	~100	—	150	8

<sup>†</sup> Polymethylmethacrylate.

<sup>‡</sup> Polystyrene.

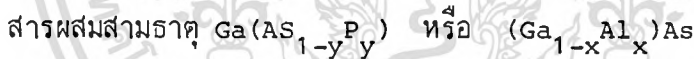
ใยนำแสงราคาถูกทำด้วยสารสังเคราะห์โพลีเมอร์ ใช้ที่ความยาวคลื่น 0.8-0.9  $\mu\text{m}$  ใต้เหมาะกับแหล่งกำเนิดแสงและตัวรับสัญญาณแสงที่มีอยู่โดยทั่วไป มีค่าการลดทอนประมาณ 1.3 dB/m มีแบนด์วิดธ์ประมาณจากการกระจายแสงตามทฤษฎี ไม่เกิน 1 MHz.km

2.4 แสงกำเนิดแสง LED [3]

พลังงานแสงเกิดจากอิเล็กตรอนในแถบความนำตกลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยตรง จะปลดปล่อยโฟตอนมีพลังงาน  $E_{ph}$  ออกมา ความยาวคลื่นของโฟตอนจึงขึ้นอยู่กับช่องว่างพลังงานระหว่างแถบความนำกับแถบวาเลนซ์  $E_g$  โดยที่

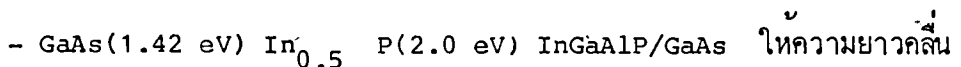
$$\frac{\lambda}{\mu m} \approx \frac{1.24}{E_g / eV} \dots\dots\dots(2.12)$$

จึงมีความจำเป็นที่จะต้องเลือกสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานที่เหมาะสมจะให้ได้ความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับการส่งสัญญาณผ่านใยนำแสง และการลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในแถบความนำมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์ ต้องเป็นแบบตรง (direct band gap) จึงมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนกระแสอิเล็กตรอนเป็นโฟตอนได้มากที่สุด สารผสมระหว่างกลุ่ม III ตามตารางธาตุ (มี Al, Ga และ In) กับกลุ่ม V (มี P, As และ Sb) ใช้สารกึ่งตัวนำกลุ่ม IV (Si, Ge) เป็นสารเจือ (dope) เพื่อให้เกิดประจุพาหะนำไฟฟ้าได้สารผสมแบบสองธาตุ (Binary) แบบสามธาตุ (ternary) หรือแบบสี่ธาตุ (quaternary) ต้องมีโครงสร้างทางผลึกสอดคล้องกัน โดยสามารถหลอมรวมกันจับกันเป็นผลึกเดี่ยวได้ เพื่อไม่ให้เกิดแรงขึ้นในผลึกโดยเฉพาะบริเวณรอยต่อสารผสมกลุ่ม III-V สามารถทำการเติมสารเจือให้เป็นชนิดพีหรือชนิดเอ็นก็ได้ ที่ความยาวคลื่นสั้น (0.8-0.9  $\mu m$ )



x, y มีค่าจาก 0-1 x กับ 1-x แทนอัตราส่วนผสมสารกลุ่ม III และ y, 1-y แทนใน  
กลุ่ม V

แสงกำเนิดแสงรุ่นแรกใช้สารกึ่งตัวนำผสมสามธาตุ  $Ga_{1-x}Al_xAs$  ให้ช่องว่างพลังงานแบบตรง  $0 < x < 0.37$  จะมีช่องว่างพลังงาน  $E_g$  1.42 eV - 1.92 eV GaAs มีความกว้าง lattice 0.5653 nm และ AlAs 0.5661 nm เมื่อหลอมรวมกันจึงสามารถจับกันเป็นผลึกเดี่ยวได้ GaAlAs/GaAs (รอยต่อสร้างบน Substrate GaAs) ให้ความยาวคลื่น 0.87-0.65 ต่อมาเมื่อได้ทำการศึกษาค้นหาส่วนผสมของสารกลุ่ม III-V ที่เป็นรอยต่อให้ประสิทธิภาพโฟตอนออกสูงสามารถใช้



0.87 - 0.62  $\mu m$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเข้าสู่โชนำแสง [3]

การไบอัสตรงต่อแหล่งกำเนิดแสง ด้วยศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อใน LED ประจุพาหะแพร่ขามรอยต่อเกิดการรวมตัวให้แสงหรือโฟตอนออกมา แสงจะออกจากภายใน LED เข้าสู่โชนำแสงได้ อยู่ที่ประสิทธิภาพของ LED คือ

1. ประสิทธิภาพทางควอนตัมภายใน ( Internal quantum efficiency ) หมายถึง ความสามารถในการเปลี่ยนกระแสประจุพาหะเป็นโฟตอน โดยตั้งสมมุติฐานว่ากระแสอิเล็กตรอนถูกผลักให้เคลื่อนเข้าสู่สารชนิด -P สัมประสิทธิ์จะเกี่ยวข้องกับอายุ ( life time ) ของประจุพาหะ

$$\frac{1}{\tau_p} = \frac{1}{\tau_{rr}} + \frac{1}{\tau_{nr}} \dots\dots\dots(2.13)$$

ประสิทธิภาพทางควอนตัมภายในหาได้จาก

$$\eta_{int} = \frac{1/\tau_{rr}}{1/\tau_{rr} + 1/\tau_{nr}} = \frac{1}{1 + \tau_{rr}/\tau_{nr}} \dots\dots\dots(2.14)$$

$\tau_{nr} \approx 100 \text{ ns}$  เมื่อมีความหนาแน่นประจุพาหะประมาณ  $10^{23} \text{ m}^{-3}$  ในสารที่มีช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง เช่น ซิลิกอน  $\tau_{rr} \approx 10 \text{ ms}$

$$\eta_{int} \approx \frac{1}{(1+10^{-2}/10)^{-7}} \approx 10^{-5}$$

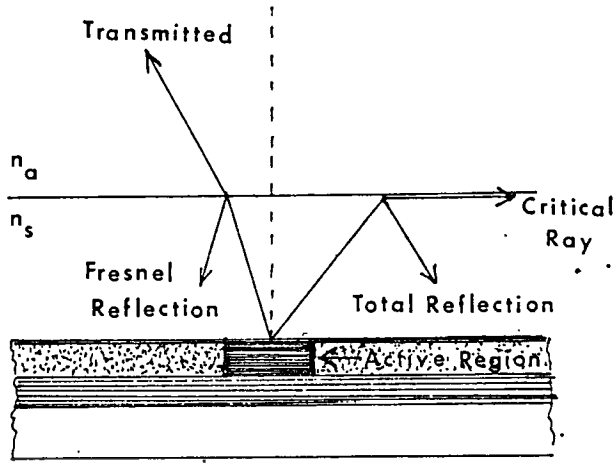
ในสารที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรง  $\tau_{rr} \approx 100 \text{ ns}$

$$\eta_{int} \approx \frac{1}{1+10^{-7}/10^{-7}} = 0.5$$

LED จึงควรทำมาจากสารกึ่งตัวนำประเภทที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรง

2. ประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก ( External quantum efficiency ) ปริมาณแสงที่จะออกไปภายนอก LED ขึ้นอยู่กับครอสซีคัทของสารที่เป็น LED ที่มีค่ามากกว่าสายภายนอก แสงที่จะออกไปได้จึงต้องมีมุมตกกระทบ  $\theta$  ระหว่างผิวรอยต่อน้อยกว่ามุมวิกฤติ  $\theta_c$  เมื่อคิดว่าแหล่งกำเนิดแสงเป็นแผ่นเล็ก ๆ ให้แสงออกจากผิวหน้าไปทุกทิศทาง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.9 แสดงลำแสงที่ออกสู่ภายนอกบางส่วน และมีการสะท้อนกลับเข้าสู่ภายในอีกบางส่วน

ถ้าคิดว่าแหล่งกำเนิดแสงเป็นแผ่นบาง ๆ ปล่อยให้แสงออกจากผิวหน้าได้ทุกทิศทาง  $\theta$  ฟลักซ์ของแสงหาได้

$$\Phi_s = 2 \int_{\theta=0}^{\pi/2} I_{s0} \cos \theta \cdot 2\pi \sin \theta d\theta = 2\pi I_{s0}$$

ฟลักซ์แสงที่หักเหออกไปได้ต้องมีมุมตกกระทบโตกว่า  $\theta_c$

$$\Phi_t = \int_0^{\theta_c} I_{s0} \cos \theta \cdot 2\pi \sin \theta d\theta = \pi I_{s0} \sin^2 \theta_c$$

อัตราส่วนของพลังงานแสงที่สามารถจะออกไปได้  $f' = \frac{\Phi_s}{\Phi_t}$

$$f' = \frac{1}{2} \sin^2 \theta_c = \frac{n_a^2}{2n_s^2} \dots\dots\dots(2.15)$$

เนื่องจากแสงที่มีมุมโตกว่ามุมวิกฤติที่มีบางส่วนจะสะท้อนกลับแบบ Fresnel จึงมีส่วนที่ผ่านไปได้จริง ๆ

$$t = \frac{4n_a n_s}{(n_a + n_s)^2} = \frac{4n_s}{(1+n_s)^2} \dots\dots\dots(2.16)$$

ประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก  $\eta_{ext}$  หาได้จาก

$$\eta_{ext} = f' t = \frac{2}{n_s (1+n_s)^2} \dots\dots\dots(2.17)$$

ในหัวข้อ 2.2 สมการที่ 2.6 แสดงความสามารถในการรับแสงของใยนำแสงแบบชั้นมันไค มีค่าเท่ากับ  $(NA)^2 = (n_1^2 - n_2^2)^2$  ประสิทธิภาพการรับพลังงานแสงของใยนำแสง

$$\eta_f = \eta_{ext} (NA)^2$$

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพของโฟตอนที่เข้าสู่ใยนำแสง

$$\eta_f = \eta_{int} \cdot \eta_{ext} \cdot (NA)^2$$

การส่งพลังงานแสงเข้าสู่ใยนำแสงหรือเรียกว่าการคัปปลิง ( Coupling ) ระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับใยนำแสงที่ไม่ได้จัดทำเฉพาะคือ มีแหล่งกำเนิดแสงแยกออกจากใยนำแสง โดยผู้ออกแบบระบบต้องนำไปจัดการเอง ซึ่งมักใช้กับระยะสั้น ใยนำแสงมี  $NA = 0.17$  แหล่งกำเนิดแสง Ga As

$$\eta_{ext} = 0.024 \quad \eta_{int} = 0.5 \quad \eta_f = 0.00035$$

ในใยนำแสง NA ขนาดใหญ่ที่ใช้ในระยะสั้นเช่นมี  $NA=0.5$  จะรับแสงได้มากกว่าประมาณ 8-9 เท่า ถ้าคิดว่าไบอัสแหล่งกำเนิดแสงด้วยกระแส 100 mA ประมาณว่ามีศักย์ตกคร่อม 1.5 โวลต์ พลังงานทางไฟฟ้าที่ใช้ไปถึงเท่ากับ 150 mw

พลังงานแสงเกิดขึ้นภายในแหล่งกำเนิดแสง  $\phi_s$

$$\phi_s = \eta_{int} (I/e) E_{ph} = 70 \text{ mw}$$

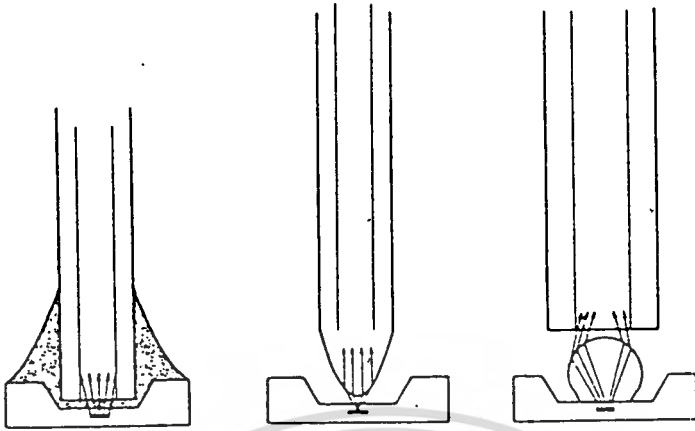
พลังงานแสงที่ออกมาสู่อากาศภายนอกได้  $\phi_a$

$$\phi_a = \eta_{ext} (I/e) E_{ph} = 1.7 \text{ mw}$$

พลังงานแสงเข้าสู่ใยนำแสงได้  $\phi_f$

$$\phi_f = \eta_f (I/e) E_{ph} = 49 \text{ nw}$$

ซึ่งจัดว่าน้อยมาก มีแนวทางปรับปรุงให้พลังงานแสงเข้าสู่ใยนำแสงได้มากขึ้น



ภาพที่ 2.10 แสดงวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการคับปลิงให้แสงจากแหล่งกำเนิดแสง

LED เข้าสู่ใยนำแสง [3]

- ใช้กาวอีพ็อกซีที่มีครรชนหักเหพอเหมาะ
- นำปลายใยนำแสงเป็นเลนส์เพื่อรวมแสง
- ติดเลนส์ทรงกลมบนผิวหน้าจุดปล่อยแสงออก

ตามภาพที่ 2.10 (a) เป็นการกัดผิวด้านหน้าของ LED ให้เป็นร่อง เหมาะกับขนาดใยนำแสง แล้วใช้กาวอีพ็อกซี (epoxy) โปร่งใสเลือกครรชนหักเหให้เหมาะสม (ครรชนหักเหประมาณ 1.9 หรือ 2.0) อัดใยนำแสงติดกับแหล่งกำเนิดแสง ทำให้แสงจากแหล่งกำเนิดแสงออกไปได้ มีค่า  $\tau \approx 1$  คือมีการสะท้อนกลับที่ผิวรอยต่อของตัวกลางน้อยที่สุด พลังงานแสงเข้าสู่ใยนำแสงได้มากกว่า การใช้หัวต่อแบบเกลียวประมาณสองเท่า การทำปลายใยนำแสงให้เป็นเลนส์ที่มีขนาดใหญ่กว่าบริเวณ active ที่ปล่อยแสงออก แล้วจัดตำแหน่งของใยนำแสงกับแหล่งกำเนิดแสงให้เหมาะสม จะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 3-4 เท่า การใช้เลนส์ทรงกลมติดกับแหล่งกำเนิดแสงตามภาพที่ 2.10 (c) ขนาดของเลนส์และบริเวณ active ที่ปล่อยแสงออก ให้มีขนาดเหมาะสมกัน มีรายงาน ว่าประสิทธิภาพของแสงที่ออกสู่ภายนอกแหล่งกำเนิดแสงได้ถึงไม่น้อยกว่า 14% [5] แต่มีปัญหาเรื่องการจัดตำแหน่งใยนำแสง จึงอาจใช้กาวอีพ็อกซีโปร่งใสติดใยนำแสงเข้ากับแหล่งกำเนิดแสงเป็นแบบที่เรียกว่า "pig tail" ผู้ใช้ต้องนำไปจัดการเชื่อมต่อเอง

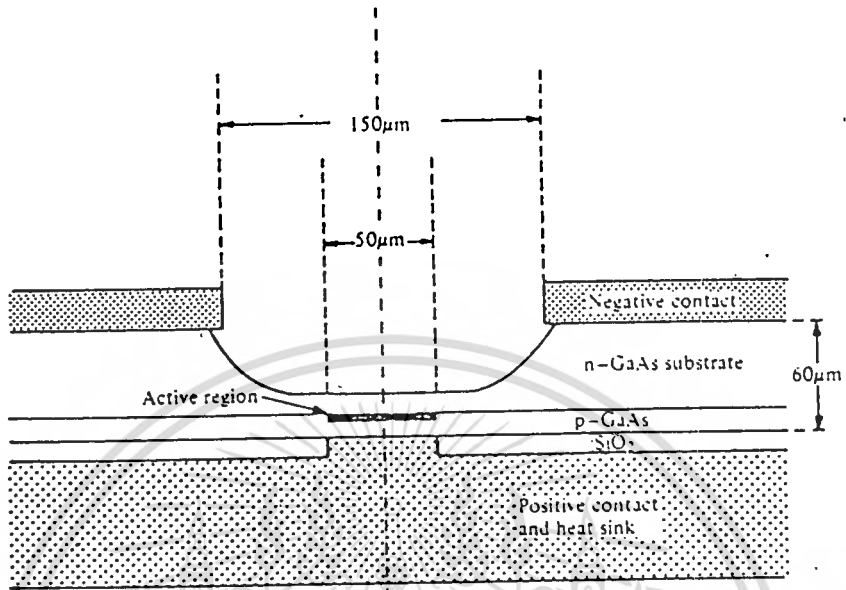
## แหล่งกำเนิด LED แบบรอยต่อหลายชั้น ( Heterojunctions )

แหล่งกำเนิดแสงที่เป็นรอยต่อหลายชั้น ให้ประสิทธิภาพสูง โดยเฉพาะรอยต่อหลายชั้นแบบมีชั้นคู่ ( double heterostructure=DH) คือมีชั้น n ความต้านทานต่ำ ( n หรือ  $n^+$  ) ครอบชั้น n ความต้านทานสูง และชั้น p ความต้านทานต่ำ ( p หรือ  $p^+$  ) ครอบชั้น p ความต้านทานสูงแล้วประกบ มีชั้น active ให้แสงออก ที่เป็นชนิด p หรือ n ความต้านทานต่ำอยู่ตรงกลาง ชั้น p และ n เป็นชั้นกักอิเล็กตรอน หรือปลดปล่อยประจุพาหะ ( confining layer ) เข้าสู่ชั้น active. ประจุพาหะจะเกิดการรวมตัวในชั้นนี้ปลดปล่อยโฟตอนออกมากว่าการจัดโครงสร้างแบบนี้จะจัดเป็น N-n-P หรือ N-p-P ส่วน  $n^+$  และ  $p^+$  นั้นคู่เป็น nN หรือ pP เพื่อลดปัญหาด้านความต้านทานของจุดสัมผัส ( ohmic contact) เมื่อเชื่อมสายตัวนำเป็นขั้วไฟฟ้าออกสู่ภายนอก

โครงสร้างรอยต่อหลายชั้นแบบมีชั้นคู่ให้คุณสมบัติที่ดีของ DH LED

1. ประสิทธิภาพของการฉีดประจุพาหะข้ามรอยต่อสูง
2. ประจุพาหะข้ามรอยต่อซึ่งจะกลายเป็นประจุพาหะส่วนน้อยในบริเวณ active มีผล ทำให้เกิดการรวมตัวมีปริมาณสม่ำเสมอ และให้อัตราการรวมตัวสูง
3. ลดปัญหาความต้านทานที่จุดสัมผัส ( ohmic contacts )
4. ความโปร่งใสของสารกึ่งตัวนำแต่ละชั้น ช่วยให้การหักเหของแสงผ่านออกไปได้มากขึ้น
5. ในรอยต่อแบบมีชั้นคู่ ช่วยให้มีการสะท้อนกลับหมดเป็นการควบคุมทิศทางของลำแสง เช่น การผลิต LED แบบแสงออกด้านข้าง

ความถี่มอดูเลต ( Modulation frequency )



ภาพที่ 2.11 แสดงโครงสร้างของ LED ปล่อยแสงออกจากผิวหน้าแบบสารเนื้อเดียว [3]

ในแหล่งกำเนิดแสงตามที่แสดงในภาพที่ 2.11 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานใช้เพื่อการมอดูเลต กับพลังงานในภาวะคงที่หรือที่ให้ออกจากกระแสไบอัส

$$\frac{|P_M/J_M|}{P_O/J_O} = \frac{1}{(1 + \omega^2 \tau_p^2)^{1/2}} \dots (2.18)$$

ถ้าหากพิจารณาเฉพาะพลังงานจะได้ความสัมพันธ์

$$\frac{\text{Modulation Power}}{\text{D.C. Power}} = \left[ \frac{1}{1 + (\omega \tau_p)^2} \right]^{1/2}$$

$$\frac{1}{\tau_p} = \frac{1}{\tau_{rr}} + \frac{1}{\tau_{nr}}$$

กระแสที่คิดเป็นกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานของบริเวณปลดพาหะ  $r_D$  และผ่านคาปาซิเตอร์ของบริเวณปลดพาหะ หรือคาปาซิเตอร์ของการแพร่  $c_D$  ยังไม่ได้รวมกระแสที่ผ่านคาปาซิเตอร์ของรอยต่อ  $c_J$  ความถี่มุมอูเลที่คำนวณได้จะมีค่าสูงกว่าที่ได้จากการทดลอง เมื่อไม่ได้คิดถึงกระแสผ่าน  $c_J$  จึงอาจแก้ไขได้จากค่า  $\tau_p$  เป็นค่า  $\tau$

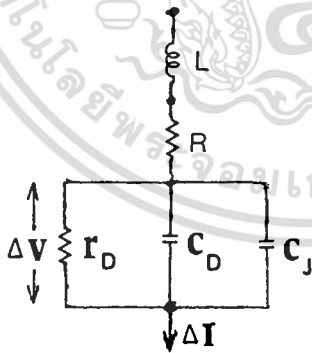
$$\tau \sim \tau_p (1 + c_J/c_D)$$

$$c_J = \frac{c_o}{(1 - v/v_D)^{1/2}}$$

$$\frac{c_o}{A} = \left( \frac{en_A \epsilon_r \epsilon_D}{2v_D} \right)^{1/2}$$

โดยทั่วไปพื้นที่บริเวณรอยต่อประมาณ  $10^4 \mu m^2$   $v_D \approx 1$  โวลต์  $c_o \approx 10$  pF จึงประมาณค่า  $c_J$  ได้

$$\frac{c_J/A}{[pF/\mu m^2]} \approx \frac{10^{-3} [v^{1/2}]}{(v_D - v)^{1/2}} \dots (2.19)$$



ภาพที่ 2.12 แสดงวงจรทดเทียมของ LED [3]

$$\frac{P_w}{P_o} = \left[ \frac{1}{1 + (\omega\tau)^2} \right]^{1/2}$$

ความถี่มุมอคูเลท  $f_m = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi\eta_{int}\tau_{rr1}} \dots\dots\dots(2.20)$

ในโครงสร้างแบบหลายรอยต่อและมีชั้นคู่ บริเวณเกิดการรวมตัวตามในภาพที่ 2.13,a คือบริเวณที่ (1) ค่าเวลาคงที่ของการรวมตัว  $\tau$

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{rr1}} + \frac{1}{\tau_{nr1}} + \frac{2s}{d} \dots\dots\dots(2.21)$$

s คือความเร็วในการรวมตัว (ประมาณ 10 m/s )

d คือความหนาของชั้น active ( หนาประมาณ 0.5 - 1  $\mu\text{m}$  )

เมื่อมีการมอดูเลทที่ความถี่ต่ำ

$$\eta_{int} = \frac{\tau}{\tau_{rr1}}$$

ถ้าต้องการความถี่มุมอคูเลทสูง รอยต่อต้องไบอัสแบบ " high injection "

$$(\tau_{rr1})^{-1} = \frac{1}{\tau_{nr1}}$$

และการไบอัสให้ทำงานต้องถึงระดับกระแสวิกฤตค่าหนึ่ง

$$J > J_{cr} = \frac{en_{A1} d}{\eta_{int} \tau_{rr1}} = \frac{en_{A1}^2 d}{\eta_{int}}$$

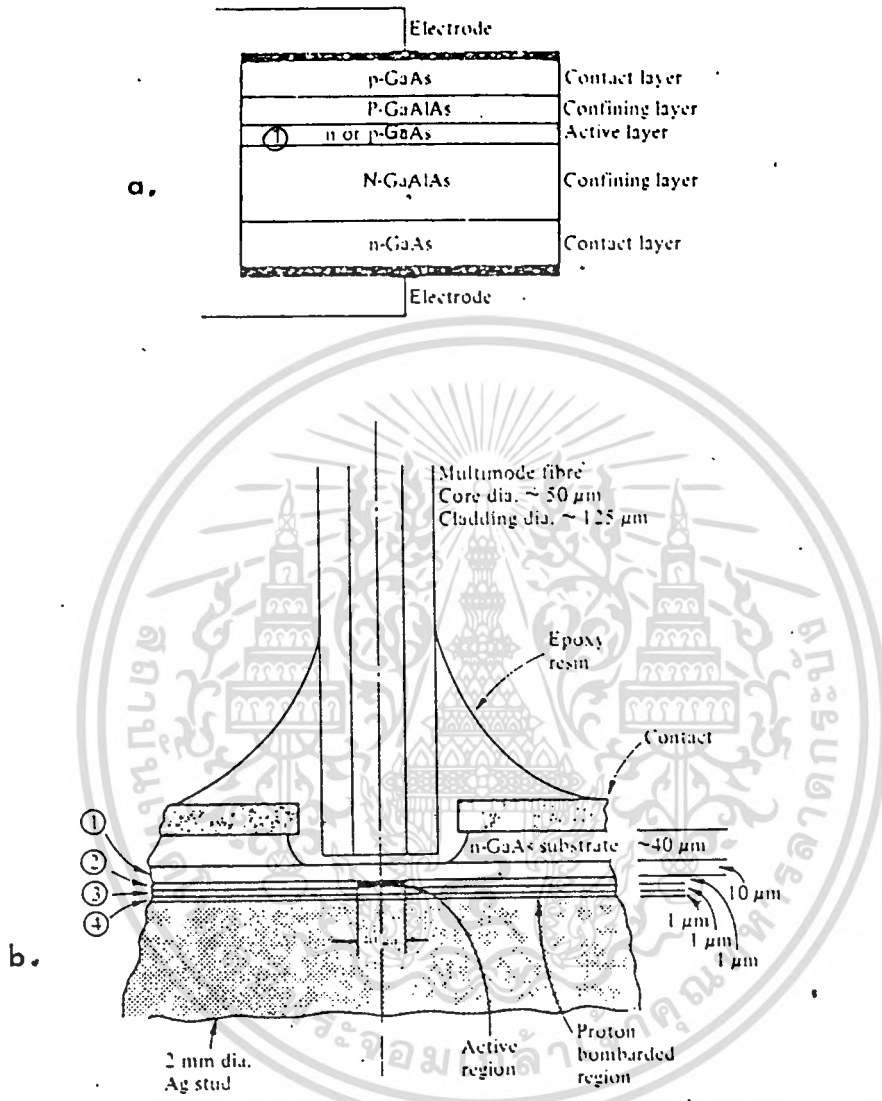
$\tau$  คือสัมประสิทธิ์การรวมตัวที่ทำให้เกิดการแผ่รังสีในบริเวณ active มีค่าประมาณ  $10^{-16} \text{m}^3/\text{s}$

$$n_{A1} = 10^{24} \text{m}^{-3} \quad \eta_{int} \approx 1$$

$$J_{cr} = 1.6 \times 10^{13} \text{A} \quad \text{ถ้า } d = 1 \mu\text{m}$$

$$J_{cr} = 16 \text{A/mm}^2 \quad \text{ซึ่งเป็นกระแสวิกฤตที่จะให้โฟตอน}$$

$$\tau = \tau_{rr1} = \frac{1}{\tau_{nr1}}$$



ภาพที่ 2.13 แสดงโครงสร้างหลายรอยต่อแบบชั้นคู่และลักษณะของ LED ที่ให้แสงออกทางผิวหน้า โดยมีชั้นต่าง ๆ คือ [3]

- b. 1) GaAlAs ชนิด - n ความต้านทานต่ำ
- 2) บริเวณ active GaAs ชนิด p หรือ n ความต้านทานต่ำ
- 3) GaAlAs ชนิด p ความต้านทานต่ำ
- 4) GaAs ชนิด  $p^+$  เป็นชั้นสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J \approx \frac{en_1 d}{\tau_{rr1}} \approx \frac{\bar{e}d}{r\tau_{rr1}^2}$$

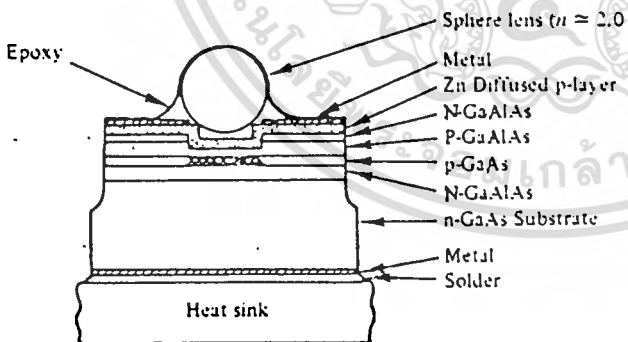
$$\therefore \tau_{rr1} \approx \left(\frac{ed}{rJ}\right)^{1/2} \dots\dots\dots(2.22)$$

ความถี่มอดูเลต

$$f_m = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{2}{2\pi\eta_{int}\tau_{rr1}}$$

$$= \frac{1}{2\pi\eta_{int}} \left(\frac{rJ}{ed}\right)^{1/2} \dots\dots\dots(2.23)$$

หากต้องการความถี่มอดูเลตที่สูงโดยไม่เปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพควอนตัมภายใน มีความจำเป็นต้องลดเวลาคงที่ของการรวมตัวที่ให้อิเล็กตรอน  $\tau_{rr1}$  โดยการโอบอย่างหนักเพื่อเพิ่มประจุพาหะในบริเวณกัมมันต์ และเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาทางโครงสร้างผลึกความหนาแน่นสารเจือไม่ควรเกิน  $10^{24} \text{ m}^{-3}$  เพราะถ้าหากโครงสร้างผลึกเสียไปมากเท่าไร การรวมตัวที่ไม่เกิดแสงยิ่งมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งเป็นการลดประสิทธิภาพควอนตัมภายใน นอกจากนี้ความต้องการในความถี่มอดูเลตยิ่งมากขึ้นยิ่งต้องเพิ่มความหนาแน่นกระแสคือลดพื้นที่บริเวณกัมมันต์ และลดความหนาแน่นของตัว



ภาพที่ 2.14 แสดงโครงสร้าง LED แบบหลายรอยต่อ มีชั้นกึ่งตัวนำบริเวณ active และเพิ่มความหนาแน่นกระแส และมีเลนส์ทรงกลมช่วยขับปลิง [3]

ในภาพที่ 2.14 LED ใช้ GaAlAs/GaAs DH มีเส้นผ่าศูนย์กลางบริเวณ active 35  $\mu\text{m}$  และมีเลนส์ทรงกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง 100  $\mu\text{m}$  ครรชนหักเห 2.0 เพื่อช่วยขับปลิงแสงเข้าสู่ใยนำแสง พลังงานเข้าสู่ใยนำแสงมีแกน 80  $\mu\text{m}$  NA 0.14 ได้ถึง 100  $\mu\text{W}$  ซึ่งใช้กระแสไบอัสเพียง 50 mA การลดพื้นที่บริเวณเกิดการรวมตัวลงเป็นปัญหาทางการระบายความร้อน ซึ่งทำให้อายุการใช้งานลดลงมากกว่า 1000 ชั่วโมง ที่ 25 °C ความหนาแน่นกระแส 50 A/mm<sup>2</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 ตัวรับสัญญาณแสง (Photodetector )

ทางด้านเครื่องรับในระบบการส่งสัญญาณผ่านใยนำแสงต้องมีตัวรับสัญญาณแสงคือ photodiode detector ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงที่ได้รับให้เป็นกระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำไปขยายและจัดการแยกเอาสัญญาณที่แท้จริงได้ด้วยวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ โฟโตไดโอด ( photodiode ) ที่ต้องการให้สัญญาณกระแสไฟฟ้าได้ตรงตามลักษณะของสัญญาณได้มากที่สุดคือ มีการตอบสนองในการเปลี่ยนแสง ให้เป็นกระแสไฟฟ้าได้มากที่สุดเรียกว่าความไว ( sensitivity ) และให้การตอบสนองต่อความถี่ ( frequency response) ที่ดี นอกจากนี้ยังต้องมีขนาดที่เล็กเหมาะกับใยนำแสงมีความเชื่อถือได้ มีอายุการใช้งานมาก และราคาไม่แพง

ที่มีความยาวคลื่น 0.8-0.9 ใช้ Ga Al As เป็นตัวกำเนิดแสง และใช้ Silicon เป็นตัวรับสัญญาณ ( detector ) ซึ่งได้รับการพัฒนามาใช้งานโดยอย่างดีแล้ว p-i-n photodiode มีความไวต่ำ การรบกวนที่เกิดในไดโอดก็ต่ำด้วย โดยตัวไดโอดเองมีการตอบสนองต่อความถี่ที่สูง แตรวงจขยายต้องใช้อัตราการขยายสูง แบนด์วิดธ์จึงขึ้นกับวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ และต้องระวังด้านการรบกวนด้วย

โฟโตไดโอดให้กระแสได้จากพลังงานแสงตกกระทบบริเวณรอยต่อ p - n ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งพลังงานของโฟตอนต้องมากกว่าช่องว่างพลังงานของสารที่นำมาทำรอยต่อ p - n เล็กน้อย

$$E_g < h \nu = \frac{hc}{\lambda} \dots\dots\dots (2.24)$$

การไบอัสกลับทางทำให้เกิดกระแสไดโอดขามรอยต่อ แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า  $\lambda_{th}$  ไม่ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮล จะมีกระแสแสงที่เกิดจากการการไบอัสกลับทางเรียก

$$\lambda_{th} = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g} [\mu m \cdot eV] \dots\dots\dots (2.25)$$

เนื่องจกต้องมีการสูญเสียพลังงานของประจุไปบางก่อนข้ามรอยต่อ และการดูดกลืนของเนื้อสาร ความยาวคลื่น  $\lambda < \lambda_{th}$

พิน - โฟโตไดโอด (p-i-n Photodiode )

ใน p-i-n ประกอบด้วยชั้น p<sup>+</sup> ซึ่งบางมาก แสงต้องผ่านทะลุชั้นนี้เข้าไปถึงบริเวณ  
 ปลอดพาหะที่เกิดจากรอยต่อของชั้น p<sup>+</sup> กับชั้น i ที่โคบเล็กน้อยให้เป็นสาร n หรือ p ซึ่งมีความ  
 คำนานสูงความหนาแน่นประจุพาหะต่างจากสาร intrinsic ที่อุณหภูมิปกติไม่มากนัก จึงเรียกว่า  
 ชั้น i ซึ่งบางมาก ต่อด้วยชั้นหลังสุดคือ n<sup>+</sup> การไบอัสแบบกลับทาง ( reverse bias) ต้องมีศักย์  
 สูงพอ ทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายครอบคลุมชั้น i ทั้งหมด พินไดโอดในอุดมคติถือว่าพลังงานแสงที่ตก  
 กระทบในแต่ละวินาทีผ่านชั้น p<sup>+</sup> เข้าไปถึงบริเวณปลอดพาหะได้ทุกโฟตอน  
 โฟตอนทุกตัวทำให้เกิดคูประจุอิเล็กตรอน-โฮล คูประจุทุกคู่ทำให้เกิดกระแสไดโอด I<sub>ph</sub>

$$(I_{ph})_{ideal} = \frac{e \Phi}{E_{ph}} \dots \dots \dots (2.26)$$

ในโฟโตไดโอดจริงพลังงานที่กระทบผิวหน้าไดโอด โฟตอนทุกตัวไม่ได้ทำให้เกิดกระแสไดโอด จึงมี  
 ประสิทธิภาพทางควอนตัม η เป็นเศษส่วนระหว่างประจุที่ทำให้เกิดกระแส I<sub>ph</sub> ในแต่ละวินาที กับ  
 พลังงานแสงที่ให้จำนวนโฟตอนในแต่ละวินาที

$$\eta = \frac{I_{ph}}{e} \div \frac{\Phi}{E_{ph}} = \frac{I_{ph}}{\Phi} \cdot \frac{hc}{e\lambda} = R \cdot \frac{hc}{e\lambda} \dots \dots \dots (2.27)$$

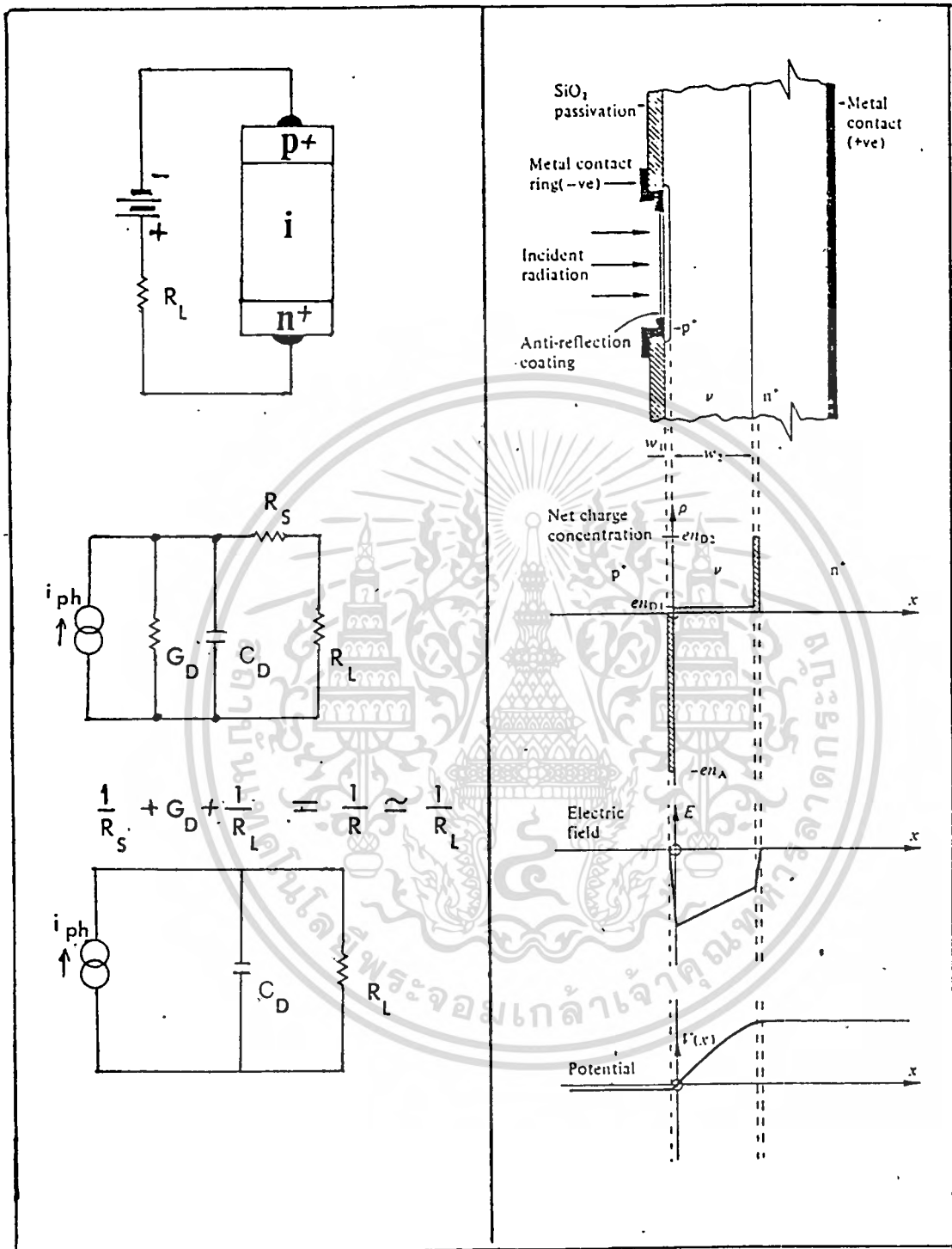
R = responsivity

$$I_{ph} = \eta \frac{e \Phi}{E_{ph}} = \frac{\eta e}{h \nu} \Phi \dots \dots \dots (2.28)$$

หรือ  $I_{ph} = \eta (I_{ph})_{ideal}$

โดยที่จริงแล้วประสิทธิภาพทางควอนตัม η ของไดโอด จะให้ค่ามากพิจารณาได้จาก

- a ) แสงที่ตกกระทบผิวหน้าโฟโตไดโอด ซึ่งเป็นชั้น p<sup>+</sup> มีการสะท้อนกลับคืนน้อยที่สุด
- b ) แสงที่ผ่านทะลุไปใต้ต้องถูกดูดกลืนที่บริเวณปลอดพาหะ ให้คูประจุอิเล็กตรอน-โฮล  
 ได้มากที่สุด



ภาพที่ 2.15 แสดงโครงสร้าง p-i-n โฟโตไดโอด การไบอัสกลับทางและวงจร  
 ทดเทียบ เมื่อสัปดาห์ที่ไบอัสทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายคลุมชั้น i ได้กราฟ  
 ความหนาแน่นประจุ, สนามไฟฟ้า และศักย์ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

c) ประจุพาหะที่เกิดขึ้นต้องไม่เกิดการรวมตัวก่อนที่จะถึงขั้วไฟฟ้า เป็นกระแสที่มีผลต่อวงจรภายนอก ประสิทธิภาพในการรับสัญญาณแสง ( detector ) จึงเป็นจำนวนคูประจุอิเล็กตรอน-โฮล ต่อโฟตอนที่มากกระทบ

$$\eta = (1 - R) [1 - \exp(-\alpha w)] \dots\dots\dots (2.29)$$

เมื่อ R คืออัตราการสะท้อนแสงที่ผิว  $\alpha$  สัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอน และ w ความกว้างของชั้นการดูดกลืนซึ่งหมายถึงบริเวณปลอดพาหะ ในสมการ (2.29) ถือว่าการดูดกลืนในชั้น  $p^+$  หนานับบริเวณปลอดพาหะน้อยมาก โฟโตไดโอดทำจากซิลิกอนใช้กับความยาวคลื่น 0.8-0.9  $\mu\text{m}$  ฉาบผิวหน้ากับการสะท้อนแสง  $\alpha = 500 - 1000 \text{ cm}^{-1}$  w ความหนาที่ทำให้การไบอัสให้บริเวณปลอดพาหะคลุมได้ทั้งหมดที่มีความหนาแน่นการโด๊ป  $\approx 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  จะกว้าง 30-50  $\mu\text{m}$  มีประสิทธิภาพทางควอนตัมได้ถึง 0.8

การรับควานใน PIN PHOTODIODE [3]

กระแสไหลผ่านไดโอดจะเปลี่ยนแปลงสูงต่ำจากค่า  $I$  เฉลี่ยอยู่บางเกิดจากภายในตัวไดโอดเรียก shot noise ค่าเฉลี่ยกำลังสอง  $\langle I_{sh}^2 \rangle$  จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ากระแสเฉลี่ยและแบนด์วิดธ์  $\Delta f$

$$\langle I_{sh}^2 \rangle = 2eI \cdot \Delta f$$

$$I = I_{ph} + I_{background} + I_{dark}$$

โดยทั่วไป  $I_{background}$  มีค่าน้อย

$$I = I_{ph} + I_d$$

การรับสัญญาณสามารถทำได้จนถึงขนาด

$$\langle I_{sh} \rangle = I_{ph}$$

$$\langle I_{sh} \rangle = \{ 2e (I_{ph} + I_d) \Delta f \}^{1/2} \dots\dots\dots (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การตอบสนองต่อความถี่ [1]

ใน p-i-n ไดโอด โสledgeถูกจ่ายขั้วขึ้น  $p^+$  โดยรวดเร็ว ส่วนอิเล็กตรอนจะแพร่ข้ามบริเวณปลอดพาหะด้วยเวลา  $t_{tr}$  ขึ้นอยู่กับความเร็วของอิเล็กตรอน  $v_{se}$  และความกว้างบริเวณปลอดพาหะ  $\approx w_2$

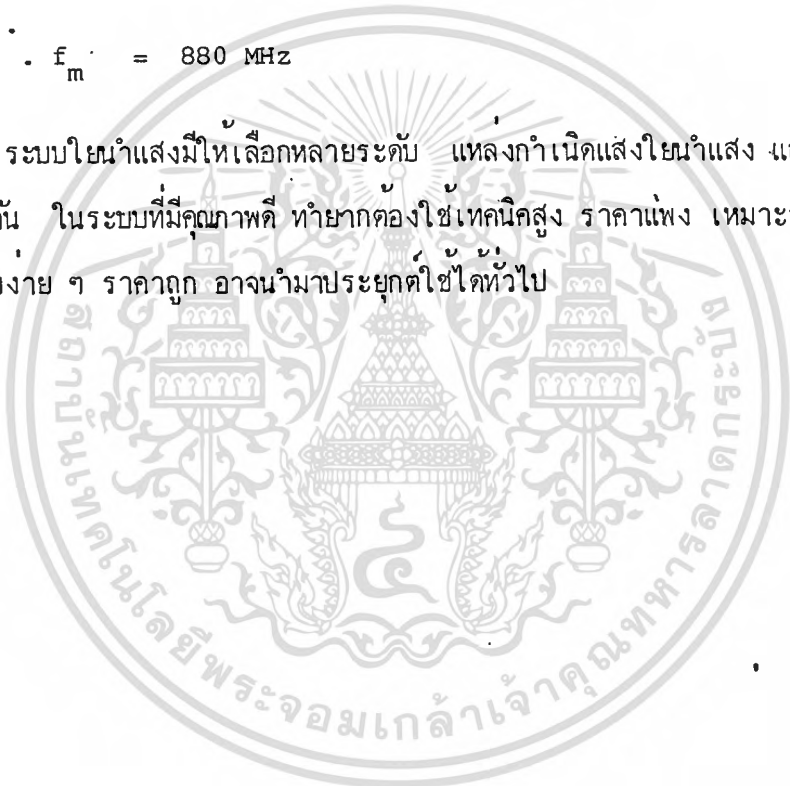
$$t_{tr} = \frac{w_2}{v_{se}} \quad \text{ความถี่มอดูเลต } f_m \text{ ประมาณได้}$$

$$f_m \approx \frac{0.44}{t_{tr}} \quad \dots\dots\dots(2.31)$$

ซิลิกอนไดโอด  $v_{se} \approx 10^5 \text{ m/s}$   $w_2 \approx 50 \text{ nm}$   $t_{tr} = 0.5 \text{ ns}$

$$\therefore f_m = 880 \text{ MHz}$$

ระบบใยนำแสงมีให้เลือกหลายระดับ แผลงกำเนิดแสงใยนำแสง และตัวรับสัญญาณแสงต้องสอดคล้องกัน ในระบบที่มีคุณภาพดี ทำยากต้องใช้เทคนิคสูง ราคาแพง เหมาะกับระบบใหญ่ ๆ สำหรับในระบบงาย ๆ ราคาถูก อาจนำมาประยุกต์ใช้ได้ทั่วไป



### การจัดรูปแบบสัญญาณ

โดยทั่วไปเราไม่นิยมส่งสัญญาณที่ต้องการสื่อสารในระดับที่ใช้ตามปกติไปโดยตรง มักจะนำสัญญาณนั้นมาจัดการให้เหมาะสมเสียก่อน ทั้งนี้เพื่อจะให้ออกไปได้ไกล และมีการรบกวนน้อยที่สุด การบรรจุเนื้อหาข่าวสารของแต่ละระบบต้องเหมาะกับการส่งการรับ

#### 3.1 แบนด์วิดธ์ของระบบ

ในการส่งสัญญาณผ่านใยนำแสงที่นิยมและเหมาะสมกับระบบการส่งการรับของแหล่งกำเนิดแสง และตัวรับสัญญาณแสง คือใช้วิธีการแปลงสัญญาณให้เป็นพัลส์ของคลื่นพาห้ ที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ของสัญญาณมาก แบนด์วิดธ์ของคลื่นพาห้ต้องพอเพียงกับแบนด์วิดธ์ของสัญญาณ

แบนด์วิดธ์ของระบบใยนำแสงขึ้นอยู่กับแบนด์วิดธ์ของแหล่งกำเนิดแสง ความเร็วในการตอบสนองต่อสัญญาณที่เป็นพัลส์ต้องพอเพียง ค่า rise time + fall time ต้องมีค่าน้อยกว่าความกว้างพัลส์ของคลื่นพาห้ เมื่อสัญญาณผ่านใยนำแสงความกว้างพัลส์จะขยายออกตามระยะทางที่มากขึ้น ระยะการส่งจึงอยู่ในขอบเขตที่สามารถแยกพัลส์ที่ติดกันออกเป็นแต่ละพัลส์ได้ ตัวรับแสงต้องมีความเร็วในการเปลี่ยนโฟตอนเป็นกระแสไฟฟ้าได้พอเพียงกับความถี่แสง แหล่งกำเนิดแสง ใยนำแสง และตัวรับสัญญาณแสง ต้องมีแบนด์วิดธ์สอดคล้องกัน

โดยทั่วไปแหล่งกำเนิดแสง LED ที่มีคุณภาพดีสร้างแบบรอยต่อหลายชั้น DH LED ให้ความถี่มอดูเลทมากกว่า 20 MHz สำหรับ LED GaAs สารเนื้อเดียวให้ความถี่ต่ำกว่า 20 MHz และสูงกว่า 1 MHz

ตัวรับสัญญาณแสงที่เป็น p-i-n โดยทั่วไปจะมีการตอบสนองต่อความถี่ได้เป็น 100 MHz แต่เนื่องจากต้องประกอบด้วยวงจรถยาย การตอบสนองต่อความถี่ของการรับสัญญาณแสงจึงขึ้นอยู่กับวงจรถยาย อิเล็กทรอนิกส์ที่ขยายสัญญาณเป็นส่วนใหญ่

ระบบที่ใช้ทดลองแหล่งกำเนิดแสง LED ~ 1 MHz ใยนำแสง ~ 1 MHz . km ตัวรับแสง p-i-n ประกอบกับวงจรถยายสัญญาณทดลองวัดการตอบสนองต่อความถี่ได้ 30 kHz จึงสอดคล้องกันได้

#### 3.2 การมอดูเลทสัญญาณ

การมอดูเลทสัญญาณทำได้สองระดับคือใช้สัญญาณเข้ามอดูเลทให้พลังงานแสงออกเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณโดยตรง หรือทำการมอดูเลทเป็นสัญญาณทางกระแสไฟฟ้ามอดอน แล้วนำกระแสไฟฟ้ามอดอน

แหล่งกำเนิดแสงอีกต่อหนึ่ง ลักษณะการมอดูเลตสำหรับใช้กับใยนำแสงพิจารณาได้สามลักษณะคือ

1. การมอดูเลตโดยตรง ( direct modulation ) นำสัญญาณเข้าผสมเพื่อเปลี่ยนแปลงกำลังขับแสงออกโดยตรง

2. การมอดูเลตทางความถี่ ( frequency modulation ) เกิดความถี่คลื่นพาห์ นำไปเป็นกำลังขับแสงออก

3. Pulse-Code modulation (PCM) เป็นการเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อก เขารหัสของพัลส์ได้ออกเป็นจำนวนกลุ่มบิตนำไปขับแสงออก แหล่งกำเนิดแสงอีกต่อหนึ่ง

การมอดูเลตโดยตรงเพื่อออกเป็นความเข้มของแสงมีข้อเสียที่ไม่เหมาะกับการส่งด้วยใยนำแสง คือต้องการอัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับการรบกวน ( signal to noise ratio = SNR) สูงถึง 50 dB [3] กำลังแสงที่ออกจาก LED เข้าสู่ใยนำแสงไปถึงปลายทางแค่เพียง 15-20 dB[3] เท่านั้น จึงเป็นการลดความถี่เด่นของการส่งสัญญาณผ่านใยนำแสงที่ต้องการ SNR ต่ำลงไปเสีย นอกจากนั้นแหล่งกำเนิดแสงต้องมีคุณสมบัติเชิงเส้นที่ดี

สำหรับ PCM นับว่าเหมาะกับการส่งสัญญาณผ่านใยนำแสง ต้องการ SNR ต่ำเพียง 21.6 dB [3] ซึ่งเหมาะกับคุณสมบัติของใยนำแสง แต่ต้องการแบนด์วิดท์ที่กว้างขึ้นหลายเท่าตัวของสัญญาณ เพราะสัญญาณต้องทำการสุ่ม ( sampling) มีความถี่อย่างน้อยเป็นสองเท่าของความถี่สัญญาณ (base band frequency) ในการสุ่มแต่ละครั้งนำมาเข้ารหัสให้หน้าหนักออกเป็นบิตอีกหลายบิต เช่น ความถี่เสียง 4 kHz ใช้ความถี่การสุ่ม 8 kHz ในวงจรสุ่มแต่ละครั้งให้หนักเข้ารหัส 8 บิต จึงต้องใช้ 64 kHz และสามารถทำการมัลติเพล็กซ์โดยการแบ่งช่วงเวลาได้ง่าย นิยมใช้ในโทรศัพท์ดิจิทัลในยุโรป แบ่งระดับที่ 1 มี 30 ช่องสัญญาณ ระดับที่ 1 รวมกัน 4 กลุ่มเป็นระดับที่ 2 ได้ 120 ช่องสัญญาณต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงระดับ 4 มี 1920 ช่องสัญญาณใช้กับโทรศัพท์ได้ 2 ช่อง และระดับ 5 มี 7680 ช่องสัญญาณ (564.992 mb/s) ใช้กับโทรศัพท์ได้ 8 ช่อง สำหรับในอเมริกาและญี่ปุ่นแบ่งระดับละ 4 กลุ่มเช่นกัน แต่ระดับที่ 1 มี 24 ช่องสัญญาณ [6] แบนด์วิดท์ของใยนำแสงแบบโหมคเดียวมีเพียงพอที่จะให้ส่งสัญญาณระดับ 4 ได้ 10-40 km[4] โดยไม่ต้องทวนสัญญาณค่าใช้จ่ายใน PCM แต่ละช่องสัญญาณค่อนข้างสูงจึงมุ่งทำในระดับการค้า ในเอกสารเล่มนี้จึงไม่ได้นำที่ PCM

## การมอดูเลททางความถี่ ( Frequency Modulation )

ในทันทีการที่จะเลือกการมอดูเลทแบบใด พิจารณาจากลักษณะของสัญญาณที่ต้องการจะส่งผ่าน ใยนำแสง โดยจะแบ่งสัญญาณเป็นสองลักษณะ คือแบบที่มีโวลเตจเปลี่ยนแปลงรอบจุดกลางเป็นคาบ เช่น สัญญาณเสียง หรือสัญญาณมีพลังงานลักษณะไซน์ ( sinusoidal source ) หรือคล้ายไซน์ กับสัญญาณที่มี ลักษณะเปลี่ยนแปลงไปทางเดียว คือมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าต่ำสุดอาจเป็นศูนย์หรือมากกว่าไปเป็นค่าบวก หรือค่าลบอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น จึงเลือกการมอดูเลทตามลักษณะสัญญาณได้ 3 แบบ

- ก. ใช้สัญญาณเปลี่ยนความถี่ออสซิลเลเตอร์โดยตรง โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรออสซิลเลเตอร์ จะเปลี่ยนคาร์แอกแทนซ์ในวงจรไปตามสัญญาณ เช่น คอนเทนเซอร์ ไมโครโฟน วารีแคป หลอดคาร์แอกแทนซ์ หรือทรานซิสเตอร์ ทำให้ความถี่ที่ได้จากวงจร เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย
- ข. ใช้สัญญาณเปลี่ยนความถี่ที่มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง คือ  $f_c$  สัญญาณที่ป้อนเข้าไปในวงจรจะมีส่วน ในการเปลี่ยนแปลงความถี่รอบ  $f_c$  จึงนิยมใช้วงจรที่ใช้โวลเตจควบคุมความถี่ออสซิลเลเตอร์ VCO (voltage controlled oscillator) สัญญาณที่ต้องการส่งจึงอยู่ใน ลักษณะของความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป ( frequency deviation ) รอบ  $f_c$  ปัจจุบัน มี ไอ ซี จำพวก VCO มากมายที่เสถียรภาพในการสร้างความถี่  $f_c$  และเปลี่ยนแปลง ได้  $\pm 40$  kHz เพียงพอที่จะผสมสัญญาณเสียงเข้าไปได้ ใช้ไอซีพวก PLL (phase locked loop) เป็นตัวแยกสัญญาณ การมอดูเลทสัญญาณโดยวิธีนี้เพื่อส่งผ่านใยนำแสง จึงง่ายขึ้น บางทีในการรวมสัญญาณทางความถี่อาจใช้เฟสของสัญญาณทำให้ความถี่ของ ออสซิลเลเตอร์เปลี่ยนไปรอบ  $f_c$  เรียกว่า Phase Modulation = PM . ก็ได้ผลเช่น เดียวกัน
- ค. ใช้การเปลี่ยนสัญญาณที่เป็นโวลเตจเป็นความถี่โดยตรง เหมาะกับสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลง จากค่าต่ำสุดไปทางบวกหรือลบ แต่เพียงทางเดียว สำหรับสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงรอบ จุดกลางก็อาจทำได้โดยการใช้โวลเตจไฟตรงไบอัสเข้าไปก่อน การเปลี่ยนสัญญาณที่เป็น โวลต์ให้อยู่ในรูปความถี่ในทอจอาศัยไอซี VFC (voltage to frequency converter) เสถียรภาพ และคุณสมบัติเชิงเส้นของไอซีพวก VFC ( LM 331 ) จึงมีข้อจำกัดเกี่ยวกับ คุณภาพของไอ ซี เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เพราะต้องการการเปลี่ยนแปลงความถี่ในช่วง กว้างมาก จากโวลเตจเป็นศูนย์ถึงค่าสูงสุดของสัญญาณ ในการทดลอง

นี้ ใช้ VFC เปลี่ยนสัญญาณที่มีค่า 0 - 10 v จึงไม่สามารถใช้พวก VCO ธรรมดาได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การมัลติเพล็กซ์ (multiplexing)

คุณสมบัติที่ขงใยนำแสงคือมีแบนด์วิดท์กว้าง จึงบรรจุข้อมูลข่าวสารได้มาก จำเป็นต้องมีการมัลติเพล็กซ์ในเครื่องส่ง และดีมัลติเพล็กซ์ในเครื่องรับเพื่อให้ได้จำนวนช่องสัญญาณที่มากขึ้น จึงต้องมีลักษณะกำหนดช่องสัญญาณให้ถูกต้องคือต้องมีการซิงโครไนซ์ (synchronization) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า ซิงค์ (sync) จะพิจารณาการมัลติเพล็กซ์ 3 แบบที่นำมาใช้ได้กับระบบใยนำแสง หรือระบบการสื่อสารโดยทั่วไป คือ การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่ FDM การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลา TDM และการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความยาวคลื่น WDM

#### การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่ FDM (Frequency Division Multiplexing)

การมัลติเพล็กซ์โดยวิธีนี้สัญญาณแต่ละช่องจะมีความถี่ย่อยเฉพาะช่อง แล้วทำการมอดูเลทสัญญาณแต่ละช่องกับความถี่ย่อย (subcarrier) ได้หลายแบบ แต่ที่เหมาะสมในการส่งผ่านใยนำแสงคือ FM แต่ละช่องสัญญาณจึงใช้ความถี่ต่างกัน เลือกให้พอกับแบนด์วิดท์ของสัญญาณ ทางด้านการรับใช้ PLL ที่มีควมถี่กลาง ตรงกับความถี่กลางของความถี่ย่อยตอนการส่ง และ lock range ต้องพอกับแบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ส่งมา ส่วนการส่งสัญญาณโทรศัพท์กับระบบไมโครเวฟ หรือสายแกนรวม ใช้สัญญาณเสียง (0-4 kHz) ทำเป็นกลุ่มสัญญาณ (group signal) หนึ่งมี 12 ช่องสัญญาณเสียง แต่ละช่องสัญญาณนำไปรวมกับความถี่ย่อยของตัวเอง ในไซตต์แบนด์ด้านเดียว นำ group มารวมกับเป็น 12, 24, 48 และ 60 ช่องสัญญาณ ไปรวมกับความถี่ย่อยของแต่ละ group ได้ 60 ช่องสัญญาณเป็น super group แต่ละ group มีแบนด์วิดท์ 48 kHz super group มีแบนด์วิดท์ 240 kHz ใช้การร่วมกับคลื่นพายย่อย ถัด ๆ ไปจนได้ master group ซึ่งประกอบด้วย 600 ช่องสัญญาณเสียงมีแบนด์วิดท์ 2.52 MHz ส่วนสัญญาณใน group จะรวมกับคลื่นพายย่อยแบบใดก็ย่อมทำตามสะดวก

#### การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลา TDM (Time Division Multiplexing)

การมัลติเพล็กซ์แบบนี้แบ่งช่วงเวลาให้กับแต่ละช่องสัญญาณที่ทำการสุ่ม (sampling) ในช่วงเวลาที่เท่ากันเป็นลำดับอนุกรมของช่องสัญญาณที่มี จึงสามารถนำสัญญาณหลาย ๆ ช่อง เฉพาะช่วงการสุ่มมาเรียงลำดับอนุกรมกัน ส่งไปในตัวนำสัญญาณสายทองแดงคู่เดียวได้ หรือในใยนำแสงเพียงเส้นเดียว จำเป็นต้องมีช่องสัญญาณสำหรับการซิงค์อย่างน้อย 1 ช่องสัญญาณ หากเป็น PCM ในแต่ละช่องสัญญาณ

อาจจำเป็นต้องมีมัลติเพล็กซ์เพื่อจะใช้ออกลำคับบีทของแต่ละช่องสัญญาณ ปัจจุบันการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลาได้รับความนิยมมาก ในระบบ PCM เพราะทำได้สะดวก ในการกำหนดช่องสัญญาณได้จากสัญญาณซิงค์ และมีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านได้ ( low pass filter ) เพื่อให้ได้รูปสัญญาณใกล้เคียงกับที่ถูกต้องมากที่สุด

การมัลติเพล็กซ์ด้วยการแบ่งความยาวคลื่น WDM (wavelength Devision Multiplexing )

กรรมวิธีในการผลิตใยนำแสงพัฒนาให้ก้าวหน้าขึ้นมา มีการลดทอนที่ช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ ใกล้เคียงกัน ในช่วงคลื่นยาว 1.0, 1.1, 1.2, 1.3 และ 1.5  $\mu\text{m}$  การส่งสัญญาณเฉพาะความยาวคลื่นหนึ่ง ๆ จะเหลือแบนด์วิดท์ของความยาวคลื่นอื่นที่ไม่ถูกใช้เหลืออีกมาก ถ้าหากใต้นำมาใช้คือในแต่ละช่วงความยาวคลื่นอาจจะทำการมัลติเพล็กซ์หรือมอดูเลตสัญญาณมาแบบใดก็ได้แล้วแต่ แล้วนำแต่ละความยาวคลื่นส่งเข้าใยนำแสงเส้นเดียวกัน โดยอาศัยอุปกรณ์ทางแสงเข้าช่วยจะเป็นการขยายแบนด์วิดท์ของการสื่อสารของใยนำแสง หรือลดความคับคั่งของสัญญาณในแต่ละความยาวคลื่นลงได้ แต่ทั้งนี้คงจะเป็นในอนาคตหลังจากที่ระบบใยนำแสง เฉพาะช่วงความยาวคลื่นได้รับการพัฒนาใช้งานได้อย่างดีทั้งระบบแล้ว

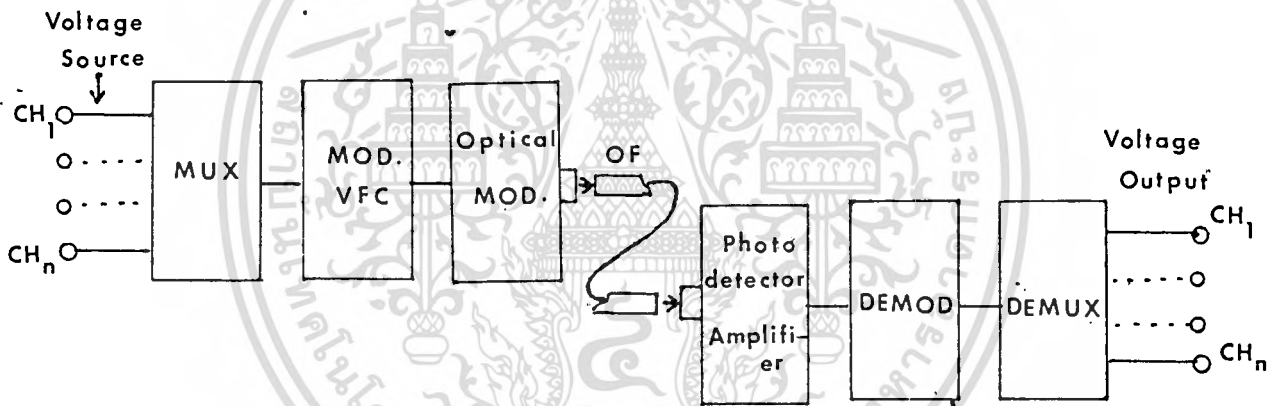
### 3.4 การนำระบบไปใช้ทดลอง

ในการทดลองนี้ ใช้มัลติเพล็กซ์เลือกช่องสัญญาณแบบแบ่งช่วงเวลาโดยสร้างพัลส์สำหรับเลือกช่องสัญญาณ 16 ช่อง วนอนุกรม สัญญาณที่เป็นระดับโวลเตจของแต่ละช่องจะเข้าไปทำการมอดูเลตแบบ VFC ตามลำดับ ช่องสัญญาณที่ใช้ในการซิงค์ จะเลือกช่องใดก็ได้ แต่ในที่นี้ใช้ช่องที่ 16 โดยพัลส์ของสัญญาณในช่องนี้มีความแตกต่างจากช่องอื่นที่ให้ออกเป็นสัญญาณซิงค์ ; ในเครื่องรับ ความถี่ที่ได้จาก VFC จะเอาไปมอดูเลตเป็นกระแสไฟฟ้าไบอัส LED ให้แสงออกเป็นพัลส์ตามความถี่สัญญาณ แล้วคับปลิงเข้าใยนำแสง พลังงานแสงเข้าสู่ใยนำแสงได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดแสง และประสิทธิภาพการคับปลิง

การออกแบบวงจร

4.1 แนวคิดในการออกแบบวงจร

จากที่กล่าวมาแล้วในบทสนสัญญาณที่ต้องการจะส่งผ่านใยนำแสงต้องจัดให้อยู่ในรูปดิจิทัล หรือพัลส์รูปเหลี่ยม เพื่อให้ได้ช่องสัญญาณที่มากตามแบนด์วิธที่กว้างของใยนำแสงจึงต้องทำการมัลติเพล็กซ์ด้านการส่ง และดีมัลติเพล็กซ์ด้านการรับ เพราะยังทำการส่งสัญญาณได้ข้อมูลมากเท่าไรโดยใช้ใยนำแสงเป็นข้อได้เปรียบของระบบนี้มากขึ้นเท่านั้น การส่งสัญญาณแบบ PCM หรือถ้ามี A/D ค่าใช้จ่ายต่อช่องสัญญาณจะสูง แนวทางการประหยัดที่จะทำได้คือเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกเป็นความถี่ของออสซิลเลเตอร์ โดยใช้ VCO. หรือ VFC และทำการมัลติเพล็กซ์ให้ได้ช่องสัญญาณที่มาก สำหรับในการทดลองนี้ ใช้การทำมัลติเพล็กซ์เพื่อเลือกสัญญาณที่ละช่องตามลำดับ แล้วนำสัญญาณเข้า VFC เพียงชุดเดียว ทำให้ประหยัดเพราะทุกช่องต่างใช้ VFC ร่วมกัน



ภาพที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงแนวคิดในการสร้างเครื่องส่งเครื่องรับ

ลักษณะที่สำคัญที่จะใช้กับวงจรที่ออกแบบไว้คือ แหล่งสัญญาณของแต่ละช่องเป็นระดับโวลเตจ โดยมีข้อจำกัดว่าการเปลี่ยนแปลงโวลเตจไปทางบวกทางเดียว และแต่ละช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงระดับโวลเตจช้า คิดเป็นความถี่ไม่เกิน 1 Hz เพราะความถี่ที่สู่มในการเลือกช่องสัญญาณแต่ละช่องประมาณ 5 Hz ซึ่งเป็นความถี่ต่ำสุดของวงจร PLL ทางด้านเครื่องรับจะอยู่ในlock rangeได้ โวลเตจจึงควรมาจากอุปกรณ์ เช่น เครื่องวัดอุณหภูมิ เครื่องวัดความชื้น หรือสัญญาณควบคุมที่อยู่ในภาวะตรรก ( logic )

"1" หรือ "0" หรืออาจใช้ของสัญญาณ 1 ช่องแทน 1 บิต ในกรณีต้องการส่งข้อมูลเป็นบิต ถ้าต้องการเพิ่มแบนด์วิดท์ของวงจรต้องมีการเพิ่มตามไปด้วยทุกส่วน ซึ่งไม่ค่อยสะดวก พิจารณาเครื่องรับเครื่องส่งในรายละเอียดคือ

#### 4.2 เครื่องส่ง (Transmitter )

##### 1. การมัลติเพล็กซ์ ( multiplexer )

- สัญญาณนาฬิกา ( System clock )
- วงจรหาร ( Divider )
- วงจรเลื่อนข้อมูล ( Shift register )
- วงจรเลือกช่องสัญญาณ อนุโลกสวิตช์ ( channel selector )

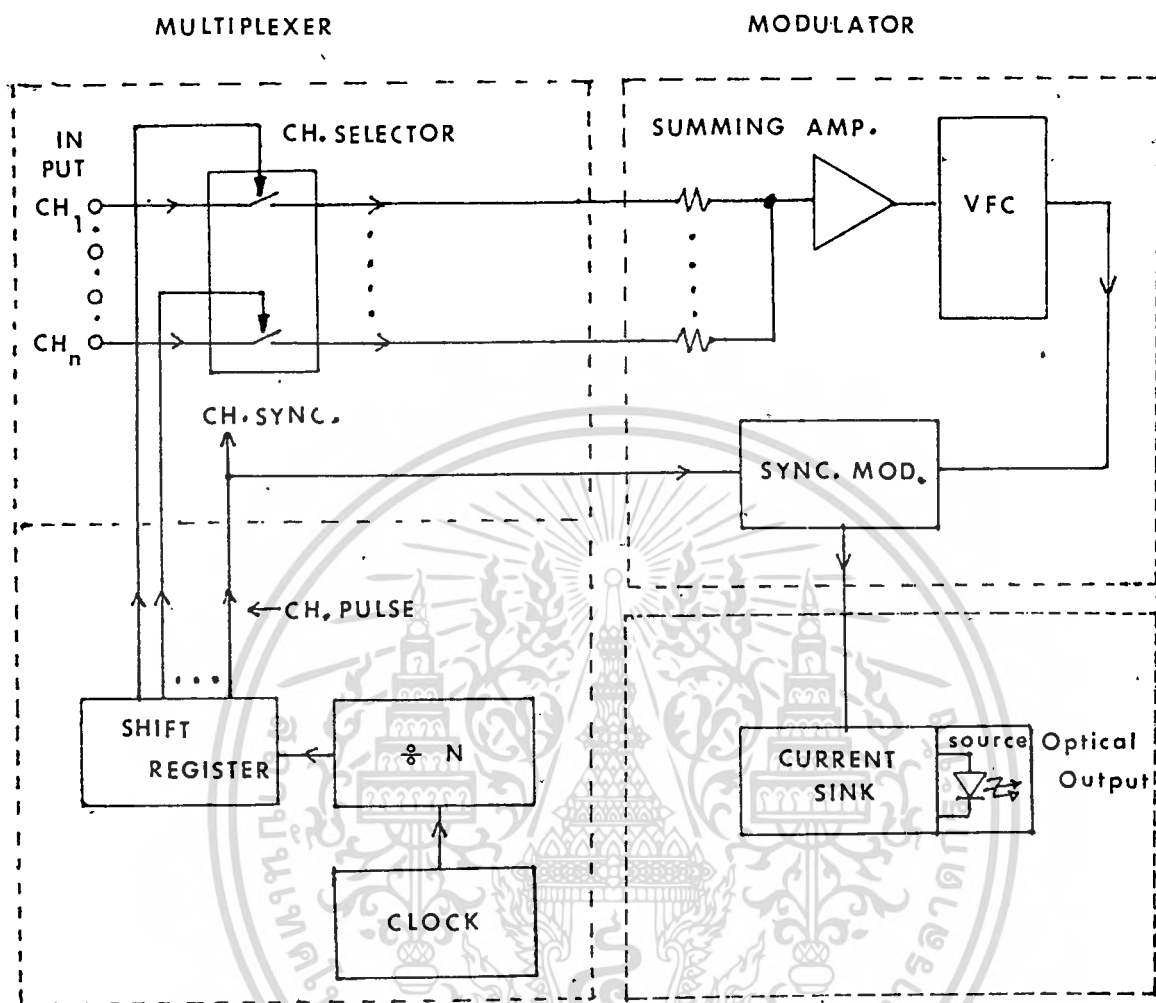
##### 2. การมอดูเลตสัญญาณ

- เปลี่ยนระดับโวลเทจเป็นความถี่ ( Voltage to frequency converter )
- การรวมสัญญาณซิงค์ ( Synchronization )

##### 3. การเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นแสง

- วงจรไทกระแสซิงค์
- อุปกรณ์เปลี่ยนไฟฟ้าเป็นแสง LED

ซึ่งพอจะแยกรายละเอียดเป็นบล็อกไดอะแกรมได้

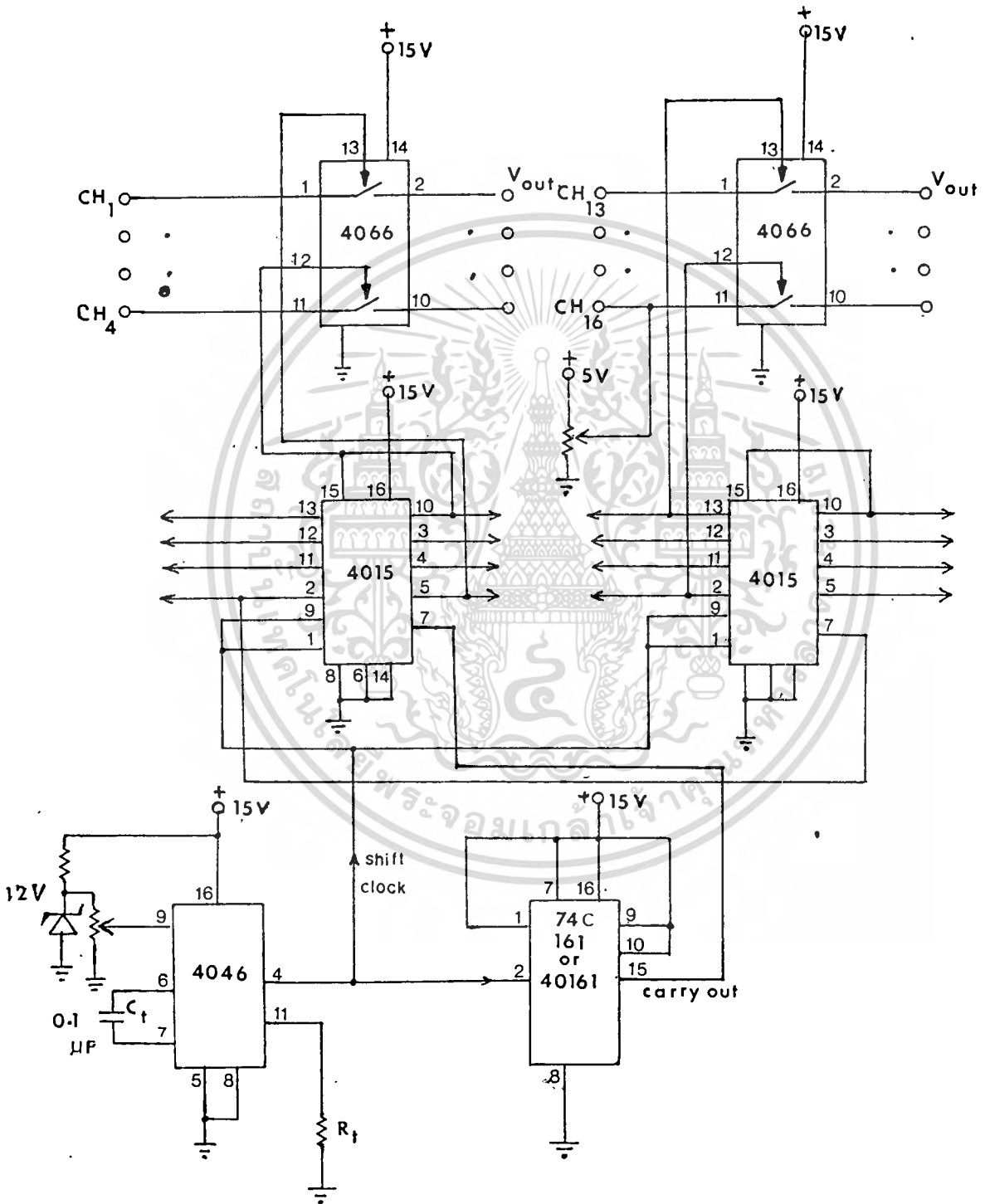


ภาพที่ 4.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

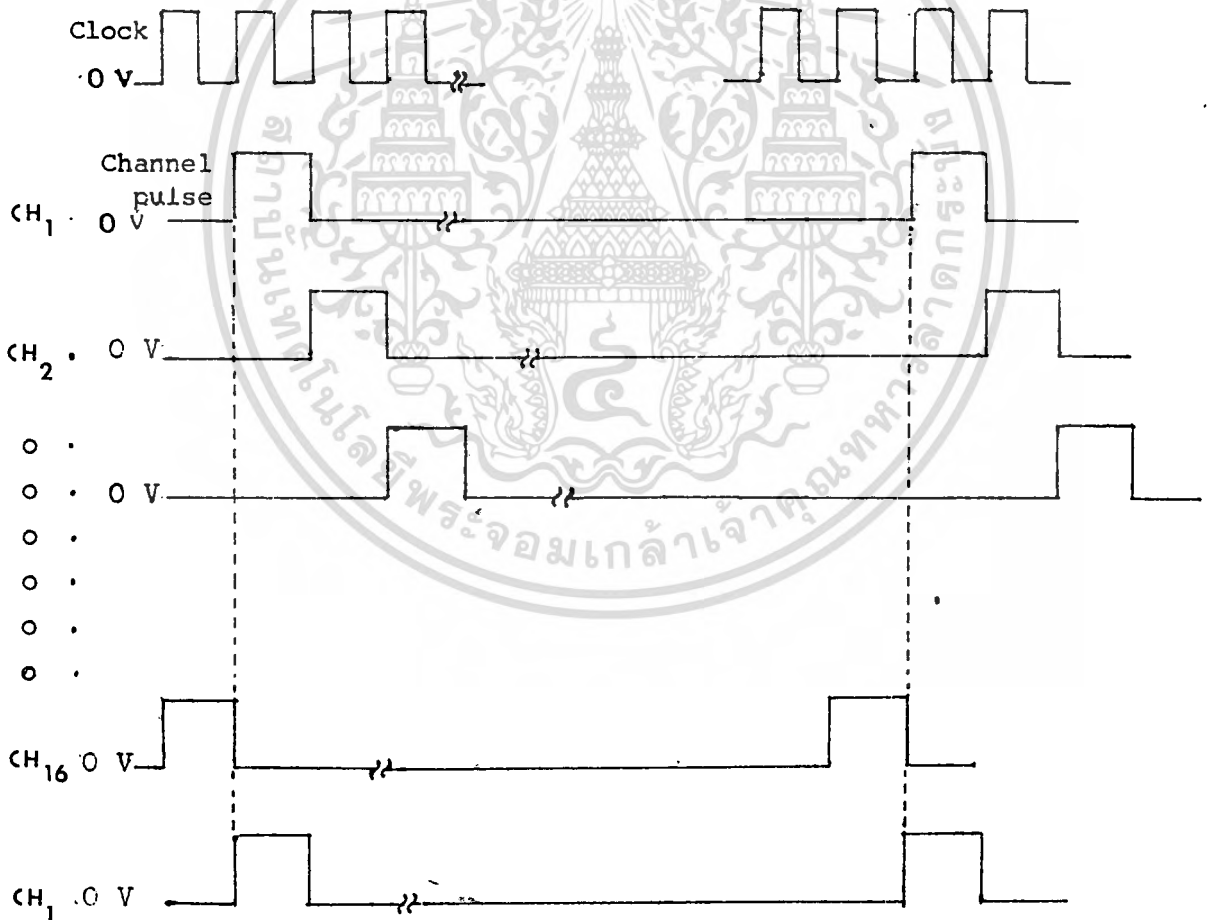
รายละเอียดวงจรแต่ละส่วนและการทำงาน

การมัลติเพล็กซ์



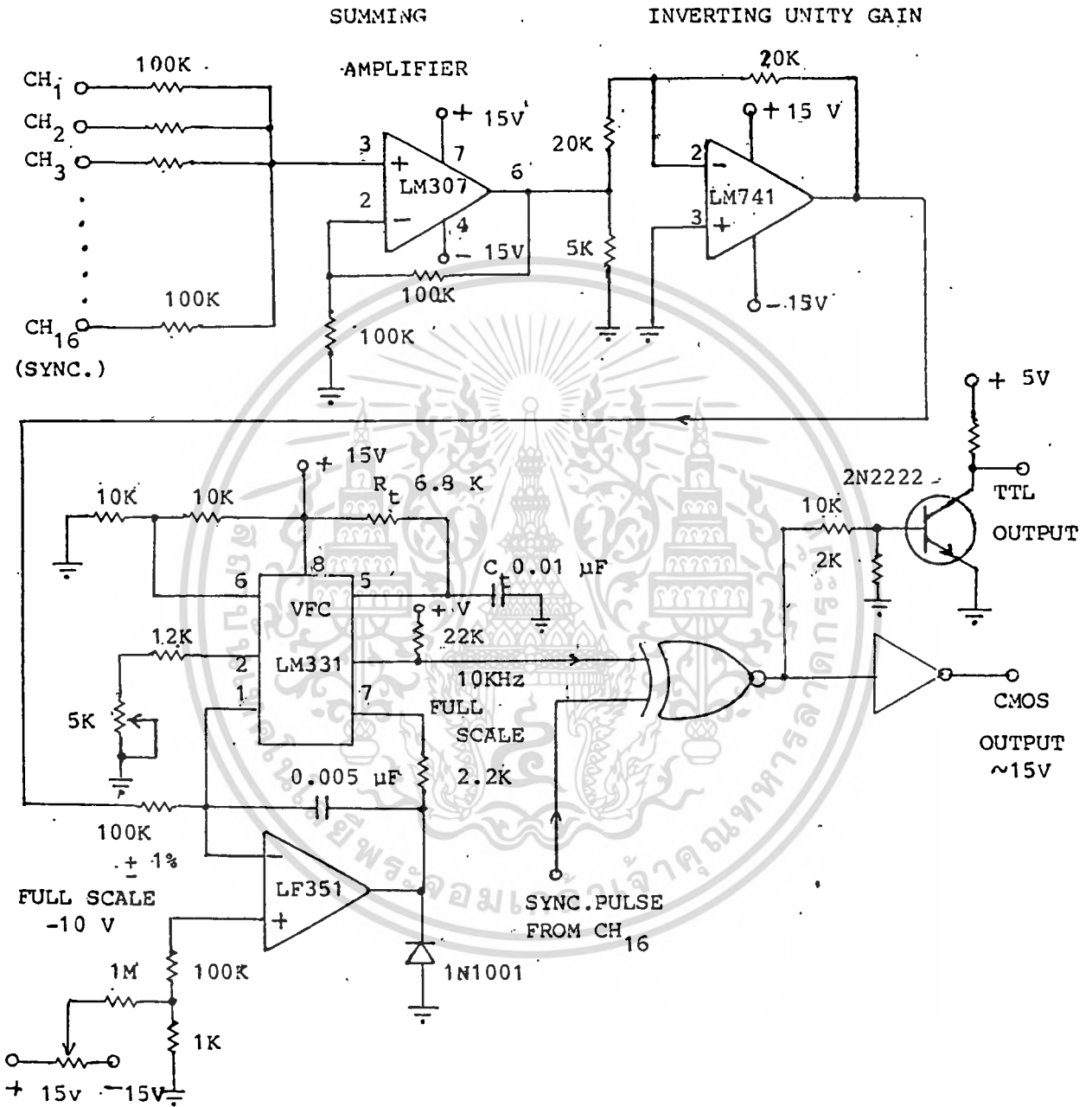
เอกสารนี้เป็นรูปที่ 4.3 วงจรสำหรับการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรการทดลองใช้ไอซีพวก CMOS เกือบทั้งหมดเพราะใช้กับความถี่ต่ำ ใช้กระแสต่ำ การรบกวนต่ำ 4046 สร้างความถี่ที่ประมาณ 80 Hz นำความถี่ที่ได้ไปหารตามจำนวนช่องที่ต้องการ ในที่นี้หาร 16 โดย 74c161 จะให้พัลส์ที่เป็น carry ที่มีความกว้างเท่ากับ 1 clock cycle นำเข้าเลื่อนข้อมูล ด้วย 4015 16 ครั้ง ได้พัลส์วนรอบ 16 พัลส์ นำไปเป็นพัลส์สำหรับเลือกช่องสัญญาณ ควบคุมการเลือกช่องสัญญาณของอนาล็อกสวิตช์ เมื่อพัลส์ "1" แล่งโวลเตจจะออกทาง input ของอนาล็อก สวิตช์ ซึ่งเป็นไอซี 4066 ตัวละ 4 ช่องสัญญาณ



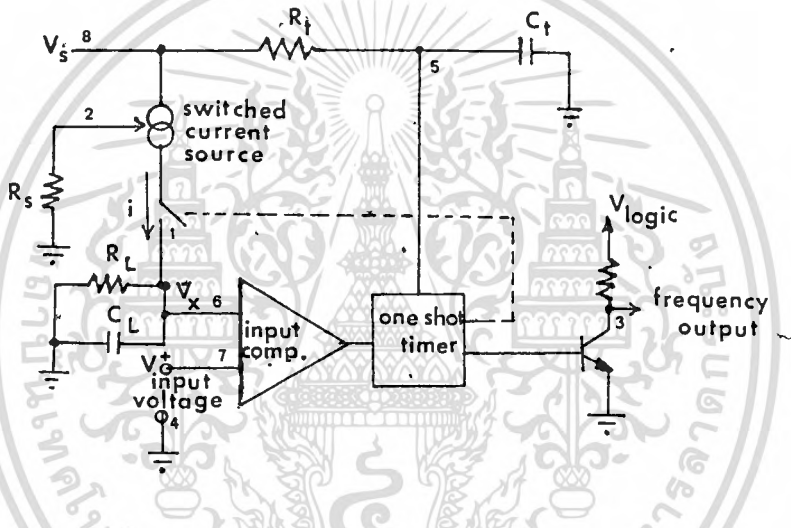
ภาพที่ 4.4 แสดงพัลส์ส่วนเป็นลำดับ สำหรับ เลือกช่องสัญญาณ

การมอดูเลตสัญญาณและซิงค์



รูปที่ 4.5 แสดงวงจรมอดูเลตสัญญาณออกเป็นพัลส์ ความถี่ขึ้นอยู่กับแหล่งโวลเตจของแต่ละช่องสัญญาณ และใช้ช่องสัญญาณที่ 16 สำหรับซิงค์

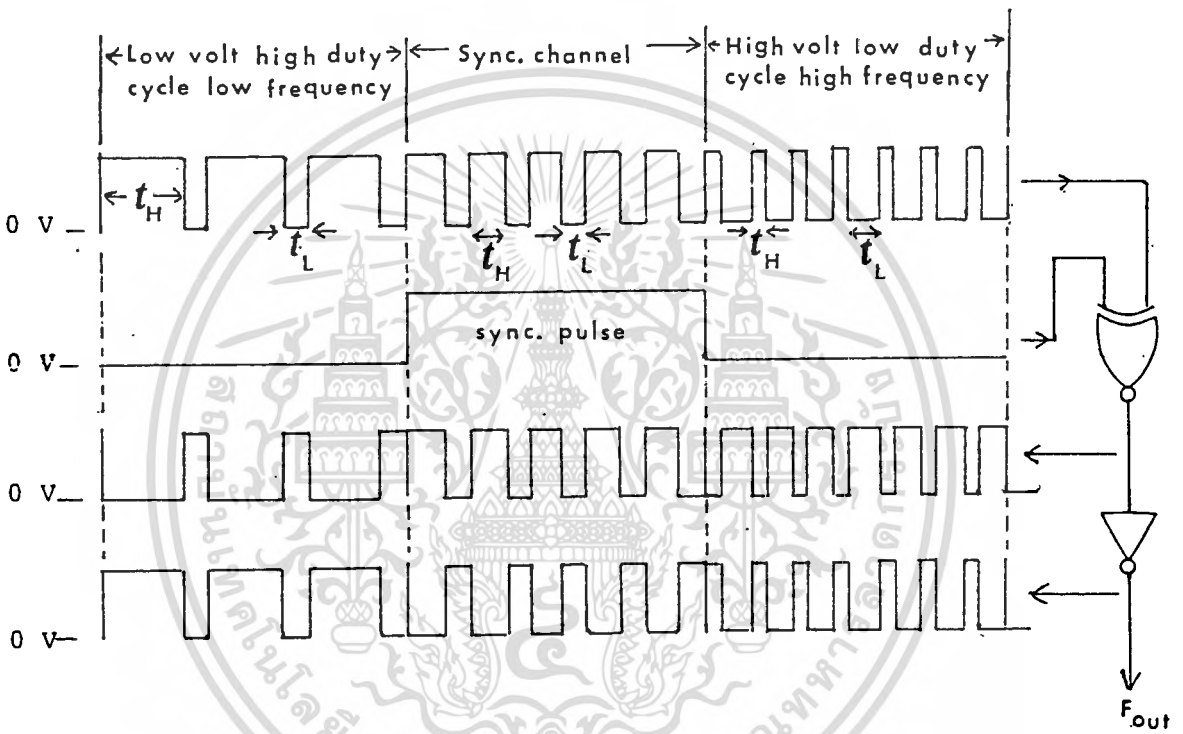
การทำงานของวงจรสำหรับมอดูเลตสัญญาณและซิงค์เริ่มต้นจาก Summing amplifier เพื่อให้โวลเตจของสัญญาณทุกช่องที่ส่งมาไคผ่านเข้ามาที่ละช่อง อาจจะเป็น unity gain หรือปรับการขยายเล็กน้อยเพื่อชดเชยกับการสูญเสียโวลเตจไปจากคักยัคครอมอิมพีแดนทาง output ของวงจรมัลติเพล็กซ์ไปบาง จาก Summing amplifier เป็น unity gain inverting กลับคักยัคของสัญญาณให้เป็นลบเพื่อป้อนเข้า FVC ซึ่งเป็น LM 331 มีการทำงานดังวงจรที่คักยัคที่แสดงไว้



ภาพที่ 4.6 แสดงวงจรที่คักยัคของ LM 331 VFC [7]

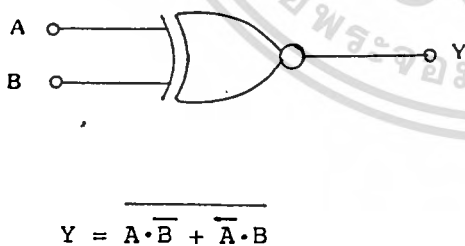
เมื่อโวลเตจป้อนเข้าทางขา 7 เป็น  $v_1^+$  มีค่าสูงกว่า  $v_x$  ที่ขา 6 คอมพาราเตอรจะให้คักยัค ทางออกสูงจิงไป "ON" ทรานซิสเตอร์ทาง out put และสวิตช์ที่เป็น current source จะมีกระแส  $i$  ไหลไปประจุ  $C_L$  โดยมีจำนวนประจุ  $Q = i \times t$  โดยที่  $t = 1.1 R_T C_T$  จะต้องเลือกให้พอกับที่จะให้  $v_x$  มีค่าสูงกว่า  $v_1^+$  ได้ เมื่อ  $v_x \geq v_1^+$  กระแส  $i$  จะหยุดไหลโดยสวิตช์ควบคุม "OFF" timer จะ reset ตัวเอง  $C_L$  จะปล่อยประจุผ่าน  $R_2$  จน  $v_x$  ต่ำกว่า  $v_1^+$  จะเริ่มต้นรอบใหม่ กระแสออกจาก  $C_L$  คือ  $v_x/R_L \cong V_{IN}/R_L$  ตามวงจร ในภาพที่ 4.6 ถ้า  $V_{IN}$

ค่ากระแสประจุ  $C_L$  ได้ช้าความถี่จึงต่ำ ช่วงเวลาการ "ON" ของทรานซิสเตอร์ทาง output แคบ พัลส์ที่ออกจึงมีช่วง "Low" แคบ  $Duty\ Cycle = \frac{t_H}{t_H+t_L}$  มากกว่า 50 % ส่วนถ้า  $V_{IN}$  สูง กระแส  $i$  มาก ประจุ  $C_L$  ได้เร็ว ให้ความถี่สูง พัลส์ที่ออกช่วง "High" แคบ  $Duty\ Cycle$  น้อยกว่า 50 % เมื่อโวลเตจที่ป้อนเข้า  $V_{IN}$  เป็นศูนย์  $f_{out} = 0$  ที่ output มี Pull up resistor ต่อกับไฟบวก output จึง "High" ตลอด และสามารถเลือกระดับโวลเตจ output ได้ด้วยไฟบวกที่ต่อกับ Pull up resistor



ภาพที่ 4.7 แสดงพัลส์ที่ออกจาก VFC เทียบกันระหว่างช่องสัญญาณที่  $V_{IN}$  สูงกับค่า และการกลับเฟสของช่องสัญญาณสำหรับซิงค์

$R_S$  คุมกระแสอ้างอิงซึ่งทำให้เกิดกระแส  $i$  ไปประจุ  $C_L$  จึงสามารถขับรับความถี่ทาง output ได้ตามสัดส่วนที่ต้องการเช่น โวลเตจเข้า  $10\text{ V}$  เต็มสเกล ให้ได้  $f_{out} 10\text{ kHz}$  เป็นต้น ข้อบกพร่องสำหรับ LM 331 คือ แม้วาโวลเตจ  $V_{IN}$  ทางขา 7 สูงกว่าที่ขา 6 แล้วยังตาม แต่ขา 5 มีโวลเตจต่ำกว่า  $2/3 V_{CC}$  สวิตช์คุมกระแสจะไม่ "OFF" ทรานซิสเตอร์จาก output จะไม่ "ON" กระแส  $i$  ไหลเข้าขา 1 ตลอดเวลาได้  $f_{out} = 0$  ซึ่งมักจะเกิดตอนภาวะเริ่มทำงานจึงต้องมีการปิดสวิตช์แหล่งจ่ายไฟและเปิดใหม่สังเกตโดยใหม่สัญญาณเตือนให้ทราบว่ามี  $f_{out}$  หรือไม่ การซิงค์โดยใช้ช่องสัญญาณช่องใดช่องหนึ่ง ในที่นี้ใช้ช่อง 16 ซึ่งต้องมีลักษณะพิเศษเพื่อให้ทางเครื่องรับสามารถกำหนดช่องสัญญาณได้ พิจารณาตาม duty cycle ของความถี่  $f_{out}$  ที่โวลต์ค่าความถี่ช่วงการ "ON" ของทรานซิสเตอร์ทาง output น้อย นั่นคือช่วงการ "LOW" ของแต่ละรอบจะแคบ ในทำนองกลับกัน ถ้า  $V_{IN}$  สูง ความถี่สูงช่วงการ "LOW" จะกว้าง อาศัยคุณสมบัติอันนี้ ถ้าให้ช่องสัญญาณสำหรับซิงค์มีโวลเตจคงที่ไม่เกินครึ่งหนึ่งของโวลเตจเต็มสเกลคือ  $<5\text{ V}$  ทดลองพบว่าไม่เกิน  $4.5\text{ V}$  การซิงค์จะทำได้ดี ทำการกลับเฟสเฉพาะช่องสัญญาณที่ใช้ซิงค์โดยป้อนสัญญาณจาก LM 331 ที่ขา 3 เข้ายัง X - NOR ที่ขาหนึ่งส่วนอีกขาหนึ่งป้อนพัลส์สำหรับเลือกช่องสัญญาณของช่อง 16 ความถี่ที่ออกจาก X - NOR ช่องอื่น ๆ ยกเว้นช่องที่ใช้ซิงค์จะกลับเฟสหมด พัลส์ของช่องที่ใช้ซิงค์จะมีเฟสเหมือนเดิม เมื่อทำการ Inverter ได้ความถี่  $f_{out}$  ช่องอื่นเหมือนที่ออกจาก VFC (LM 331) ส่วนช่องสำหรับซิงค์จะกลับเฟสอันเป็นลักษณะของพัลส์ที่แตกต่างไปจากช่องอื่น



A	B	Y	
		X-OR	X-NOR
0	0	0	1
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

ภาพที่ 4.8 แสดง exclusive - nor gate และตารางความจริง

เพื่อสะดวกในการนำ output ไปใช้งานต่อไป ได้เลือกใช้ Inverter ที่เป็น CMOS ให้ พัลส์ประมาณ 15 V และใช้ทรานซิสเตอร์เป็น Inverter ให้พัลส์ประมาณ 5 โวลต์ สามารถนำไป ขั้ว TTL ที่จะเลือกใช้การมอดูเลทให้แสงออกต่อไปได้

### การเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นแสง (Optical Modulation )

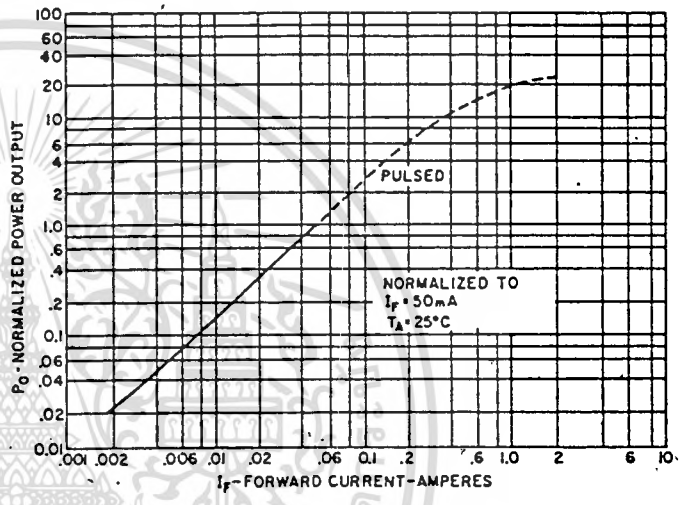
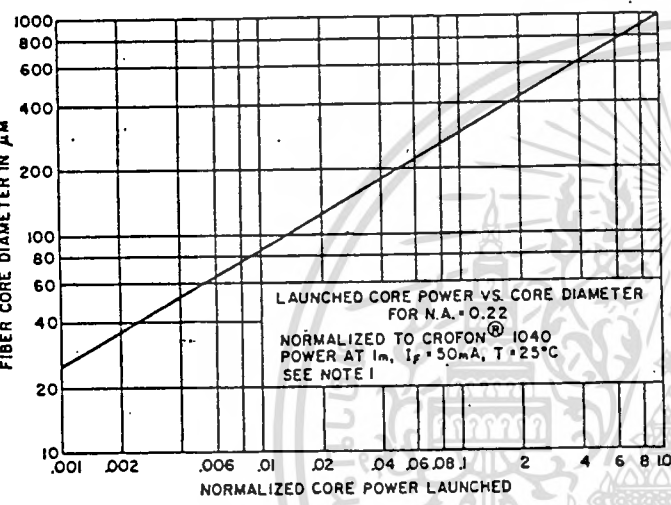
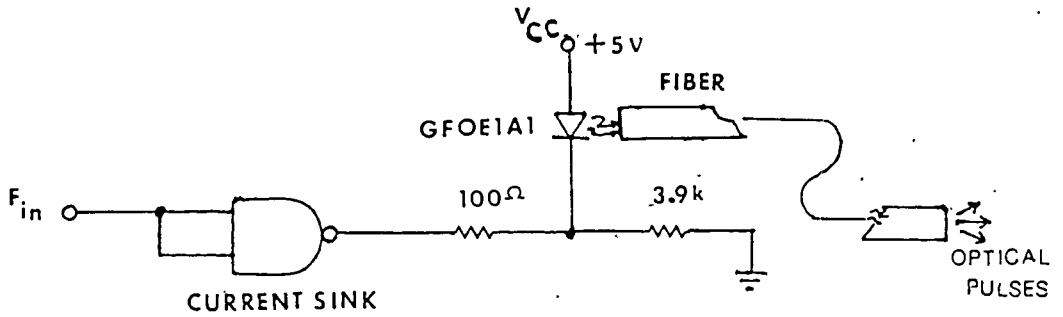
ในเครื่องส่งเมื่อใช้ VFC แล้วจำเป็นต้องนำสัญญาณที่ออก ความถี่เป็นพัลส์ในรูปกระแสไฟฟ้า เข้าไปทำ การมอดูเลทให้มีพลังงานไฟฟ้าขั้ว LED ให้ออกแสง ทำได้โดยการนำสัญญาณไปป้อนเกทหรือทรานซิสเตอร์ เป็น Current source หรือ Current sink ในที่นี้ใช้ Current sink โดย TTL ที่เป็น NAND gate พัลส์ที่ป้อนเข้า input ทั้งสองของ NAND gate จะลัดให้ Output ลงดิน กระแสจากแหล่งจ่ายไฟจะผ่าน LED ผ่าน R ที่ต่ออนุกรมระหว่าง LED กับ output ของ NAND เพื่อจำกัดกระแสที่จะผ่าน LED ให้พอเหมาะ LED ใช้ GFOE1A1 ของ General Electric เป็น GaAs ให้แสงออกมี peak ที่ 940 nm ตัว LED บรรจุอยู่ในกล่องมีหัวต่อเกลียวให้สามารถคัปปลิง แสงเข้าใยนำแสงได้ประสิทธิภาพสูง ไบอัสด้วยกระแสประมาณ 30 mA ให้กำลังแสงออกสู่ใยนำแสง ประมาณ 0.4 เท่าของที่ไบอัส 50mA ซึ่งตามคุณสมบัติที่ทดลองของผู้ผลิตให้พลังงานแสงเข้าสู่ใยนำแสงได้ 45  $\mu\text{W}$  ที่จุดไบอัสจึงให้แสงเข้าสู่ใยนำแสงได้ 18  $\mu\text{W}$  กับใยนำแสง CROFON 1040 ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1016  $\mu\text{m}$  ความไวของ p-i-n ในวงจรเครื่องรับประมาณ 30  $\text{nw}$  จึงสามารถส่ง โดยมีการลดทอนได้

$$L = 10 \log \frac{P_o}{P_{in}}$$

เมื่อ L คือ loss margin  $P_o$  output ของใยนำแสงหรือพลังงานแสงจากแหล่ง ก่อเกิดเข้าสู่ใยนำแสง  $P_{in}$  input ของเครื่องรับ

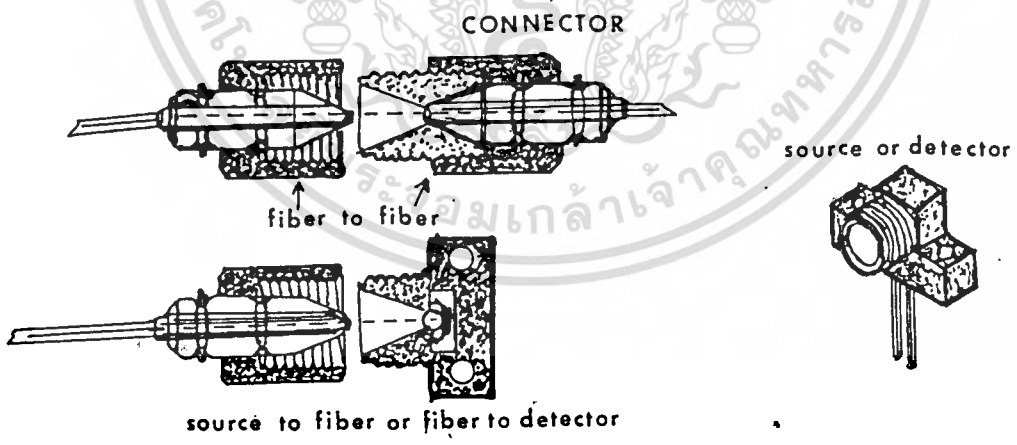
$$\therefore L = 10 \log \frac{18 \mu\text{W}}{30 \text{nw}} \approx 28 \text{ dB}$$

การสูญเสียพลังงานไปทั้งหมดในระบบ เป็นการสูญเสียไปเกิดจากการเชื่อมต่อ และการลดทอนในใย นำแสง การเชื่อมต่อโดยใช้หัวต่อเข้าเครื่องส่งเครื่องรับ สูญเสียพลังงานไปประมาณ 1-3 dB ที่เหลือ จึงเป็นการลดทอนในใยนำแสง การส่งสัญญาณจะได้ไกลเท่าไรจึงพิจารณาได้จากคุณภาพการลดทอนสัญญาณ ของใยนำแสง



POWER OUTPUT VS. FIBER DIAMETER

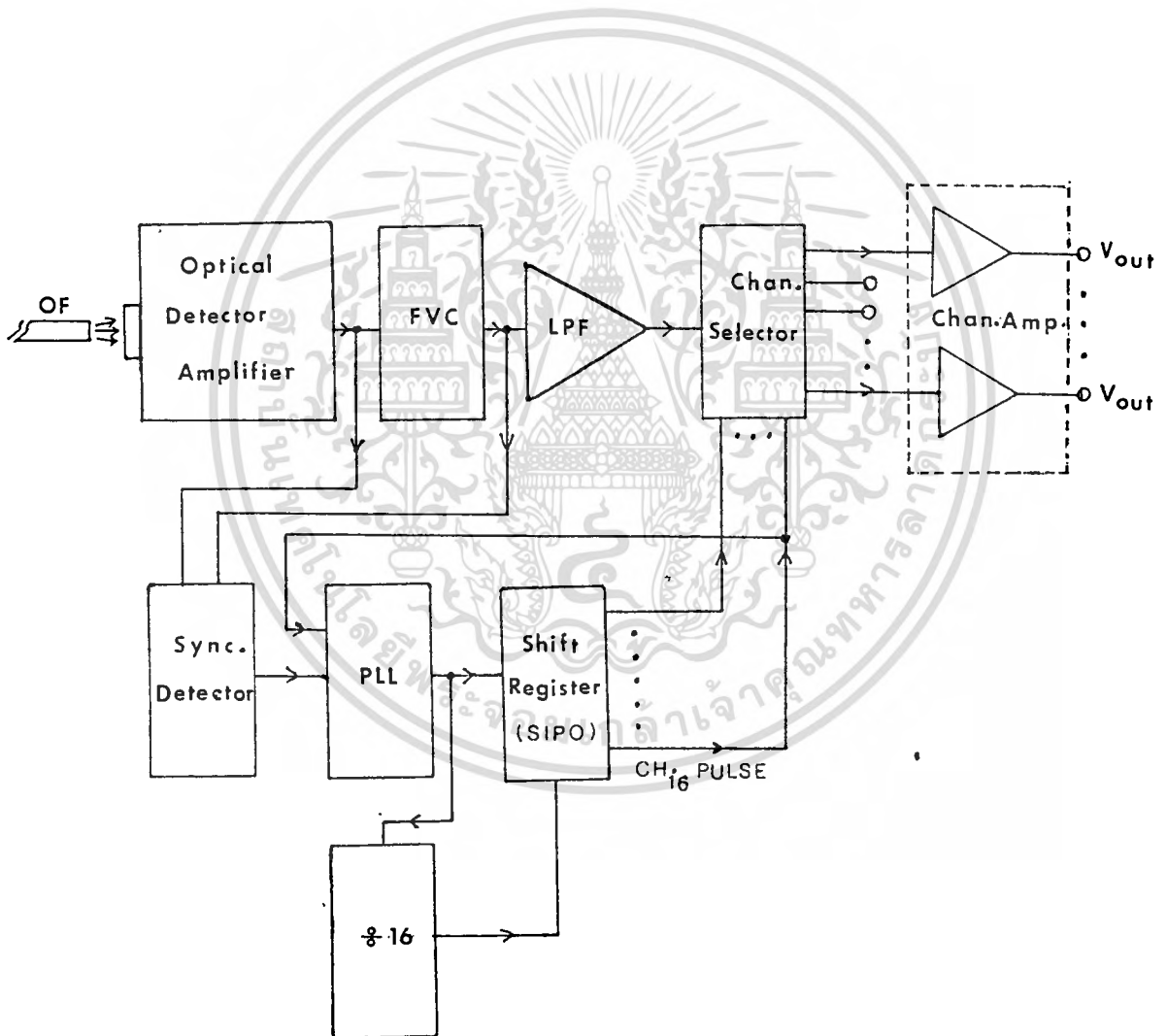
POWER OUTPUT VS. INPUT CURRENT



ภาพที่ 4.9 แสดงวงจรขับแสง LED ตารางคุณสมบัติการให้แสงเข้าสู่ใยนำแสงของแหล่งกำเนิดแสง และการเชื่อมต่อใยนำแสงจากแหล่งกำเนิดแสงสู่ใยนำแสงระหว่างใยนำแสงด้วยกัน หรือจากใยนำแสงสู่เครื่องรับ

### 4.3 เครื่องรับ ( receiver )

แนวความคิดทางเครื่องรับคือต้องเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นกระแสไฟฟ้า และต้องมีวงจรเพื่อทำการขยายสัญญาณ หลังจากนั้นต้องทำการกำหนดช่องสัญญาณให้ได้โดยอาศัยสัญญาณซิงค์ที่ส่งมา เรียกว่า คีมัลติเพล็กซ์ และเปลี่ยนรูปสัญญาณในลักษณะที่มีความถี่เป็นพัลส์กลับคืนเป็นโวลเตจ เขียนบล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับได้



ภาพที่ 4.10 แสดงบล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับ

ในเครื่องรับทั้งหมดพอจะแยกรายละเอียดได้

### 1. โฟโตดีเทคเตอร์ (Photodetector )

- PIN ไดโอด
- วงจรเปลี่ยนกระแสเป็นโวลเตจ ( Voltage to Current Amplifier )
- วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ ( Comparator )

### 2. วงจรเปลี่ยนสัญญาณกลับคืน ( demodulator )

- เปลี่ยนความถี่เป็นโวลเตจ ( frequency to voltage converter = FVC )
- วงจรความถี่ต่ำผ่าน ( low pass filter = LPF )

### 3. การแยกช่องสัญญาณ ( demultiplexer )

- แยกซิงค์ ( Sync. Separator )
- Phase Lock Loop (PLL)
- วงจรเลื่อนขอมูล (Shift register )
- วงจรเลือกช่องสัญญาณ ( Channel selector )
- วงจรขยายสัญญาณประจำช่อง ( channel amplifier )

อธิบายรายละเอียดและการทำงานของวงจรต่าง ๆ ได้

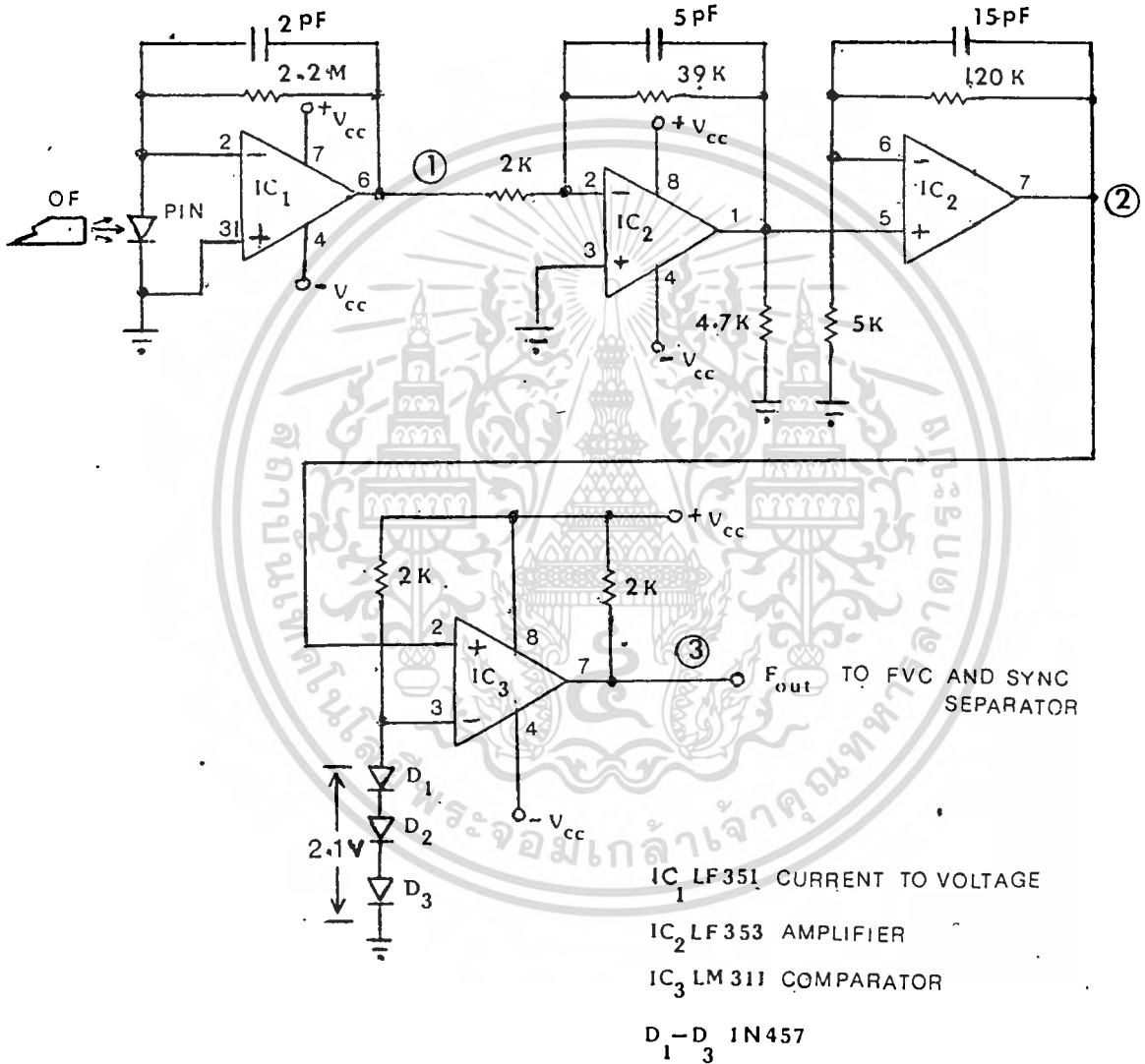
วงจรโฟโตดีเทคเตอร์ ใช้ p-i-n diode มีการรบกวนค่านำเอาเฉพาะตัวไดโอดจาก 3713R ของ BURR-BROWN มาออกแบบวงจรรับแสงใหม่ ใช้ LF 351 เป็น BIFET ออป-แอมป์ ทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสเป็นโวลเตจ

$$V_{out} = I_{in} R$$

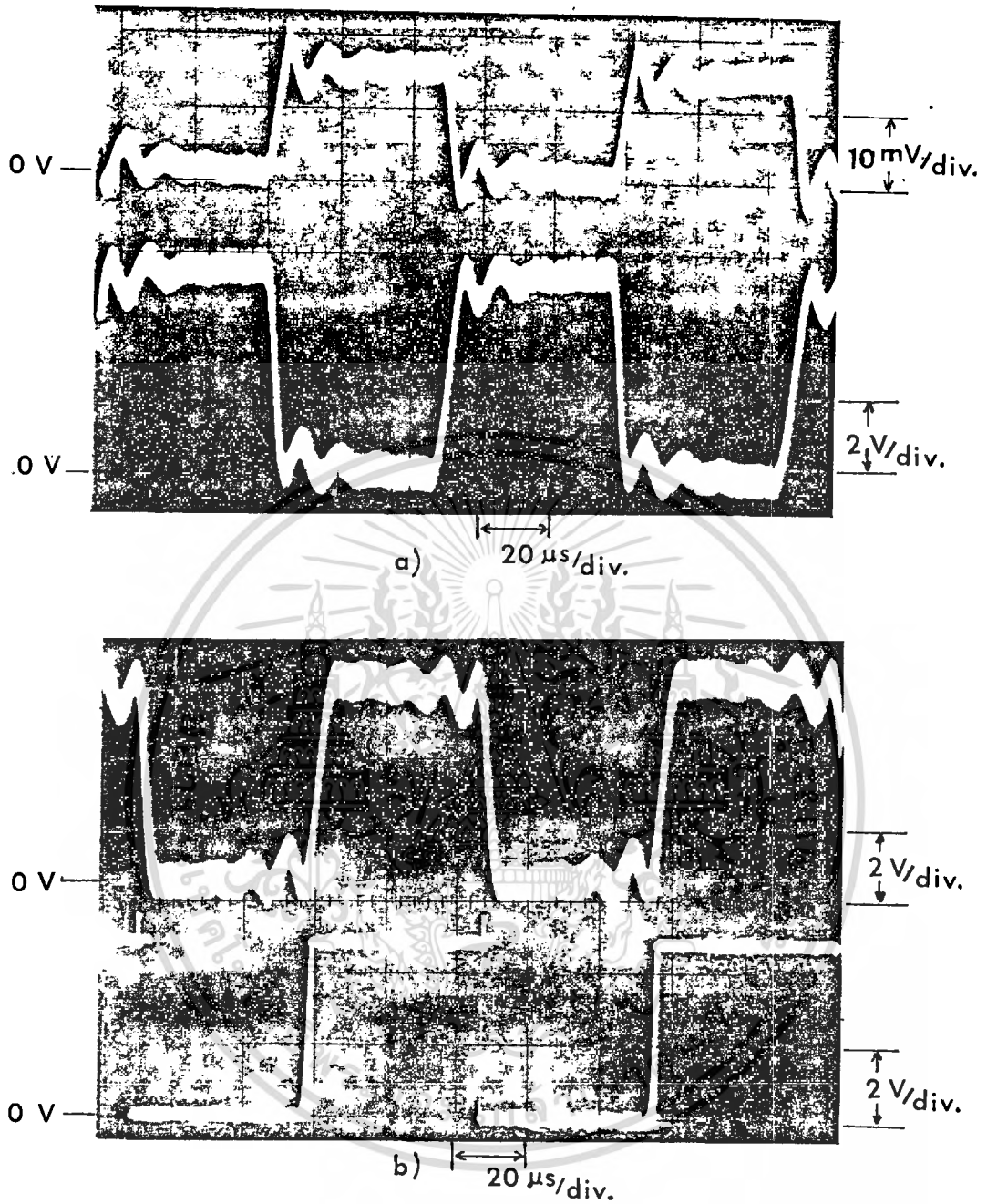
$I_{in}$  คือกระแส Photocurrent ที่ได้จาก p-i-n diode

ใช้ R 2.2 M $\Omega$  ให้สัญญาณเป็นโวลเตจมี peak ประมาณ 10 mv ตอบสนองต่อความถี่ได้ประมาณ 30 kHz ซึ่งเป็นการเพียงพอสำหรับการทดลองนี้ เพราะความถี่สูงสุดที่ใช้ในการส่งประมาณ 10 kHz

โวลเตจที่ออกมีลักษณะ over shoot มีฮาร์โมนิกส์ และการรบกวนผสมมอดูเลชันของสัญญาณ จึงนำไปเข้าวงจรขยายสองครั้งเพื่อให้ผลตอบสนองทางความถี่ดีขึ้น มีอัตราขยายรวมประมาณ 450 เท่า จึงเป็นการแน่นอนว่าต้องมีการรบกวนมากขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 4.11 แสดงวงจรภาพ Photo detector เปลี่ยน Photo current เป็นโวลเตจทำการขยายประมาณ 450 เท่า แล้วเข้าเปรียบเทียบสัญญาณไคเหมือนสัญญาณคอนสแตนต์

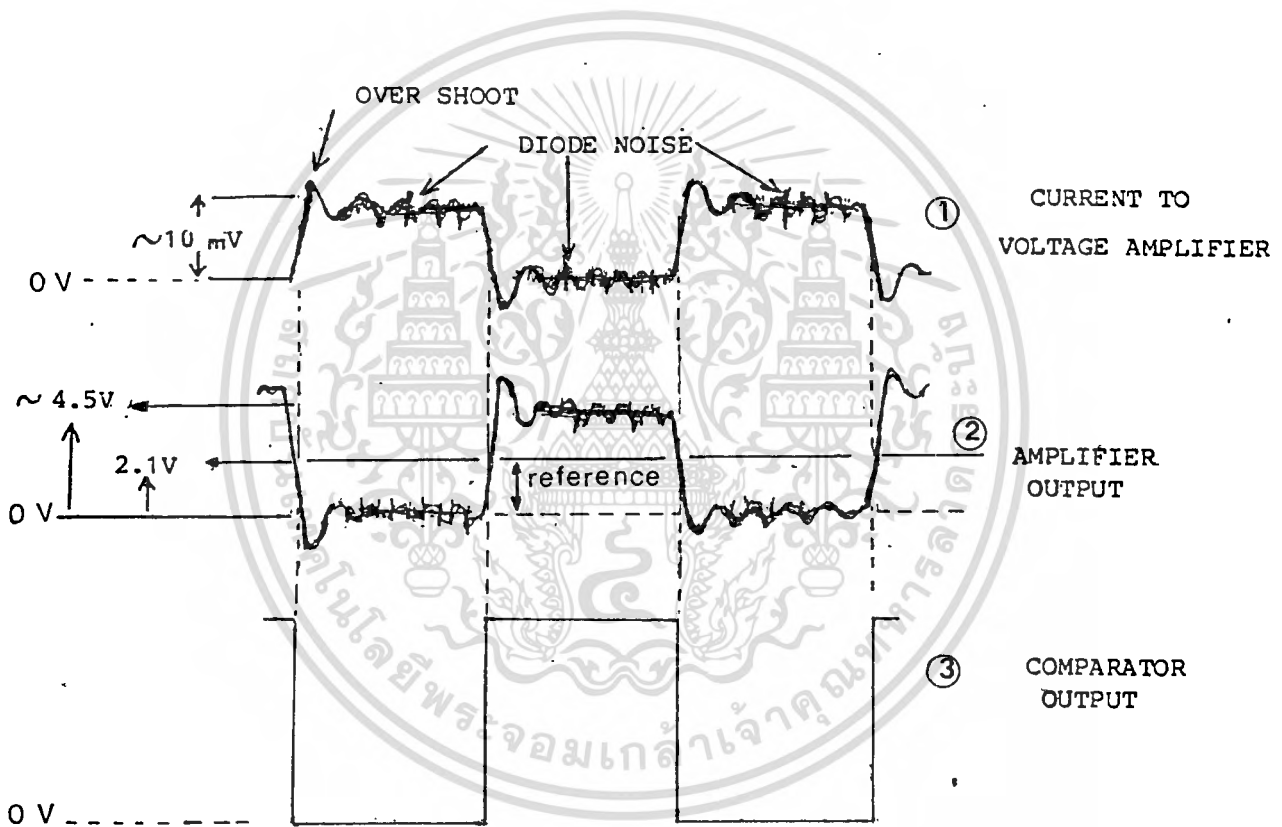


ภาพที่ 4.12 ภาพถ่ายจากออสซิลโลสโคปเปรียบเทียบสัญญาณจากจุดต่าง ๆ  
 ในวงจรเครื่องรับ

- a) สัญญาณจากวงจรเปลี่ยนกระแสเป็นโวลเตจ กับ วงจรขยายสัญญาณ  
 b) สัญญาณจากวงจรขยายสัญญาณกับ วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงต้องใช้การเปรียบเทียบสัญญาณที่ประมาณครึ่งหนึ่งของโวลเตจของพัลส์ที่ออกจากวงจรขยาย ประมาณ 4.5 V เข้าวจรเปรียบเทียบ LM 311 โวลเตจเปรียบเทียบอ้างอิงประมาณ 2.1 V ซึ่งเป็นระดับที่ตัดเอาระดับสัญญาณ damping หรือฮาร์โมนิค และการรบกวนออกไปทำให้ได้สัญญาณความถี่เป็นพัลส์ที่เหมือนกับเครื่องส่งออกมา

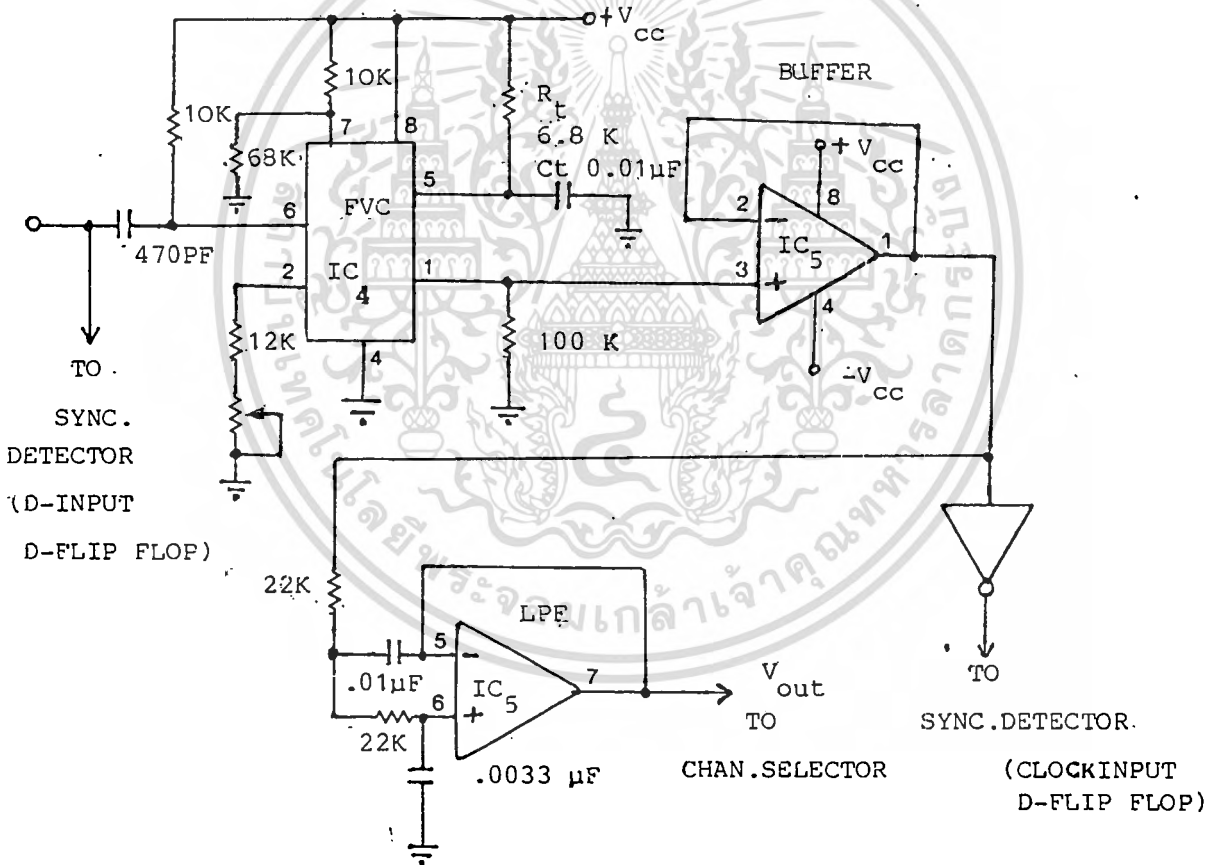


ภาพที่ 4.13 แสดงรูปสัญญาณตามจุดต่าง ๆ จากวงจรเปลี่ยนโวลเตจ เป็นกระแส ใช้วงจรขยายแบบกลับเฟสเพื่อให้ตรงกับ สัญญาณที่ส่งมาและใช้ระดับเปรียบเทียบสัญญาณ เพื่อเอา การรบกวนออก

สัญญาณที่ได้มาต้องนำไปเปลี่ยนกลับคืนของแต่ละช่องสัญญาณ ให้เป็นโวลเตจ การกำหนดของสัญญาณให้ถูกต้องจึงต้องมีคาร์แยกสัญญาณซึ่งคล้าย

วงจรคีมอคูเลเตอร์ ทำหน้าที่เปลี่ยนความถี่เป็นโวลเตจ

ใช้ LM 331 ที่เคยใช้เป็น VFC มาเป็น FVC โดยสัญญาณที่ได้เป็น output ของโฟโตดีเทคเตอร์มาเข้า LM 331 ซึ่งจะทำให้การกลับเฟสของสัญญาณกลายเป็น inverter แต่มีตัวกำหนดความกว้างของพัลส์คือ  $R_t C_t$



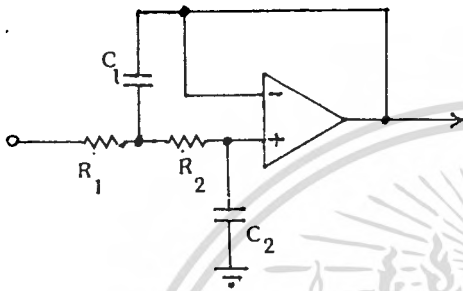
IC<sub>4</sub> FVC LM 331

IC<sub>5</sub> Buffer and Low Pass Filter LF353

IC<sub>6</sub> 4049

วงจรทำงาน แบบ negative - going edge เปลี่ยนเป็นโวลเตจตกคร่อมโหลด  $R_L$  ต้องมีวงจร buffer พัลส์ และผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน  $f_c = 10 \text{ kHz}$

เนื่องจาก output มีกระแสน้อยมาก เพื่อจะเอาไปใช้งานอื่นคือ นำไปแยกซิงค์



$$C_1 = \frac{R_1 + R_2}{\sqrt{2} R_1 R_2 \omega_c}$$

$$C_2 = \frac{2}{(R_1 + R_2) \omega_c}$$

ภาพที่ 4.15 แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เลือกค่า R - C ให้สอดคล้องกับความถี่ที่ต้องการ [ 8 ]

กำหนด  $R_1 = R_2 = R$   $\omega_c = 2\pi f_c = 2\pi \times 10\text{kHz}$   $C_1 = 0.001 \mu\text{F}$

หาค่า  $R = 22 \text{ k}$   
 $C_2 = 500 \text{ PF}$

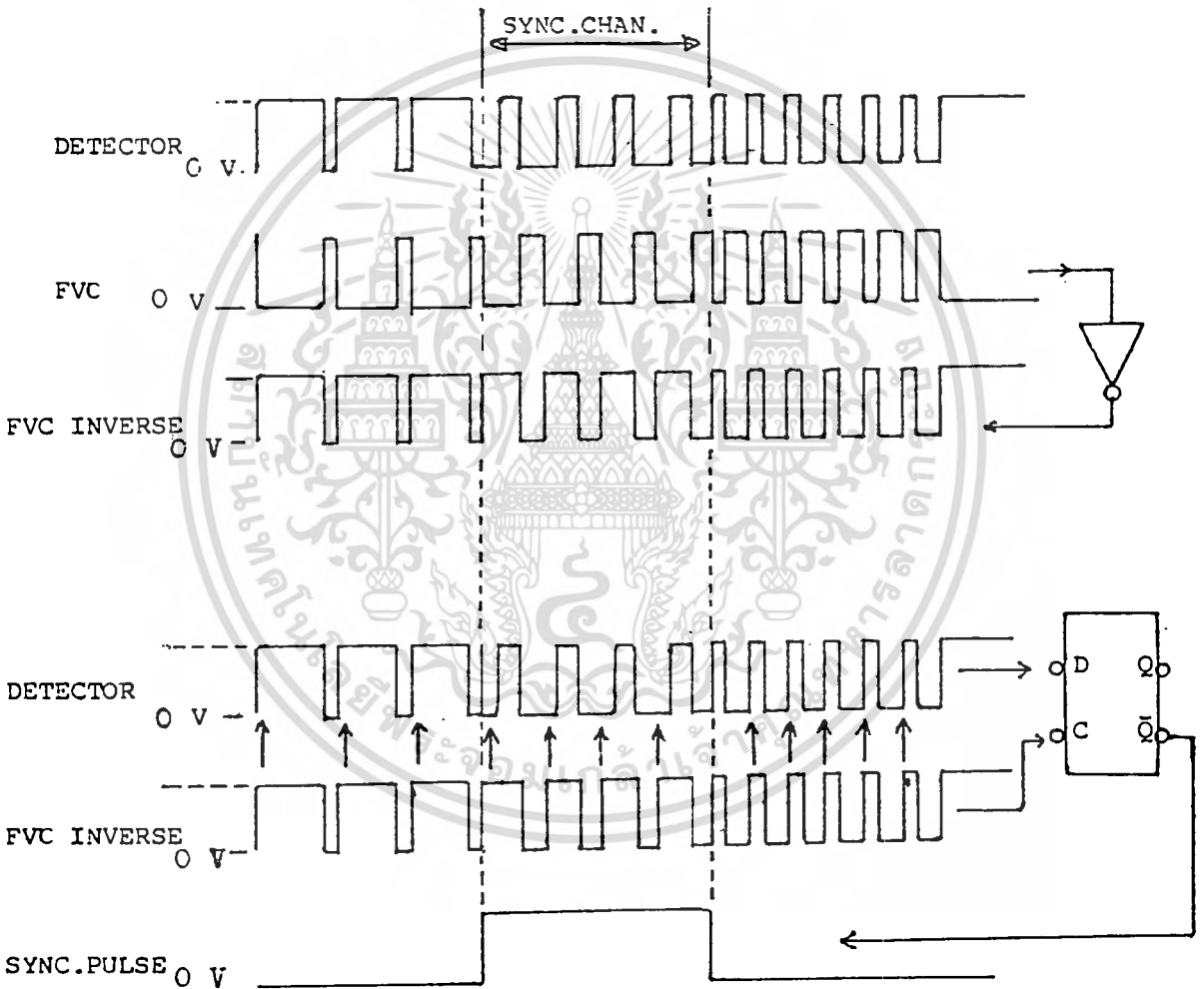
ความต้องการของการกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อให้เกิดโวลเตจที่เรียบ และมีค่า rise time ที่ดี เพื่อนำไปแยกช่องสัญญาณแล้วเกิดการรบกวนข้ามช่องน้อยที่สุด จากการทดลองพบว่าที่ความถี่สูงวงจรความถี่ต่ำผ่านทำให้โวลเตจที่ได้จากวงจรกรองความถี่เรียบดีมากอยู่แล้ว แต่จะมี ripple ที่ความถี่ต่ำ จึงเพิ่มค่า C เพื่อลด ripple ize

$R = 22 \text{ k}$  เท่าเดิมเปลี่ยนค่า  $C_1 = 0.01$   $C_2 \approx 0.003$

ที่ความถี่ต่ำโวลเตจเรียบดีขึ้น และมี rise time ดี พอที่จะไม่รบกวนข้ามช่องสัญญาณ

การแยกสัญญาณซิงค์

สัญญาณซิงค์ความถี่ที่แปลงมาจากไม่เกิน 4.5 v และจะมีพัลส์ช่วง "Low" กว้างกว่าช่องสัญญาณธรรมดาช่องอื่น จึงนำสัญญาณจากสองจุดคือจาก detector ป้อนเข้าที่ D input ของ D - FLIP FLOP และจาก FVC ก่อนเข้าวงจรกรองความถี่ต่ำมาทำการ inverse ป้อนเข้าที่ C clock



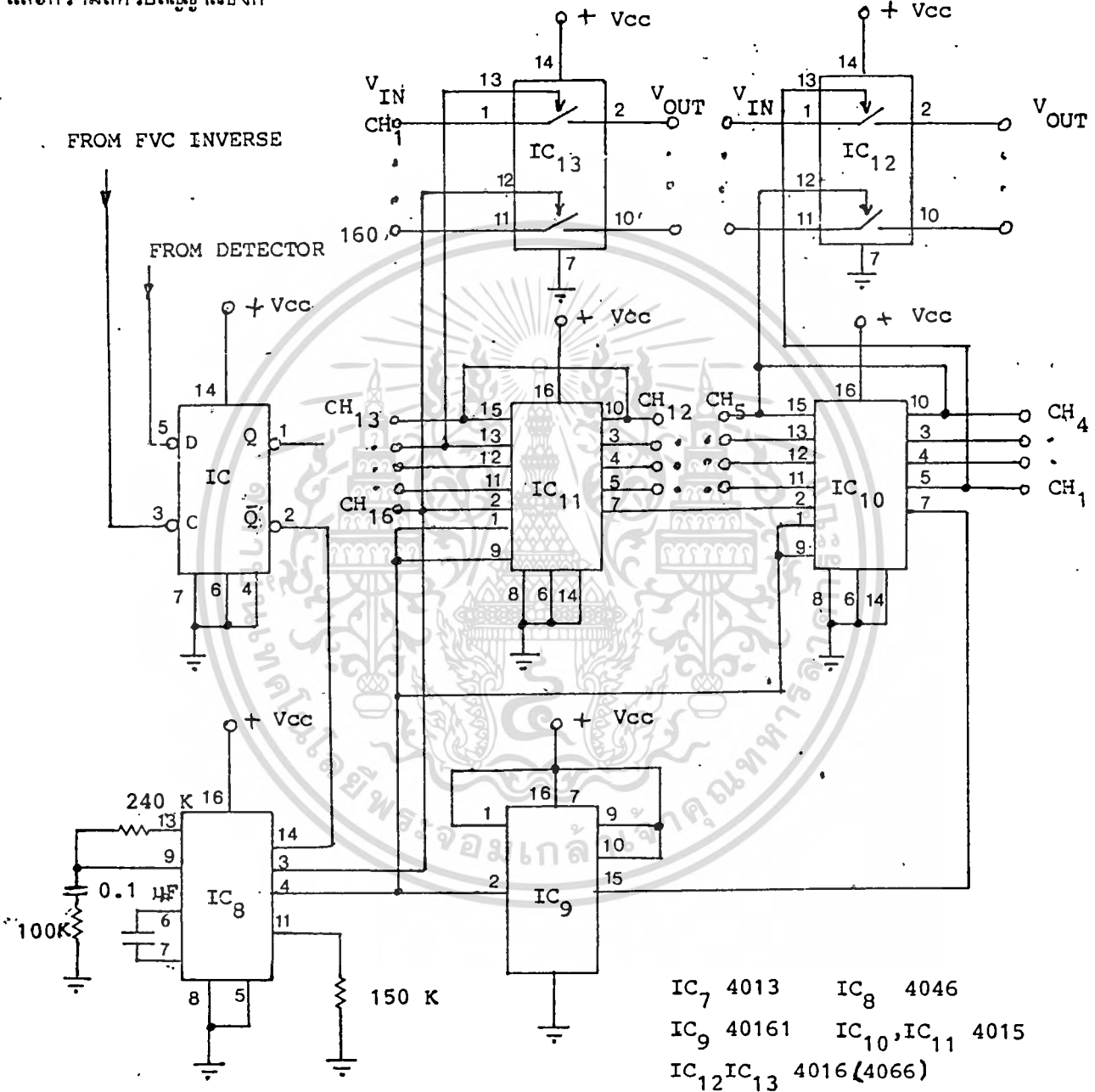
ภาพที่ 4.16 แสดงการแยกซิงค์พัลส์ออกจากช่องสัญญาณที่อนุกรมลำดับกันมาด้วย

D - FLIP FLOP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# วงจรมัลติเพล็กซ์

สัญญาณซิงค์ที่ได้นำมาเข้าวงจร PLL เพื่อคุมเฟสของ clock pulse ให้ตรงกับเครื่องส่ง ที่เป็นพัลส์ในการเลือกของสัญญาณ clock system จึงเหมือนกับของเครื่องส่งทุกประการ มีการคุมเฟส และความถี่ด้วยสัญญาณซิงค์

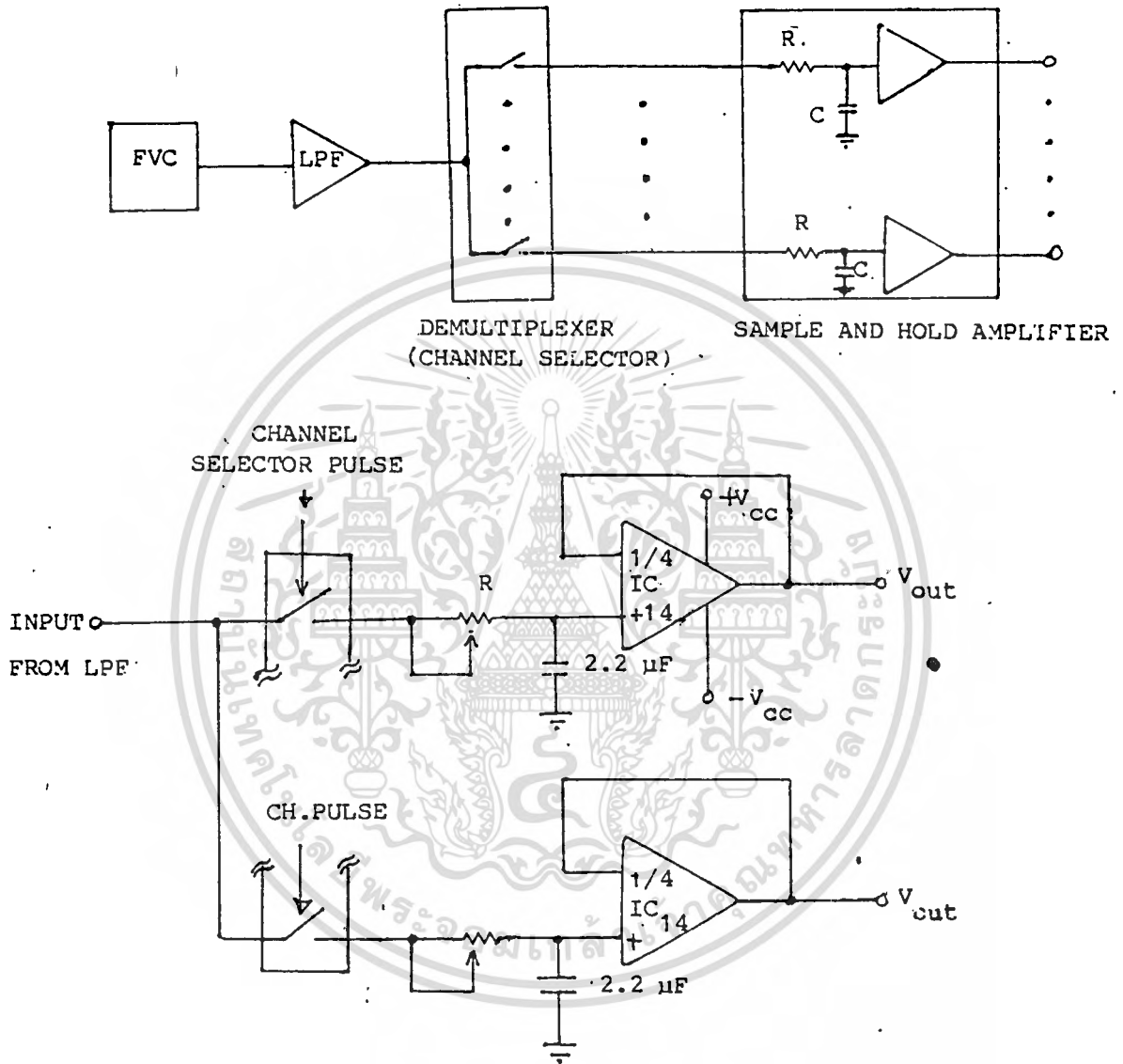


ภาพที่ 4.17 แสดงวงจรมัลติเพล็กซ์

พัลส์เลือกของสัญญาณที่เป็นซิงส์จะถูกแยกออกมาได้ด้วย D - FLIP-FLOP ซึ่งจะนำไปเปรียบเทียบเฟสกับพัลส์ของช่องสัญญาณช่องเดียวกันในเครื่องรับ ผลการเปรียบเทียบเฟสจะทำการกรองความถี่ต่ำผ่านด้วย R-C (passive filter) ให้โวลเตจเอาไปคุมความถี่ออสซิลเลเตอร์ของเครื่องรับใหม่เฟสและความถี่ตรงกันกับเครื่องส่ง นำความถี่ออสซิลเลเตอร์ไปหารตามจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับที่ใช้ส่งในที่นี้ใช้ไอซีประเภท CMOS 4046 ซึ่งเป็น PLL เปรียบเทียบเฟสได้ในตัว และมี VCO ความถี่ที่ให้นำไปหาร 16 ด้วย 40161 หรือ 74C161 เมื่อนับพัลส์ครบ 16 จะให้พัลส์สำหรับการทด (carry) ออกมา 1 พัลส์มีความกว้างเท่ากับ 1 clock cycle นำเข้า shift register 16 ช่อง ให้ 4015 เป็น shift register สามารถตอกันได้ 8 state ในตัวเดียว 2 ตัวได้ 16 state จึงได้พัลส์วนตามลำดับช่องสัญญาณพัลส์ของแต่ละ state จะใช้สำหรับเลือกช่องสัญญาณใดตามลำดับช่อง เพื่อทำการคัมมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลา สัญญาณที่เป็นแหล่งโวลเตจแต่ละช่องจึงได้ออกมาแบบการสุ่มเช่นเดียวกับการส่ง จึงต้องมีการเก็บระดับโวลเตจเอาไว้ ระหว่างช่วงเวลากการสุ่มโวลเตจที่คงที่จนกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงทาง INPUT เข้ามาใหม่ โวลเตจที่ส่งเข้ามาใหม่จะมา charge หรือ discharge คาปาซิเตอร์ที่ใช้ในวงจร ให้ได้โวลเตจเฉลี่ยระหว่างที่ป้อนเข้ามาใหม่กับที่คกครอมสะสมอยู่ในคาปาซิเตอร์ ค่า time constant ของวงจรส่วนนี้จึงเป็นปัญหาสำคัญของการเปลี่ยนแปลง INPUT ของแต่ละช่อง ให้ทันกับสัญญาณที่เป็นแหล่งโวลเตจที่เป็นจริงในเครื่องส่ง

## วงจรแยกช่องสัญญาณและการขยายสัญญาณ

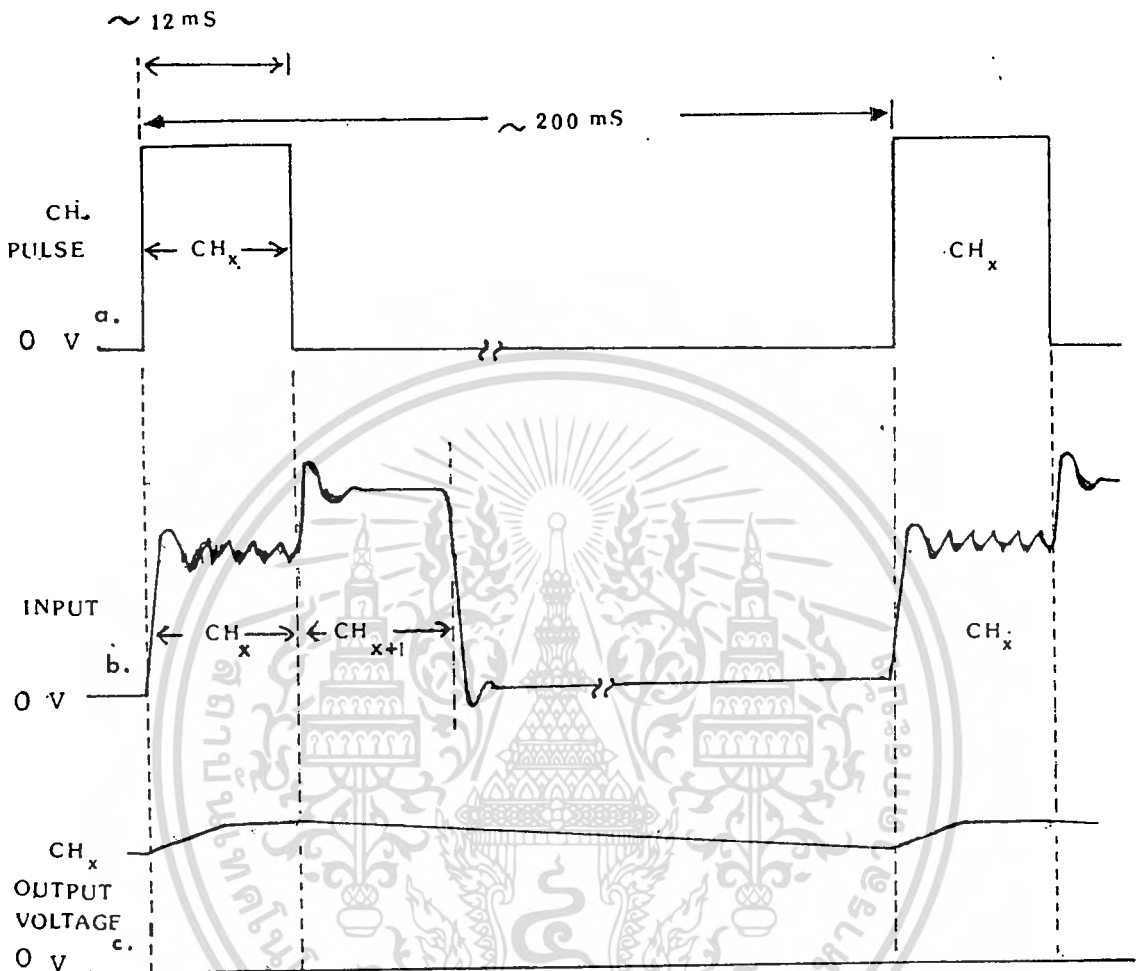
การแยกช่องสัญญาณทำได้โดยพัลส์ประจำช่องสัญญาณที่วนอนุกรมตามลำดับจากช่องต่ำสุดของสุดท้าย  $CH_1, \dots, CH_n$  การเก็บระดับโวลเตจไว้ระหว่างช่วงการสุ่มใช้วงจรขยายแบบ sample and hold



IC<sub>14</sub> LM 348 Quad OP - amp

ภาพที่ 4.18 แสดงบล็อกไดอะแกรมการแยกช่องสัญญาณและวงจรขยายสัญญาณแบบ sample and hold

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

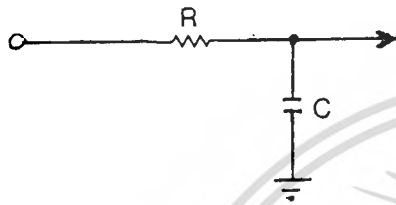


ภาพที่ 4.19 แสดงลักษณะสัญญาณ

๑. พัลส์สำหรับเลือกช่องสัญญาณ
๒. สัญญาณจาก LPF ที่นำเข้าอานาล็อกสวิตช์ กำหนดเลือกช่องสัญญาณ ด้วยพัลส์ประจำช่องสัญญาณ ช่องที่มีโวลต์ต่ำจะมี ripple บ้างเล็กน้อย
๓. สัญญาณที่เป็นโวลต์ที่ได้หลังจากผ่านวงจรขยายสัญญาณแบบ sample and hold ได้สัญญาณเฉพาะช่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณผ่าน LPF ในช่องโวลต์ต่ำจะมี ripple อยู่บ้าง แต่เมื่อผ่านวงจร sample and hold มี R อนุกรมเพื่อให้อิมพีแดนซ์สูง และ C ขนาดใหญ่สำหรับเก็บประจุให้โวลต์จตกคร่อมยังคงอยู่ระหว่างช่วงการสุ่มเลือกของสัญญาณ R-C ต่อกันในลักษณะเป็น integrator หรือ Low pass filter



To noninverting input pin of op-amp  
(voltage follower)

ภาพที่ 4.20 วงจรความถี่ต่ำผ่านแบบ R-C

ค่า time constant ควรจะเหมาะกับความกว้างพัลส์ในที่นี้ ความกว้างพัลส์ 12.5 ms time constant จึงควรมีค่าน้อยกว่า 12.5 ms เพื่อให้คาปาซิเตอร์ได้ถูกประจุเต็มที่ในที่นี้ใช้ R 47k C 2.2  $\mu$ F จะตามการเปลี่ยนแปลงโวลต์ตรงทาง INPUT ได้ไม่เกิน 1 วินาที และใช้ LM 324 quad op-amp ที่ใช้แหล่งจ่ายไฟเฉพาะไฟบวกอย่างเดียวได้ ต่อบน voltage follower มีอัตราขยายเท่ากับหนึ่ง

การทดสอบการทำงานของวงจรถอด

คุณสมบัติที่ต้องการในการทำงานของวงจรถอดคือ คุณสมบัติเชิงเส้น ( linearity ) ของแต่ละช่องสัญญาณ และสิ่งสำคัญสำหรับการทำมัลติเพล็กซ์หลายช่องสัญญาณคือการรบกวนข้ามช่องสัญญาณ จึงแยกการทดสอบการทำงานของวงจรถอดเป็น 2 ลักษณะ

5.1 คุณสมบัติเชิงเส้น (Linearity )

ถ้าจะพิจารณาความเป็นไปได้ในการที่สัญญาณถูกรบกวนจนเสียคุณสมบัติเชิงเส้น อาจเกิดจาก

- คุณสมบัติเชิงเส้นของไอซี ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนโวลเตจเป็นความถี่ VFC LM 331 ตรวจสอบคุณสมบัติตามคู่มือ จากบริษัทผู้ผลิต มีคุณสมบัติเชิงเส้นถึง  $\pm 0.03\%$  และให้คุณสมบัติเชิงเส้นที่ดีเมื่อให้แหล่งจ่ายไฟตั้งแต่ 15 V ลงมา และโวลเตจที่เปลี่ยนเป็นความถี่ 10 V เต็มสเกล 10 kHz การออกแบบวงจรถอดในช่วงที่มีคุณสมบัติเชิงเส้นที่ดีที่สุดตามที่กล่าวข้างต้น ดังนั้นความคลาดเคลื่อนหรือการรบกวนอันเกิดมาจากตัวไอซี เองนั้นน่าจะน้อยมากไม่ต้องคำนึงถึงเมื่อเทียบกับอย่างอื่น

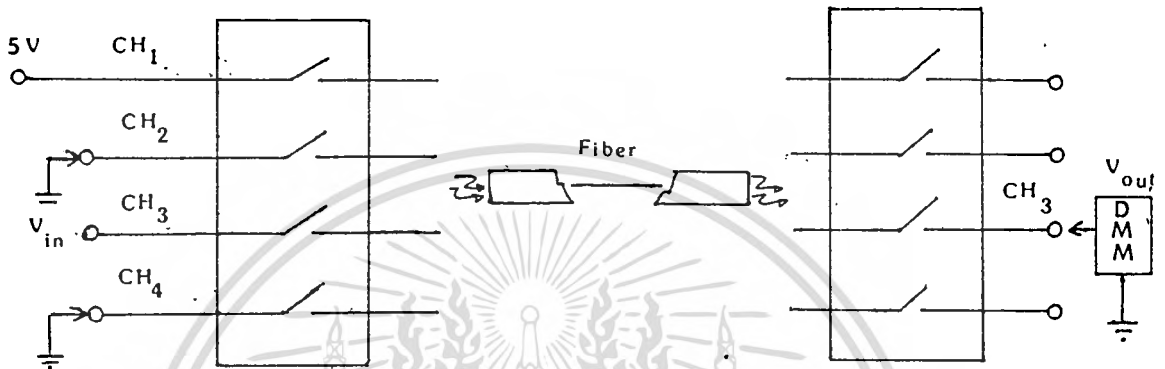
- คุณสมบัติของ R - C ที่ประกอบในวงจรถอด LM 331 คือ  $R_C$   $R_{in}$  และ  $R_S$  พร้อมทั้ง  $C_C$  ใช้อุปกรณ์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิน้อย ความผิดพลาดที่เกิดจาก R - C เมื่อเทียบกับความผิดพลาด กานอื่นจะน้อยมาก

- การสวิตช์เปลี่ยนช่องสัญญาณ ขณะที่ LM 331 ทำงานที่ช่องสัญญาณหนึ่งเช่นมีโวลต์สูง ความถี่สูง เมื่อสวิตช์ลงสู่ช่องสัญญาณโวลต์ต่ำความถี่ต่ำ เนื่องจากคาปาซิเตอร์ภายในตัว ไอซี และ  $C_C$  ยังสะสมประจุหรือยังคงไหลกระแส i ไหลออกสู่ขา 1 ตามที่เคยได้อธิบายในการทำงานของวงจรถอด จึงทำให้เกิดมีพัลส์คาบเกี่ยวระหว่างช่องสัญญาณเกิดขึ้นได้

- เกิดจากการ off set voltage ภายในตัวไอซี พวกออป-แอมป์ ในวงจรถอด ความถี่ต่ำผ่านจะเพิ่มหรือลดโวลเตจของช่องสัญญาณซึ่งนับว่าเกิดขึ้นได้มาก รวมทั้ง ออป-แอมป์และ R-C ในวงจรถอดแบบ sample and hold

พอสรุปได้ว่าการเสียคุณสมบัติเชิงเส้นของสัญญาณที่ผ่านไปตามวงจรถอดต่าง ๆ ทั้งในส่วนเครื่องรับ และเครื่องส่งจึงควร เกิดที่การสวิตช์เปลี่ยนช่อง และ off set voltage ของไอซี ออป-แอมป์

ในการทดสอบคุณสมบัติเชิงเส้นไทดัททดลองทำถึง 6 ช่องสัญญาณ โดยที่ต่อวงจรป้อนสัญญาณ ช่องอินพุตทั้งหมดแล้วป้อนโวลเตจเข้าที่ช่องสัญญาณที่ทดสอบ เริ่มจาก 0V: เพิ่มทีละ 1V จนถึง 10V เต็มสเกล ทุก ๆ ค่า INPUT ของเครื่องส่งวัดค่า OUTPUT ของสัญญาณช่องเดียวกันทางเครื่องรับ ช่องที่ 16 ใช้ในการซิงค์ และจากการทดลองพบว่าการซิงค์จะดีขึ้นเมื่อให้ช่องที่ 1 มี 5V ตลอดทุกการทดลองของทุกช่องสัญญาณ



ภาพที่ 5.1 แสดงแผนผังการทดสอบคุณสมบัติเชิงเส้นของช่องที่ 3

ตามแผนภาพการทดลองในภาพที่ 5.1 ทดสอบช่องที่ 3 ช่องที่ไม่ทำการทดสอบคือ INPUT ลงดิน ใช้ คิจิตอลโวลต์มิเตอร์ชนิดมัลติเมตริก 2 ตำแหน่ง อ่านค่าโวลเตจจากช่องสัญญาณเดียวกันทางเครื่องรับ ทุกค่าของโวลเตจที่ป้อนเข้าทางเครื่องส่ง บันทึกผลการทดลองได้ตามตารางที่ 5.1

จากผลการทดลองที่ INPUT "0" ทุกช่องสัญญาณให้ค่าโวลเตจเป็นลบ ยกเว้นช่องสัญญาณที่ 2 มีค่าบวกเพราะเกิดจากการรบกวนข้ามช่องสัญญาณจากช่องที่ 1 ข้ามมา (การทดสอบการรบกวนข้ามช่องสัญญาณทำในตอนที่ 2) ค่าผิดพลาดสูงสุดตลอดช่วงการเปลี่ยนแปลงของโวลเตจ 0 - 10 v ประมาณ  $\pm 0.08$  โดยพิจารณาจากค่าคลาดเคลื่อนสูงสุด

$$\begin{aligned} \therefore V_{out} &= V_{in} \pm \Delta V_{max} \\ &= V_{in} \pm 0.08 \text{ (Volt)} \end{aligned}$$

ค่าผิดพลาดหากเทียบกับสัญญาณเต็มสเกลเป็นหลักได้  $\pm 0.8\%$  ถ้าคิดว่าความคลาดเคลื่อนเป็นการรบกวนของทั้งระบบเฉพาะช่อง

$$\begin{aligned} \text{SNR}_{\min} &= 20 \log \frac{V_{in}}{2|\Delta v|} \\ &= 20 \log \frac{10}{0.16} \\ &= 36 \text{ dB} \end{aligned}$$

และบอกได้ว่า ความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่เกิดจาก off set voltage ของ ออป-แอมป์ โดยเฉพาะ วงจรขยายที่เป็น sample and hold ซึ่งออป-แอมป์ แต่ละตัวก็แตกต่างกัน จึงปรับวงจรทั้งระบบให้ ความคลาดเคลื่อนเปรียบเทียบกันระหว่างช่องทุกช่องดีที่สุด โดยปรับที่  $R_S$  ของ LM 331 ทั้งเครื่องรับ เครื่องส่ง

ตารางที่ 5.1 แสดงข้อมูลจากการทดสอบคุณสมบัติเชิงเส้นของช่องสัญญาณต่าง ๆ  
6 ช่องสัญญาณ

CH <sub>1</sub>	All CH <sub>1</sub>	CH <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>	CH <sub>13</sub>	CH <sub>14</sub>	CH <sub>15</sub>
INPUT	INPUT	OUTPUT	OUTPUT	OUTPUT	OUTPUT	OUTPUT	OUTPUT
4.92	0.00	0.02	-0.13	-0.03	-0.04	-0.07	-0.07
4.92	0.50	0.52	0.38	0.48	0.48	0.47	0.45
4.92	1.00	1.01	0.90	0.98	0.99	1.01	0.95
4.92	2.00	2.01	1.92	1.96	2.01	1.99	1.97
4.92	3.00	3.00	2.93	2.98	3.02	3.02	2.94
4.92	4.00	3.97	3.92	3.98	4.02	4.02	3.99
4.92	5.00	4.96	4.96	4.96	5.01	5.03	4.98
4.92	6.00	5.94	5.97	5.95	6.02	6.03	6.00
4.92	7.00	6.94	6.99	6.94	7.01	7.02	6.99
4.92	8.00	7.94	8.00	7.95	8.01	8.04	8.04
4.92	9.00	8.93	9.02	8.95	9.01	9.04	9.03
4.92	10.00	9.93	10.04	9.95	9.99	10.05	10.06

ALL INPUT, OUTPUT IN VOLT

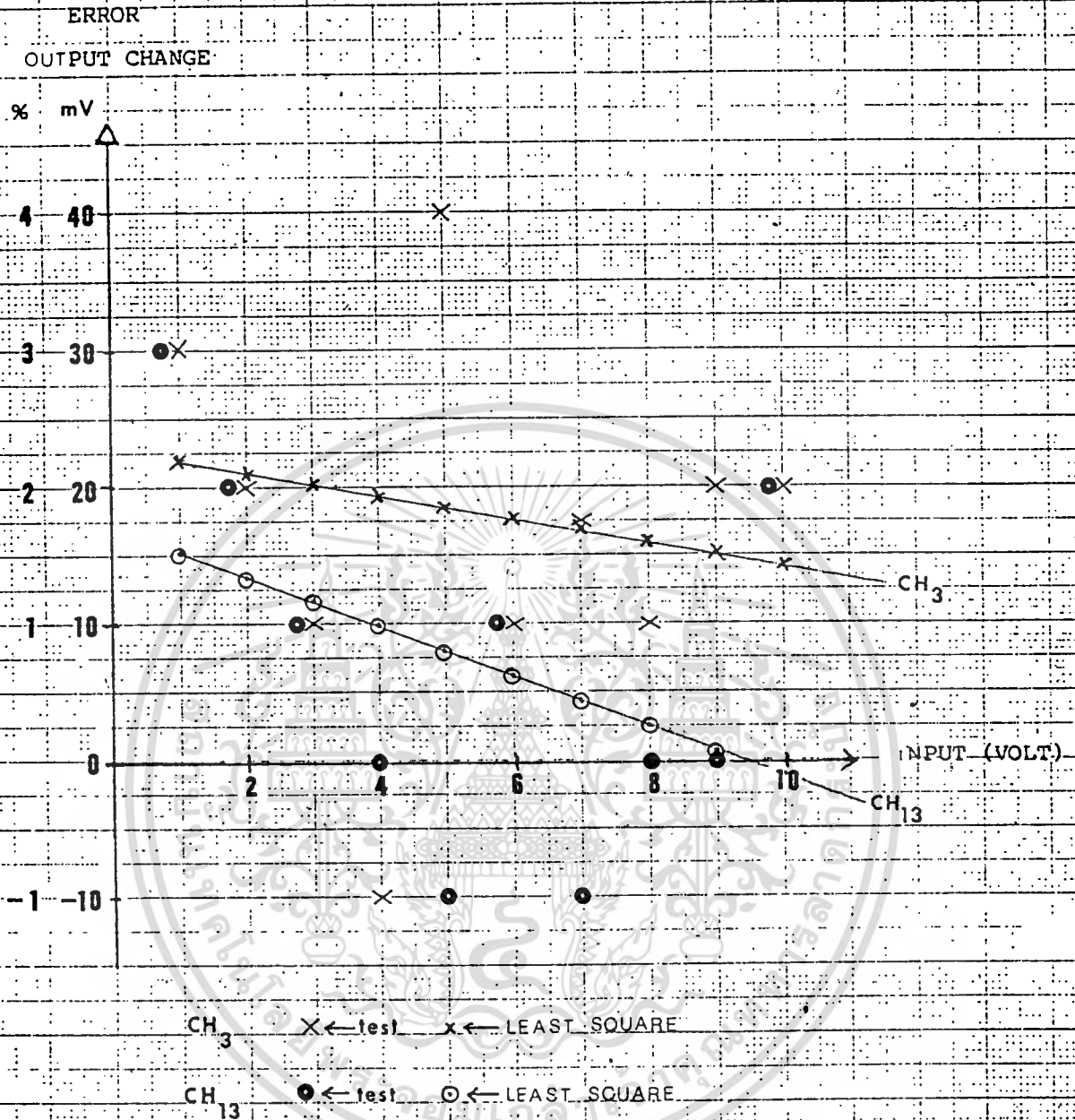
ตารางที่ 5.2 แสดงค่าผิดพลาดทาง OUTPUT จากการเปลี่ยนแปลงของ INPUT  
เพิ่มขึ้น 1V

INPUT. (volt)	INPUT CHANGE (volt)	ERROR OUTPUT TO EVERY 1 VOLT INPUT CHANGE					
		CH <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>	CH <sub>13</sub>	CH <sub>14</sub>	CH <sub>15</sub>
0.00	1.00	-0.01	0.03	0.01	0.03	0.08	0.02
1.00	1.00	0.00	0.02	-0.02	0.02	-0.02	0.02
2.00	1.00	-0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	-0.06
3.00	1.00	-0.03	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.05
4.00	1.00	-0.01	0.04	-0.02	-0.01	0.01	-0.01
5.00	1.00	-0.01	0.01	-0.01	0.01	0.00	0.02
6.00	1.00	0.00	0.02	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
7.00	1.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.05
8.00	1.00	-0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	-0.01
9.00	1.00	0.00	0.02	0.00	-0.02	0.01	0.03
10.00	1.00	0.00	0.02	0.00	-0.02	0.01	0.03

ALL INPUT OUTPUT IN VOLT

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าผิดพลาดทุก ๆ INPUT เปลี่ยนค่าไปที่ละ 1V จาก 0-10V  
เลือกเฉพาะบางช่อง คือ ช่องที่ 3 กับช่องที่ 13

INPUT (Volt)	INPUT CHANGE (Volt)	ERROR TO INPUT VOLTAGE CHANGE			
		CH <sub>3</sub>		CH <sub>13</sub>	
		Volt	%	Volt	%
0.00	1.00	0.03	3	0.03	3
1.00	1.00	0.02	2	0.02	2
2.00	1.00	0.01	1	0.01	1
3.00	1.00	-0.01	-1	0.00	0
4.00	1.00	0.04	4	-0.01	-1
5.00	1.00	0.01	1	0.01	1
6.00	1.00	0.02	2	-0.01	-1
7.00	1.00	0.01	1	0.00	0
8.00	1.00	0.02	2	0.00	0
9.00	1.00	0.02	2	-0.02	2
10.00					



ภาพที่ 5.2 กราฟแสดงการทำ least square ของคุณสมบัติเชิงเส้นของสัญญาณ  
 ช่องที่ 3 และที่ 13 ให้ความละเอียดที่สุด 0.1 % และค่าสูงสุด 2 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติเชิงเส้นของทั้งระบบเครื่องส่งและเครื่องรับเกิดแบบสุ่ม ไม่สามารถแปลความหมายให้เห็นชัดได้โดยตรง เพราะค่าความคลาดเคลื่อนเป็นทศนิยมตำแหน่งที่ 2 ของโวลต์ที่วัดได้ ถ้าหากนำไปเทียบกับสัญญาณ INPUT ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่ามากจะไม่สามารถมองเห็นได้ แต่เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาทำ least square เพื่อหาค่าเฉลี่ย พอมองเห็นได้ว่า ค่าคุณสมบัติเชิงเส้นดีขึ้นเมื่อโวลต์ทาง INPUT สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก off set voltage จะมีผลน้อยลง เมื่อเทียบกับขนาดสัญญาณที่ใหญ่ขึ้น ค่าความชันของกราฟจะบอกค่าเฉลี่ยของการเสียคุณสมบัติเชิงเส้น เป็นความคลาดเคลื่อนของ OUTPUT เมื่อ INPUT เปลี่ยนแปลงไป 1 โวลต์ ตลอดการเปลี่ยนแปลงทาง INPUT 0-10V เมื่อเลือกสุ่มมาสองช่องสัญญาณ คือ ช่องสัญญาณที่ 3 กับที่ 13 สำหรับช่องสัญญาณที่ 3 ขาดคุณสมบัติเชิงเส้นโดยเฉลี่ยประมาณ 0.1 % ต่อการเปลี่ยนแปลง INPUT 1 โวลต์ และสูงสุด 2 % สำหรับช่องที่ 13 เสียคุณสมบัติเชิงเส้นโดยเฉลี่ยประมาณ 0.2 % ต่อการเปลี่ยนแปลง INPUT 1 โวลต์ และสูงสุด 1.5 % ถ้าหากคิดว่าการเสียคุณสมบัติเชิงเส้นเกิดจากการรบกวนตลอดระบบภายในช่องสัญญาณ 0.2 % ต่อการเปลี่ยนแปลง INPUT 1 โวลต์ จะให้ค่า SNR เฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 54 dB และค่าต่ำสุด 2 % ต่อการเปลี่ยนแปลง INPUT 1 โวลต์ มี SNR ต่ำสุดประมาณ 34 dB

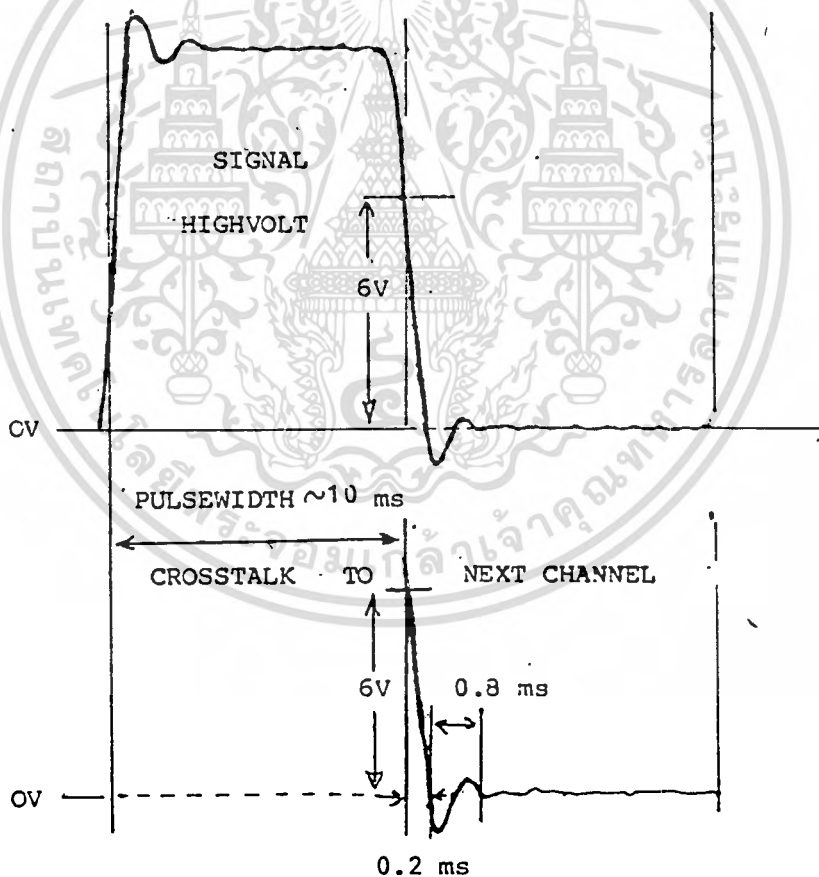
### 5.3 การรบกวนข้ามช่องสัญญาณ (Cross - talk )

การรบกวนข้ามช่องสัญญาณเกิดจากวงจรรองความถี่ต่ำผ่านก่อนจะแยกช่องสัญญาณ และการ delay ของพัลส์สำหรับเลือกช่องสัญญาณ พัลส์สำหรับเลือกช่องสัญญาณได้จากการหาความถี่ออสซิลเลเตอร์ จาก PLL4046 นำไปเลื่อนข้อมูลจำนวนครั้งเท่ากับจำนวนของสัญญาณ นอกจากนั้นการแยกซิงค์พัลส์นำสัญญาณจากจุดที่ห่างกันคือ จุดหนึ่งจาก detector เข้าขา INPUT - D ของ D - FLIP FLOP และจากจุดหลังวงจร buffer เฟสของซิงค์พัลส์จึงออกมาก่อน LPF ค่า delay time จึงพิจารณารวม ๆ ได้สองค่าค่าหนึ่งคือของวงจรรองความถี่ต่ำ LPF กำหนดให้เป็น  $t_F$  และของพัลส์เลือกช่องสัญญาณกำหนดเป็น  $t_S$

- ถ้า  $t_F > t_S$  การรบกวนเกิดจากช่องสัญญาณช่องต่ำ ข้ามไปรบกวนช่องสัญญาณที่สูงกว่าถัดไป
- $t_S > t_F$  การรบกวนเกิดจากช่องสัญญาณข้างหลัง (ช่องสูงกว่า) ข้ามไปรบกวนช่องสัญญาณข้างหน้า (ช่องต่ำกว่าถัดไป)

ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านถ้า  $t_F$  มีค่าน้อยคือแบนด์วิดท์มีค่ากว้างมาก การกรองสัญญาณที่เกิดจากโวลเตจต่ำ ๆ จะมี ripple มาก ในที่นี้จึงใช้การกรองความถี่ต่ำผ่าน  $t_F > t_S$  โดยเพิ่มค่าคาปาซิเตอร์ในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านให้สูงขึ้น

การสวิตช์เพื่อ เลือกลงสัญญาณช่องสูงจึงक्रमเอาระดับโวลเตจของสัญญาณช่องต่ำกว่าที่อยู่ ถัดกันเท่ากับช่วงเวลาเฟสออกจากการกรองความถี่ต่ำผ่านกับเฟสของพัลส์เลือกช่องสัญญาณต่างกัน สัญญาณช่องต่ำมีสัญญาณโวลต่ำกว่า 5V การรบกวนข้ามช่องสัญญาณถัดไปจะคงข้างน้อย แต่ที่โวลตสูงขึ้นไปการรบกวนมาในการทดลองใช้ 16 ช่องสัญญาณ ความกว้างของพัลส์เลือกช่องสัญญาณประมาณ 10 ms สัญญาณช่องต่ำกว่า รบกวนข้ามช่องสัญญาณสูงถัดไปประมาณ 0.2 ms สัญญาณต้น fall time ระดับใกล้ ศูนย์มีการ damping ได้ค่าลบสูงกว่าค่าบวกเล็กน้อย ถ้าโวลเตจต่ำ ๆ จึงเกิดการชดเชยกันได้เล็กน้อย



ภาพที่ 5.3 แสดงการรบกวนข้ามช่องสัญญาณ เนื่องจากเฟสของสัญญาณตามหลังเฟสของพัลส์ สำหรับเลือกช่องสัญญาณ

### การทดสอบการรบกวนข้ามของสัญญาณ

การทดสอบแบ่งกลุ่มช่องสัญญาณที่ใกล้เคียงกัน เป็นสองกลุ่มคือ  $CH_2, CH_3$  และ  $CH_4$  กับ  $CH_{13}, CH_{14}$  และ  $CH_{15}$  และแต่ละกลุ่มทำการทดลองสองแบบเพื่อต้องการทราบว่า การรบกวนจะข้ามช่องสัญญาณไปทิศทางใดของค่าหรือช่องสูงกว่า หรือข้ามทั้งสองช่องที่อยู่ชิดกัน โดยแบ่งการทดลองสองลักษณะคือ ตารางที่ 5.4 วิธีการทดสอบการรบกวนข้ามของสัญญาณ

การทดสอบ	กลุ่มที่ 1			กลุ่มที่ 2			หมายเหตุ
	$CH_2$	$CH_3$	$CH_4$	$CH_{13}$	$CH_{14}$	$CH_{15}$	
แบบที่ 1 INPUT	0	เปลี่ยน เพิ่มขึ้น ครึ่งละ 1V จาก 0-10 V	0	0	เปลี่ยน เพิ่มขึ้น ครึ่งละ 1V จาก 0 - 10 V	0	วัด OUTPUT ทุกช่องสัญญาณ ทุกครั้งที่เปลี่ยน INPUT ของช่องที่ ทำการทดสอบ
แบบที่ 2 INPUT	$\sim 5V$	เปลี่ยน เพิ่มขึ้น ครึ่งละ 1V จาก 0-10V	0	$\sim 5V$	เปลี่ยน เพิ่มขึ้น ครึ่งละ 1V จาก 0-10V	0	

ตารางที่ 5.5 แสดงข้อมูลจากการทดสอบการรบกวนข้ามช่องสัญญาณ ของ  
ช่องสัญญาณกลุ่มที่ 1 แบบที่ 1

CROSSTALK CH<sub>3</sub> TO CH<sub>2</sub> AND CH<sub>4</sub>

ALL INPUT, OUTPUT IN VOLT

CH <sub>1</sub>	CH <sub>2</sub>		CH <sub>3</sub>		CH <sub>4</sub>	
INPUT	INPUT	OUTPUT	INPUT	OUTPUT	INPUT	OUTPUT
4.92	0	0.00	0.00	-0.13	0	-0.04
4.92	0	0.00	0.50	0.38	0	-0.03
4.92	0	0.00	1.00	0.90	0	-0.02
4.92	0	0.00	2.00	1.92	0	-0.02
4.92	0	0.01	3.00	2.93	0	-0.01
4.92	0	0.03	4.00	3.92	0	0.02
4.92	0	0.01	5.00	4.96	0	0.01
4.92	0	0.01	6.00	5.97	0	0.02
4.92	0	0.02	7.00	6.99	0	0.01
4.92	0	0.00	8.00	8.00	0	0.04
4.92	0	0.00	9.00	9.02	0	0.04
4.92	0	0.00	10.00	10.04	0	0.03

ตารางที่ 5.6 แสดงข้อมูลการทดสอบการรบกวนข้ามช่องสัญญาณ กลุ่มที่ 1 แบบที่ 2.

CROSSTALK CH<sub>3</sub> TO CH<sub>2</sub> AND CH<sub>4</sub>

ALL INPUT , OUTPUT , IN VOLT

CH <sub>1</sub>	CH <sub>2</sub>		CH <sub>3</sub>		CH <sub>4</sub>	
INPUT	INPUT	OUTPUT	INPUT	OUTPUT	INPUT	OUTPUT
4.92	4.99	5.02	0.00	-0.11	0	-0.03
4.92	4.99	5.02	1.00	0.92	0	-0.03
4.92	4.99	5.02	2.00	1.93	0	-0.02
4.92	4.99	5.02	3.00	2.97	0	0.01
4.92	4.99	5.02	4.00	3.97	0	0.01
4.92	4.99	5.02	5.00	4.98	0	0.01
4.92	4.99	5.02	6.00	5.98	0	0.01
4.92	4.99	5.02	7.00	6.98	0	0.03
4.92	4.99	5.02	8.00	8.01	0	0.03
4.92	4.99	5.02	9.00	9.04	0	0.03
4.92	4.99	5.02	10.00	10.07	0	0.07

ในกลุ่มช่องสัญญาณที่ 1 ของการทดลอง การรบกวนข้ามช่องสัญญาณทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของ OUTPUT ไปในทางลบสูงสุด  $-0.04$  V และสูงสุดทางบวก  $+0.07$  ไม่มีการรบกวนจากช่องสัญญาณสูงข้ามไปยังช่องสัญญาณต่ำ

ตารางที่ 5.7 แสดงข้อมูลการทดสอบการรบกวนข้ามช่องสัญญาณ กลุ่มที่ 2 แบบที่ 1

CROSSTALK CH<sub>14</sub> To CH<sub>13</sub> AND CH<sub>15</sub>

CH <sub>1</sub>	CH <sub>13</sub>		CH <sub>14</sub>		CH <sub>15</sub>	
INPUT	INPUT	OUTPUT	INPUT	OUTPUT	INPUT	OUTPUT
4.92	0	-0.04	0.00	-0.07	0	-0.07
4.92	0	-0.04	0.05	0.47	0	-0.07
4.92	0	-0.04	1.00	1.01	0	-0.07
4.92	0	-0.03	2.00	1.99	0	-0.07
4.92	0	-0.03	3.00	3.02	0	-0.07
4.92	0	-0.03	4.00	4.02	0	-0.05
4.92	0	-0.03	5.00	5.03	0	-0.04
4.92	0	-0.03	6.00	6.03	0	-0.03
4.92	0	-0.03	7.00	7.02	0	-0.02
4.92	0	-0.03	8.00	8.04	0	-0.01
4.92	0	-0.03	9.00	9.04	0	0.00
4.92	0	-0.03	10.00	10.01	0	0.03

ALL INPUT , OUTPUT , IN VOLT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 แสดงข้อมูลจากการทดสอบการรบกวนข้ามของสัญญาณ กลุ่มที่ 2 แบบที่ 2

CROSSTALK CH<sub>14</sub> TO CH<sub>13</sub> AND CH<sub>15</sub>

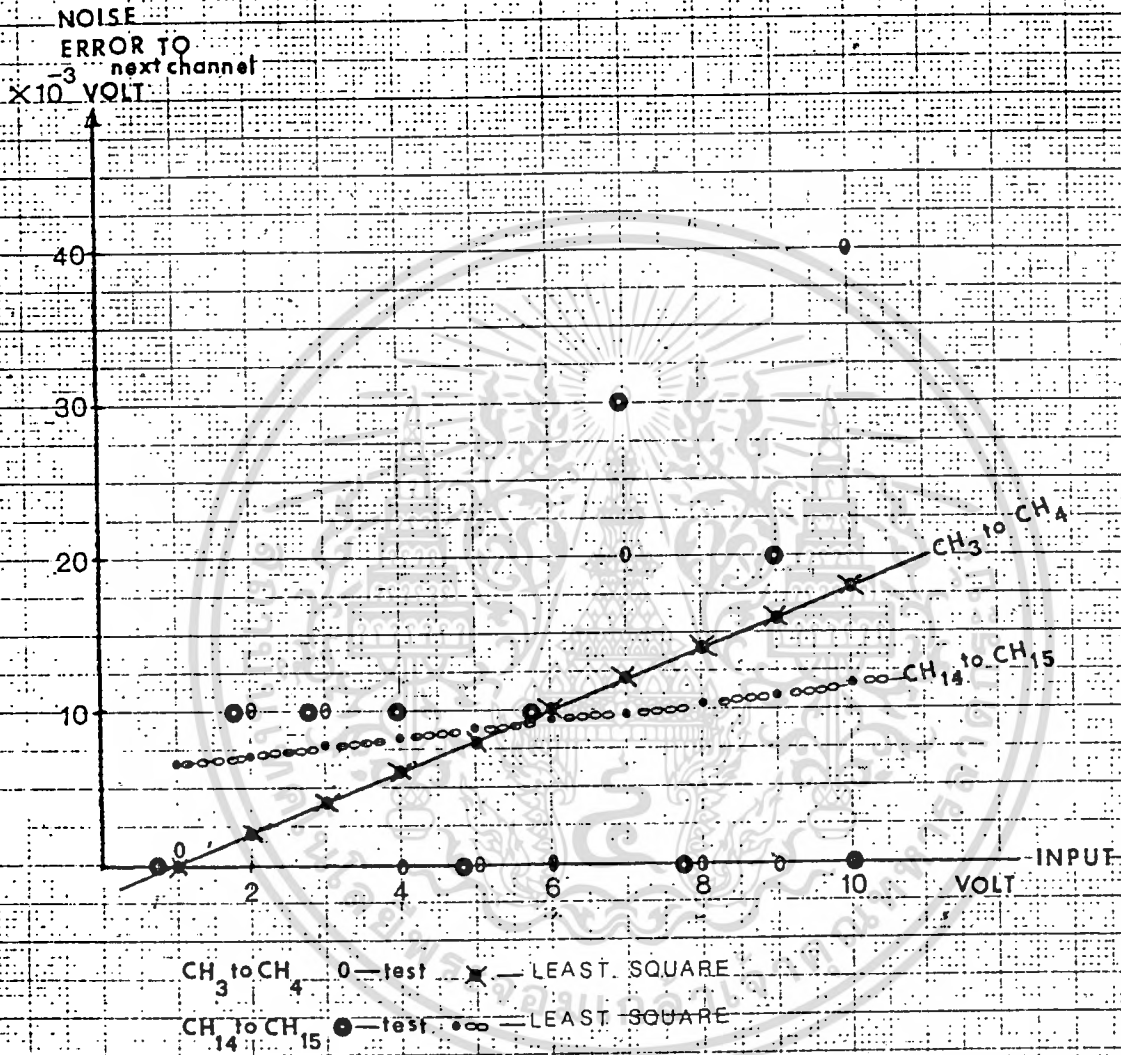
ALL INPUT , OUTPUT IN VOLT -

CH <sub>1</sub>	CH <sub>13</sub>		CH <sub>14</sub>		CH <sub>15</sub>	
INPUT	INPUT	OUTPUT	INPUT	OUTPUT	INPUT	OUTPUT
4.92	4.99	5.07	0.00	-0.04	0	-0.08
4.92	4.99	5.06	0.50	0.47	0	-0.08
4.92	4.99	5.07	1.00	0.98	0	-0.08
4.92	4.99	5.07	2.00	2.00	0	-0.07
4.92	4.99	5.07	3.00	3.01	0	-0.06
4.92	4.99	5.07	4.00	4.01	0	-0.05
4.92	4.99	5.07	5.00	5.02	0	-0.05
4.92	4.99	5.07	6.00	6.04	0	-0.04
4.92	4.99	5.07	7.00	7.04	0	-0.01
4.92	4.99	5.07	8.00	8.05	0	-0.01
4.92	4.99	5.08	9.00	9.07	0	0.01
4.92	4.99	5.08	10.00	10.07	0	0.01

ไม่มีการรบกวนข้ามของสัญญาณจากช่องสูงกว่าไปยังช่องต่ำกว่าที่ใกล้กัน

ตารางที่ 5.9 แสดงการรบกวนข้ามช่องสัญญาณโดยเทียบจากการเปลี่ยนแปลงทางด้าน INPUT กับความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นทางด้าน OUTPUT

INPUT (Volt)	INPUT CHANGE (Volt)	CROSSTALK INPUT CHANGE ERROR TO OUTPUT NOISE CHANGE			
		CH <sub>3</sub> TO CH <sub>4</sub>		CH <sub>14</sub> TO CH <sub>15</sub>	
		Volt	dB	Volt	dB
0.00	1.00	0.00	-	0.00	-
1.00	1.00	0.01	40	0.01	40
2.00	1.00	0.01	40	0.01	40
3.00	1.00	0.00	-	0.01	40
4.00	1.00	0.00	-	0.00	-
5.00	1.00	0.00	-	0.01	40
6.00	1.00	0.02	34	0.03	31
7.00	1.00	0.00	-	0.00	-
8.00	1.00	0.00	-	0.02	34
9.00	1.00	0.04	28	0.00	-
10.00					



ภาพที่ 5.3

กราฟแสดงการรบกวนข้ามช่องสัญญาณจากช่องต่ำไปยังช่องสูงที่สุดที่วัดได้ ความชันของกราฟ

บอกอัตราส่วนระหว่างการรบกวนกับสัญญาณโดยเฉลี่ย

ช่องที่ 3	→	ช่องที่ 4	ประมาณ	55 dB
ช่องที่ 14	→	ช่องที่ 15	ประมาณ	66 dB



สรุปผลการทดลอง

6.1 คุณภาพการใช้งานของระบบ

การส่งสัญญาณผ่านใยนำแสงต้องจัดให้พลังงานแสงเข้าสู่ใยนำแสง ได้เพียงพอกับการลดทอน และการสูญเสียพลังงานไปภายในระบบ พลังงานที่สูญเสียไปในระบบทั้งหมด ( system power margin)  $P_T$  ต้องสัมพันธ์กับพลังงานที่เข้าสู่ใยนำแสง  $P_S$  และความไวของเครื่องรับ  $P_R$

$$P_T = P_S - P_R$$

$$= 2l_c + \alpha_f L + \text{system margin}$$

$l_c$  เป็นการลดทอนสัญญาณ เนื่องจากการเชื่อมต่อในเครื่องส่งและเครื่องรับ การใช้หัวต่อแบบเกลียว และแหล่งกำเนิดแสงกับตัวรับแสง อัดคัตอยู่ภายในตัวถังมีเกลียวให้เชื่อมต่อให้เข้ากันได้กับใยนำแสงจะมีการลดทอนประมาณ 1 - 1.5 dB ต่อครั้ง

$\alpha_f$  ค่าการลดทอนของใยนำแสง และการสูญเสียเมื่อมีการแยก ( splice ) ออกเป็นหลายทาง (มีการลดทอน 0.1-0.2 dB ต่อครั้งสำหรับใยนำแสงหลายโหมด และ 0.2 - 0.5 dB เมื่อเป็นโหมดเดียว)

system margin เป็นการเผื่อไว้ในระบบเพราะการสูญเสียพลังงานในระบบบางอย่างไม่สามารถกำหนดสาเหตุที่แน่นอนได้ ประมาณ 6 dB

ยกตัวอย่างการประมาณค่าสำหรับพลังงานการส่ง ในระบบที่ทดลอง ให้พลังงานแสงเข้าสู่ใยนำแสงประมาณ 0.4 เทาของค่า normalize เมื่อไบอัส LED ด้วยกระแส 30 mA ให้พลังงานแสงเข้าสู่ใยนำแสงประมาณ 18  $\mu W$  ถ้าเทียบกับกำลัง 1 mW พลังงานแสงที่จะเข้าไปในระบบได้จึง

$$P_S = 10 \log \frac{18 \mu W}{1 mW} = -17 \text{ dBm}$$

ความไวของ p-i-n ไดโอดในเครื่องรับประมาณ 30 nW

$$P_R = 10 \log \frac{30 \text{ nW}}{1 \text{ mW}} = -45 \text{ dBm}$$

(โดยทั่วไป p-i-n Photo diode จะมีความไวประมาณ -42 dBm) [1]

$$\begin{aligned} P_T &= -17 \text{ dBm} - (-45 \text{ dBm}) \\ &= 28 \text{ dB} \end{aligned}$$

ดังนั้นการลดทอนสัญญาณของใยนำแสง การสูญเสียเนื่องจากหัวต่อ และการสูญเสียพลังงานในการแยกเป็นหลายทาง รวมทั้งพลังงานที่ต้องเพื่อไว้ (System margin) จะเท่ากับ 28 dB

$$\begin{aligned} P_T &= 28 \text{ dB} = 2L_c + \alpha_f L + 6 \text{ dB} \\ &= 2 \times (1.5 \text{ dB}) + \alpha_f L + 6 \text{ dB} \end{aligned}$$

การสูญเสียภายในใยนำแสง  $\alpha_f L = 17 \text{ dB}$

ใยนำแสงราคาถูกสำหรับระยะสั้นมีการลดทอนประมาณ 1.3 dB/m ในระบบนี้จึงส่งได้ไกล

$$\begin{aligned} L &= 17 \text{ dB} / 1.3 \text{ dB/m} \\ &= 13 \text{ m} \end{aligned}$$

ในการทดลองใช้ใยนำแสงประมาณ 5 เมตร จึงไม่มีปัญหาด้านเกี่ยวกับความไวของตัวรับแสงทางด้านพลังงานแสง (ในระยะสั้น system margin อาจไม่ตองนำมาคิดก็ได้)

ในระบบนอกจากพลังงานการส่งการรับเพียงพอตั้งไกลแล้ว การตอบสนองต่อความถี่เป็นสิ่งสำคัญเช่นกัน ความถี่ในการมอดูเลต 10 kHz เต็มสเกล ค่า rise time ของ LED ตัวส่ง 300 n sec ไบอัส 50 mA ที่อิมพีแดนซ์ 50  $\Omega$  มี fall time 200 n sec สามารถมอดูเลตเป็นพัลส์ที่ความถี่ 1 MHz ได้ ส่วนเครื่องรับใช้ p-i-n ทดสอบ ให้สัญญาณเป็นพัลส์สามารถนำไปแยกซิงค์หรือ Synchronize ได้ถึงความถี่ 30 kHz ทั้งระบบจึงไม่มีปัญหาด้านความถี่ในการมอดูเลต ความถี่ในการเลือกช่องสัญญาณแต่ละช่องเท่ากับความถี่การสุ่มทาง input ประมาณ 5 Hz ถ้าหากเกิดความคลาดเคลื่อนทางด้านซิงค์พัลส์ และจะกลับคืนเข้าสู่ภาวะ Lock ได้ภายในไม่เกิน 1 วินาที ความคลาดเคลื่อนของโวลเตจทางด้าน output ของเครื่องรับจะกลับสู่ปกติ ภายในไม่เกิน 2 วินาที แต่โดยปกติถ้าหากอยู่ในภาวะ lock แล้ว มักทำงานได้ตามปกติ ยกเว้นตอนเปิดปิดเครื่องให้เริ่มทำงานใหม่เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบใยนำแสง มีความดีเด่นหลายอย่าง แต่ประการหนึ่งคือ ต้องการ SNR ต่ำ ในการส่งระยะสั้นใช้ p-i-n ต้องการพลังงานในการรับ 15-30 mw แบนด์วิดธ์ต่ำ SNR 10 - 15 dB ก็เป็นการเพียงพอ [ 3 ] ระบบที่ทำการทดลองได้ SNR ไม่ต่ำกว่า 30 dB จึงสามารถนำมาใช้งานได้ดี และสามารถส่งได้ไกลถ้าต้องการส่งให้ไกลขึ้นต้องมี SNR สูงขึ้น โดยแก้ไขวงจรบางวงจรให้มีความหนาแน่น และใช้ใยนำแสงที่มีการลดทอนต่ำลง



## 6.2 ข้อเสนอแนะ

การทดลองส่งสัญญาณผ่านใยนำแสงทำมัลติเพล็กซ์แบบ TDM และมอดูเลตสัญญาณแบบ FM โดย VFC (ใช้ LM 331) ให้อัตราส่วนสัญญาณต่อการรบกวน SNR ที่มากกว่า 30 dB ความต้องการสำหรับการส่งสัญญาณด้วยใยนำแสง SNR 20-30 dB แต่ในระบบยังมีปัญหาในวงจร Sample and hold ดัน off set พอมมีแนวทางแก้ไขให้คุณภาพของระบบดีขึ้น หรือใช้งานได้อีกมากขึ้นคือ

1. ดันวงจร Sample and hold เลือกไอซี ที่มีคุณภาพดี และออกแบบวงจรให้ปรับ off set voltage ได้ และวงจรควรจะมี gain เล็กน้อย เพื่อปรับชดเชยกันระหว่างช่องสัญญาณต่าง ๆ ให้ดีที่สุด แต่ต้องเพิ่มราคาของวงจรขึ้นไปอีก
2. วงจรที่ออกแบบใช้งานกับความถี่ต่ำประมาณ 1Hz เมื่อขยายความถี่ออกไปมีปัญหาทางด้านวงจร PLL จะตามเฟสของสัญญาณซึ่งไม่ได้คือออกจากภาวะ lock ถ้าหากขยายความถี่ของ VFC ออกให้สูงขึ้น LM 331 สามารถทำความถี่ได้ 100 kHz เต็มสเกล 10 V วงจร PLL จะทำงานที่ความถี่สูงขึ้น lock range กว้างขึ้น อาจนำไปใช้กับสัญญาณที่ความถี่สูงซึ่งอาจใช้กับความถี่เสียง แต่จำนวนช่องสัญญาณอาจจะน้อยกว่า 16 ช่อง ราคาวงจรคงจะต้องแพงตามขึ้นไปโดยต้องใช้ sample and hold ที่มีคุณภาพดีทั้งด้านรับและด้านส่ง
3. วงจรจะมีคุณภาพดีมากถ้าใช้กับภาวะ "ON" กับ "OFF" ในแต่ละช่องสัญญาณ ซึ่งสามารถแทนบิตข้อมูลได้ ถ้าขยายความถี่ออกไปอาจใช้ส่งข้อมูลหรือตัวอักษรได้อย่างดี SNR มากกว่า 30 dB การรบกวนต่ำกว่า 0.8 V ไม่สามารถทำให้เกิดคาบผิดพลาดเป็น "high" ได้ และการออกแบบการป้องกันการรบกวนง่ายขึ้น.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร.แดเนียล บริน ที่เป็นทั้งผู้สอนให้ความรู้ด้าน Opto electronics และโยนนำแสง ทั้งยังเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยแนะนำและให้ความรู้ ช่วยให้การปฏิบัติทดลอง จนเขียนเป็นวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ และต้องขอขอบคุณอาจารย์ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตเจ้าคุณทหาร ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและให้ความรู้ทางด้านการสื่อสารด้วยโยนนำแสง ซึ่งมีส่วนช่วยให้เกิดกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ ท้ายสุดนี้ขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนช่วยในการทำฉบับ โดยเฉพาะคุณวรุณช พันมา ที่ได้ช่วยเหลือในการพิมพ์จนแล้วเสร็จ

นายณรงค์ ใจรักษ์



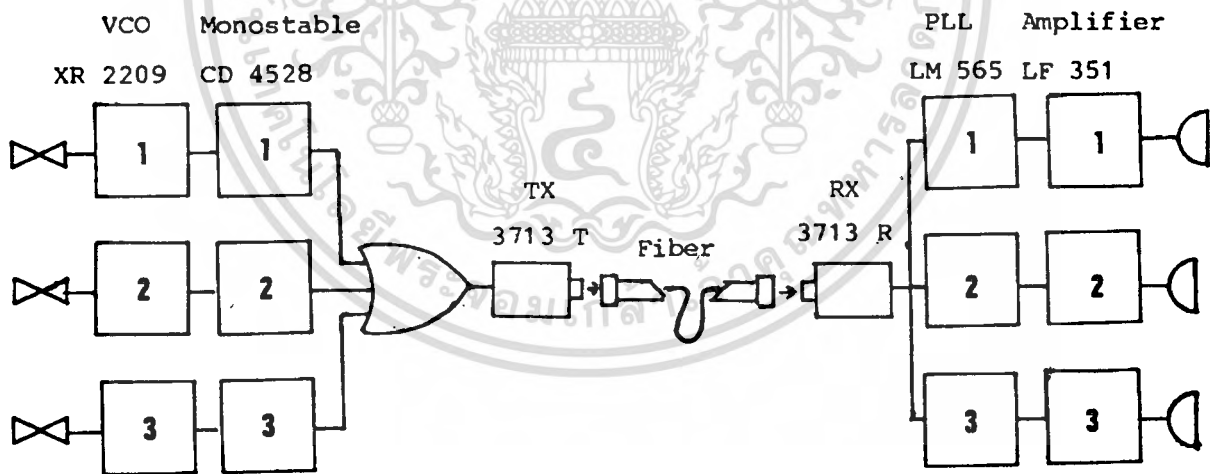
## เอกสารอ้างอิง

1. Keiser, Gerd. "Optical Fiber Communications", PP.1-263,Mc.Graw-Hill, Inc., 1983.
2. Couch, Leon W. "Digital and Analog Communication Systems.",PP.1-66, Mc.millan Publishing Co.,Inc.,1983.
3. Gowar,John. "Optical Communication Systems",PP.3-113,198-292,353-530, Prentice-Hall International, 1984
4. Regional Symposium on Optoelectronics Optical Fiber Communication and Solar Cell, PP.2.1-2.41,4.13-4.25,5.44-5.50,Facultry of Engineering Chulalongkorn University,November 1984,Bangkok Thailand.
5. Proceedings of the IEEE, 68(10),PP.1175-83,1240-52,October 1980.
6. Owen, Frank F.E. "PCM and Digital Transmission Systems.",PP.3-13,117-41, 267-75,Mc.Graw-Hill Inc., 1982
7. Linear Applications Handbook, National Semiconductor,PP.C.1-D.7,1980.
8. Hnatek,Eugene.R.,"Application of Linear Integrated Circuits.",PP.53-237, John Wiley & Sons, Inc., 1975.
9. ธีระชัย อรุจจนาพันธ์,สุพจน์ แซ่เอี้ย และ แดเนี่ยล บริน " Multiplex optic Link ", หน้า 26-53, ปรินต์งานนิพนธ์ ปีการศึกษา 2527, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตเจ้าคุณทหาร (ลาดกระบัง).

ภาคผนวกที่ 1

การเปรียบเทียบ SNR กับการทดลองอื่น

มีการทดลองสำหรับทำเป็นปริิญาานิพนธ์ของนักศึกษา ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรม-ศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าวิทยาเขตเจ้าคุณทหาร อีก 2 วิธี ซึ่งทำการมอดูเลตออกความถี่เป็นพัลส์ มีการทำมัลติเพล็กซ์ที่แตกต่างกัน จึงรวมเป็น 3 แบบ คือ แบบที่ 1 [ 4 ] ส่งสัญญาณเสียง 3 ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณทำการมอดูเลตแบบ FM โดยนำสัญญาณเสียงเข้า VCO การเปลี่ยนแปลงความถี่รอบความถี่จุกกลางในการรับสัญญาณจึงต้องแยกลักษณะความถี่บายเบนไปจากความถี่กลางกลับคืนออกมา แต่ละช่องสัญญาณมีความถี่กลางแตกต่างกัน แต่ละช่องสัญญาณนำความถี่ที่มอดูเลตแล้วเข้า monostable เพื่อเปลี่ยนความกว้างพัลส์ให้แตกต่างกัน จึงเป็นการมัลติเพล็กซ์แบบ FDM และพัลส์แล้ว นำช่องสัญญาณทั้งหมดรวมเข้าด้วยกันด้วย OR-gate แล้วมอดูเลตออกแสง ไม่ต้องใช้ช่องสัญญาณในการซิงค์



	CH <sub>1</sub>	CH <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub>
ความถี่กลาง kHz	64.4	83.5	105.4
ความกว้างพัลส์ (μ sec)	5	2	3

ภาพที่ ผ.1.1 แสดงบล็อกโคะเทรรมของเครื่องรับเครื่องส่งอุปกรณ์และวงจรที่ใช้

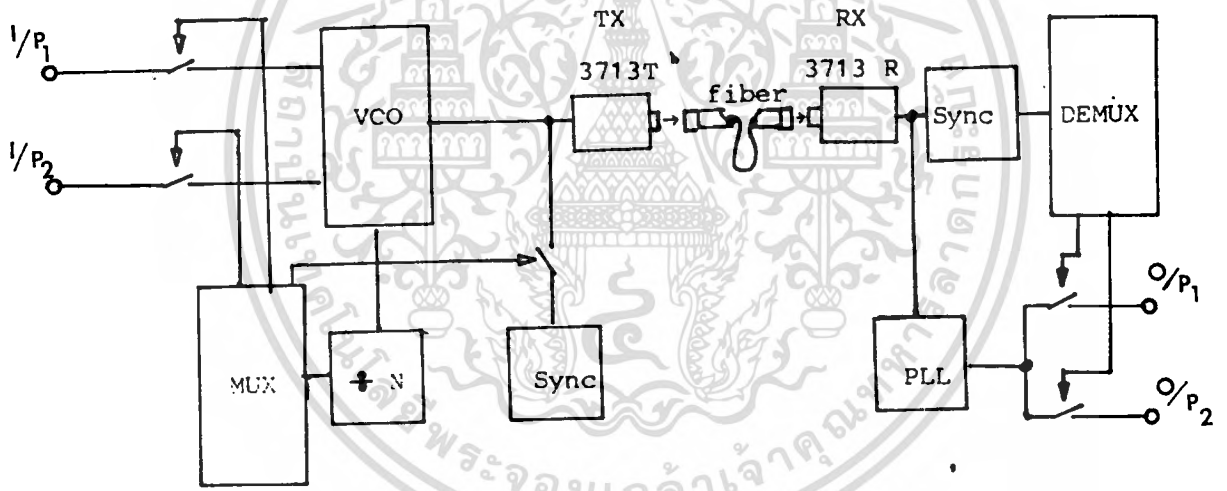
ในแบบที่ 1 มัลติเพล็กซ์แบบ FDM และความกว้างพัลส์ [ 4 ]

ตารางที่ ผ.1:1 แสดงค่าการรบกวนข้ามช่องสัญญาณ

สู่ช่องสัญญาณ	1	2	3
จากช่องสัญญาณ			
1	-	26 dB	26 dB
2	22 dB	-	18 dB
3	26 dB	26 dB	-

SNR ที่ที่สุด 26 dB และต่ำสุด 18 dB

แบบที่ 2 [ 9 ] ส่งสัญญาณเสียง 2 ช่องสัญญาณทำมัลติเพล็กซ์ด้วยการแบ่งช่วงเวลา ส่งสัญญาณเสียงเข้าที่ละช่อง ใช้สัญญาณเสียงที่ส่งได้มอดูเลทเปลี่ยนแปลงความถี่ออสซิลเลเตอร์ของ VCO รอบความถี่กลาง เป็นการมอดูเลทแบบ FM เช่นกัน แล้วทำการสวิตช์สัญญาณออกมอดูเลทเป็นแสงด้วยสัญญาณที่ใช้ในการส่งช่องเดียวกัน มีช่องสัญญาณสำหรับการซิงค์ โดยความกว้างของพัลส์แตกต่างจากช่องอื่น ผลการทดลองมีการรบกวนในช่องสัญญาณประมาณ 12 dB การรบกวนข้ามช่องสัญญาณที่สุทธิตั้งที่ความถี่สัญญาณเสียง 200 Hz 24 dB และต่ำสุดที่ 3 kHz 8 dB



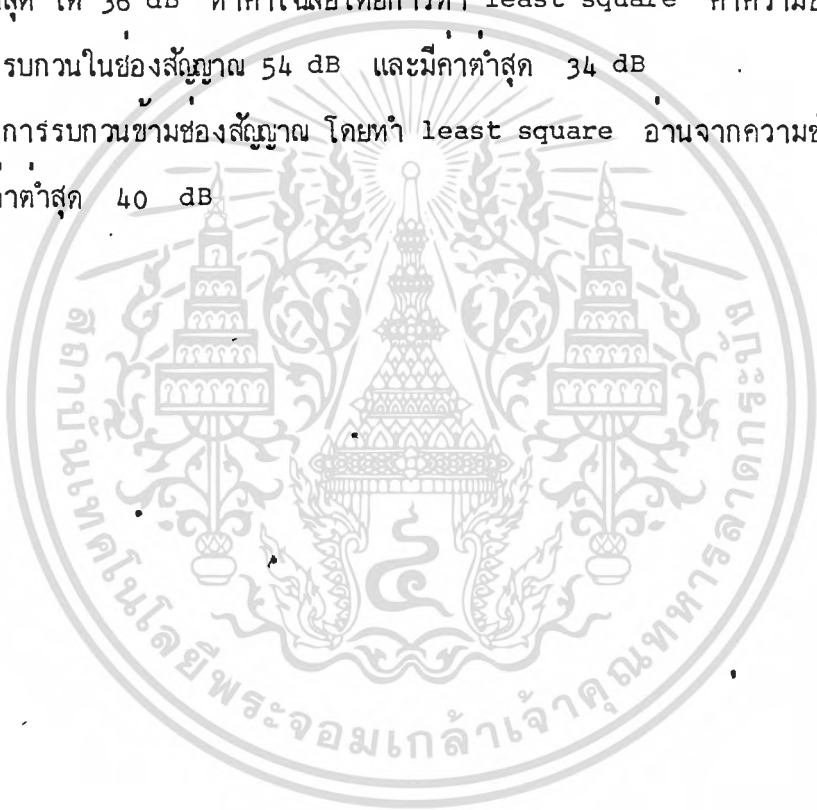
ภาพที่ ผ.1.2 แสดงบล็อกโคอะแอมการรับส่งแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แบบที่ 3

เป็นการทดลองที่นำมาเขียนเป็นวิทยานิพนธ์นี้ ทำมัลติเพล็กซ์ด้วยการแบ่งช่วงเวลา มอดูเลทด้วยการเปลี่ยนสัญญาณเป็นความถี่ โดยวิธี VFC เมื่อสัญญาณเป็น 0 V ความถี่มอดูเลท เป็น 0 Hz และความถี่มอดูเลทจะเพิ่มสูงขึ้น ตามโวลเตจของสัญญาณที่สูงขึ้น สัญญาณเปลี่ยนได้จาก 0 - 10V ความถี่มอดูเลทจาก VFC เป็น 0-10 kHz พิจารณาการรบกวนในช่องสัญญาณจากข้อมูลของการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงของ INPUT เต็มสเกล กับช่วงการผิดหลักของ OUTPUT ที่เบาเบนไปมากที่สุด ได้ 36 dB หากค่าเฉลี่ยโดยการทำ least square ค่าความชันของกราฟเป็นค่าเฉลี่ยการรบกวนในช่องสัญญาณ 54 dB และมีค่าต่ำสุด 34 dB

การรบกวนข้ามช่องสัญญาณ โดยทำ least square อ่านจากความชันของกราฟ 55 dB และมีค่าต่ำสุด 40 dB



ตารางที่ ผ.1.2 สรุปสถานะการทำงานของวงจร และผลการทดลองการรบกวน  
ภายในช่องสัญญาณ และข้ามช่องสัญญาณ

การทำงานของวงจร และผลการทดลอง	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3
การมัลติเพล็กซ์	FDMและความกว้าง ของพัลส์	TDM	TDM
การมอดูเลต	FM - VCO frequency deviation	FM - VCO frequency deviation	FM - VFC
การรบกวนในช่อง สัญญาณ	ไม่มีข้อมูล	12 dB	ช่วงกว้างตาม input เต็มสเกล 36 dB ค่าเฉลี่ย 54 dB ต่ำสุด 34 dB
การรบกวนข้ามช่อง สัญญาณ	ดีที่สุดในที่ ต่ำสุด 26 dB 18 dB	ดีที่สุดในที่ ต่ำสุด 24 dB (200 Hz) ต่ำสุด 8 dB (3 kHz)	เฉลี่ย 55 dB ต่ำสุด 40 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวกที่ 2

การสื่อสารด้วยใยนำแสงแบ่งตามการพัฒนาใช้งาน ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ได้เป็น 3 รุ่น คือ รุ่นที่ 1 0.8-0.9  $\mu\text{m}$  รุ่นที่ 2 ที่ความยาวคลื่น 1.3  $\mu\text{m}$  และรุ่นที่ 3 ที่ 1.55  $\mu\text{m}$  มีข้อมูลที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตาราง ( รวบรวมจากเอกสารอ้างอิง หมายเลข 3 )

ความยาว คลื่น $\mu\text{m}$	ชนิด ใยนำแสง	แหล่ง กำเนิดแสง	สาเหตุการกระจายแสงที่สำคัญ			แบนด์วิดธ์ ประมาณ MHz.km	การลดทอน สัญญาณ dB/km
			เนื้อสาร ns./km	โหมด ns./km	ทอนำคลื่น ns/km		
0.9	SI	LED	15	-	-	30	3.2-5
	GI	LED	2.1	0.5	-	200	
		LASER	0.2	0.5	-	1000	
1.3	GI	LED	0.1	0.5	-	1000	0.5
		LASER	0.01	0.5	-	$10 \times 10^3$	
	SM	LASER	-0.038	-	0.037	$5 \times 10^{5*}$ $5 \times 10^{4**}$	
1.55	GI	LED	1.2	0.5	-	200	0.2
		LASER	0.1	0.5	-	1000	
	SM	LASER	-0.022	-	0.004	$6 \times 10^3$ $5 \times 10^{4***}$	

SI = Step Index      GI = Graded Index      SM = Single mode

\* จากทฤษฎี    \*\* จากการทดลอง    \*\*\* เมื่อค่าการกระจายแสงน้อยที่สุดอยู่ที่ 1.5  $\mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



A to D, D to A

## LM131A/LM131, LM231A/LM231, LM331A/LM331 Precision Voltage-to-Frequency Converters

### General Description

The LM131/LM231/LM331 family of voltage-to-frequency converters are ideally suited for use in simple low-cost circuits for analog-to-digital conversion, precision frequency-to-voltage conversion, long-term integration, linear frequency modulation or demodulation, and many other functions. The output when used as a voltage-to-frequency converter is a pulse train at a frequency precisely proportional to the applied input voltage. Thus, it provides all the inherent advantages of the voltage-to-frequency conversion techniques, and is easy to apply in all standard voltage-to-frequency converter applications. Further, the LM131A/LM231A/LM331A attains a new high level of accuracy versus temperature which could only be attained with expensive voltage-to-frequency modules. Additionally the LM131 is ideally suited for use in digital systems at low power supply voltages and can provide low-cost analog-to-digital conversion in microprocessor-controlled systems. And, the frequency from a battery powered voltage-to-frequency converter can be easily channeled through a simple photoisolator to provide isolation against high common mode levels.

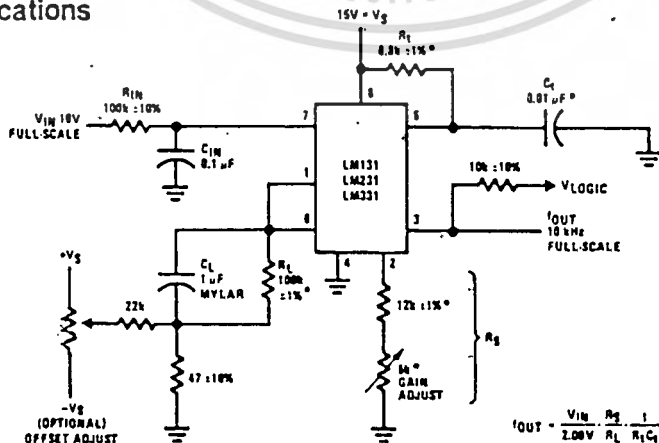
The LM131/LM231/LM331 utilizes a new temperature-compensated band-gap reference circuit, to provide excellent accuracy over the full operating temperature range, at power supplies as low as 4.0V. The precision timer circuit has low bias currents without degrading

the quick response necessary for 100 kHz voltage-to-frequency conversion. And the output is capable of driving 3 TTL loads, or a high voltage output up to 40V, yet is short-circuit-proof against VCC.

### Features

- Guaranteed linearity 0.01% max
- Improved performance in existing voltage-to-frequency conversion applications
- Split or single supply operation
- Operates on single 5V supply
- Pulse output compatible with all logic forms
- Excellent temperature stability,  $\pm 50$  ppm/ $^{\circ}$ C max
- Low power dissipation, 15 mW typical at 5V
- Wide dynamic range, 100 dB min at 10 kHz full scale frequency
- Wide range of full scale frequency, 1 Hz to 100 kHz
- Low cost

### Typical Applications



\*Use stable components with low temperature coefficients. See Typical Applications section.

**Absolute Maximum Ratings**

	LM131A/LM131	LM231A/LM231	LM331A/LM331
Supply Voltage	40V	40V	40V
Output Short Circuit to Ground	Continuous	Continuous	Continuous
Output Short Circuit to VCC	Continuous	Continuous	Continuous
Input Voltage	-0.2V to +V <sub>S</sub>	-0.2V to +V <sub>S</sub>	-0.2V to +V <sub>S</sub>
Operating Ambient Temperature Range	T <sub>MIN</sub> T <sub>MAX</sub> -55°C to +125°C	T <sub>MIN</sub> T <sub>MAX</sub> -25°C to +85°C	T <sub>MIN</sub> T <sub>MAX</sub> 0°C to +70°C
Power Dissipation (P <sub>D</sub> at 25°C) and Thermal Resistance (θ <sub>jA</sub> )			
(H Package) P <sub>D</sub>	670 mW	570 mW	570 mW
θ <sub>jA</sub>	150°C/W	150°C/W	150°C/W
(N Package) P <sub>D</sub>		500 mW	500 mW
θ <sub>jA</sub>		155°C/W	155°C/W

**Electrical Characteristics** T<sub>A</sub> = 25°C unless otherwise specified. (Note 1)

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
VFC Non-Linearity (Note 2)	4.5V ≤ V <sub>S</sub> ≤ 20V		±0.003	±0.01	% Full-Scale
In Circuit of Figure 1	T <sub>MIN</sub> ≤ T <sub>A</sub> ≤ T <sub>MAX</sub>		±0.006	±0.02	% Full-Scale
	V <sub>S</sub> = 15V, f = 10 Hz to 11 kHz		±0.024	±0.14	% Full-Scale
Conversion Accuracy Scale Factor (Gain)	V <sub>IN</sub> = -10V, R <sub>S</sub> = 14 kΩ				
LM131, LM131A, LM231, LM231A		0.95	1.00	1.05	kHz/V
LM331, LM331A		0.90	1.00	1.10	kHz/V
Temperature Stability of Gain	T <sub>MIN</sub> ≤ T <sub>A</sub> ≤ T <sub>MAX</sub> , 4.5V ≤ V <sub>S</sub> ≤ 20V				
LM131/LM231/LM331			±30	±150	ppm/°C
LM131A/LM231A/LM331A			±20	±50	ppm/°C
Change of Gain with V <sub>S</sub>	4.5V ≤ V <sub>S</sub> ≤ 10V		0.01	0.1	%/V
	10V ≤ V <sub>S</sub> ≤ 40V		0.006	0.06	%/V
Rated Full-Scale Frequency	V <sub>IN</sub> = -10V	10.0			kHz
Overrange (Beyond Full-Scale) Frequency	V <sub>IN</sub> = -11V	10			%
<b>INPUT COMPARATOR</b>					
Offset Voltage			±3	±10	mV
LM131/LM231/LM331	T <sub>MIN</sub> ≤ T <sub>A</sub> ≤ T <sub>MAX</sub>		±4	±14	mV
LM131A/LM231A/LM331A	T <sub>MIN</sub> ≤ T <sub>A</sub> ≤ T <sub>MAX</sub>		±3	±10	mV
Bias Current			-80	-300	nA
Offset Current			±8	±100	nA
Common-Mode Range	T <sub>MIN</sub> ≤ T <sub>A</sub> ≤ T <sub>MAX</sub>	-0.2		V <sub>CC</sub> -2.0	V
<b>TIMER</b>					
Timer Threshold Voltage, Pin 5		0.63	0.657	0.70	* V <sub>S</sub>
Input Bias Current, Pin 5	V <sub>S</sub> = 15V				
All Devices	0V ≤ V <sub>PIN 5</sub> ≤ 9.9V		±10	±100	nA
LM131, LM231, LM331	V <sub>PIN 5</sub> = 10V		200	1500	nA
LM131A, LM231A, LM331A	V <sub>PIN 5</sub> = 10V		200	500	nA
V <sub>SAT</sub> Pin 5 (Reset)	I = 5 mA		0.22	0.5	V

Electrical Characteristics (Continued;  $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise specified (Note 1))

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
<b>CURRENT SOURCE (Pin 1)</b>					
Output Current LM131, LM131A, LM231, LM231A LM331, LM331A	$R_S = 14\text{ k}\Omega, V_{PIN\ 1} = 0$	126 116	135 136	144 156	$\mu\text{A}$
Change with Voltage	$0\text{V} \leq V_{PIN\ 1} \leq 12\text{V}$		0.2	1.0	$\mu\text{A}$
Current Source OFF Leakage LM131, LM131A LM231, LM231A, LM331, LM331A All Devices	$T_A = T_{MAX}$		0.01 0.02	1.0 10.0	nA
Operating Range of Current (Typical)			(10 to 500)		$\mu\text{A}$
<b>REFERENCE VOLTAGE (Pin 2)</b>					
LM131, LM131A, LM231, LM231A LM331, LM331A		1.76 1.70	1.89 1.89	2.02 2.08	V <sub>DC</sub>
Stability vs Temperature			$\pm 60$		ppm/°C
Stability vs Time, 1000 Hours			$\pm 0.1$		%
<b>LOGIC OUTPUT (Pin 3)</b>					
V <sub>SAT</sub>	$I = 5\text{ mA}$ $I = 3.2\text{ mA}$ (2 TTL Loads), $T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$		0.15 0.10	0.50 0.40	V
OFF Leakage			$\pm 0.05$	1.0	$\mu\text{A}$
<b>SUPPLY CURRENT</b>					
LM131, LM131A, LM231, LM231A LM331, LM331A	$V_S = 5\text{V}$ $V_S = 40\text{V}$ $V_S = 5\text{V}$ $V_S = 40\text{V}$	2.0 2.5 1.5 2.0	3.0 4.0 3.0 4.0	4.0 6.0 6.0 8.0	mA

Note 1: All specifications apply in the circuit of Figure 3, with  $4.0\text{V} \leq V_S \leq 40\text{V}$ , unless otherwise noted.  
 Note 2: Nonlinearity is defined as the deviation of  $I_{OUT}$  from  $V_{IN} \times (10\text{ kHz}) - 10\text{ V}_{DC}$  when the circuit has been trimmed for zero error at 10 kHz and at 10 kHz, over the frequency range 1 Hz to 11 kHz. For the timing capacitor,  $C_T$ , use NPO ceramic, Teflon<sup>®</sup>, or polystyrene.

Functional Block Diagrams

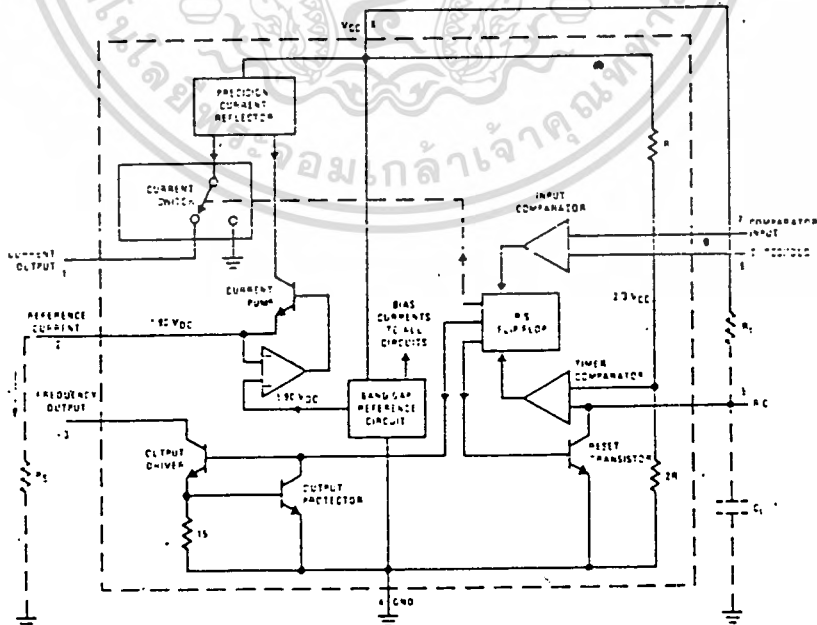


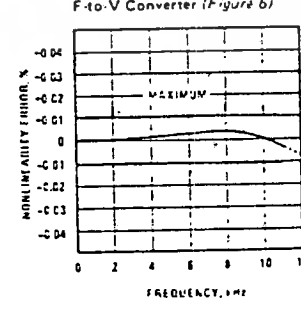
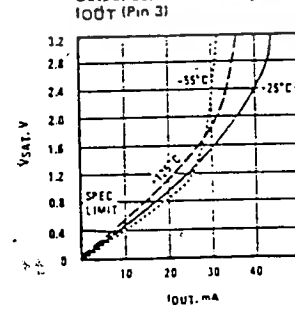
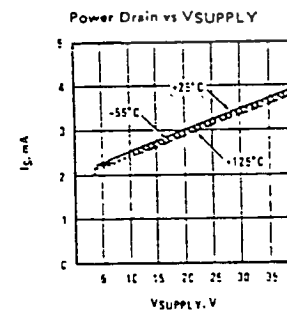
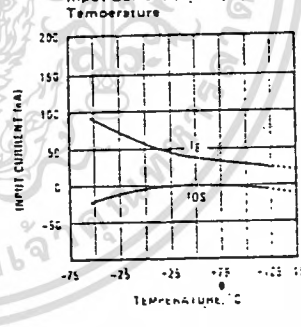
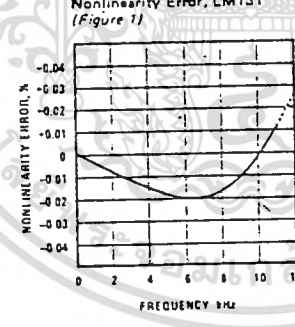
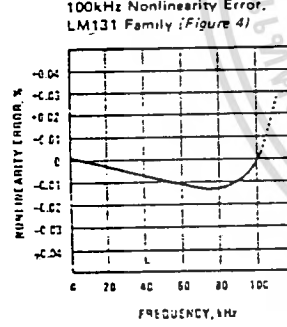
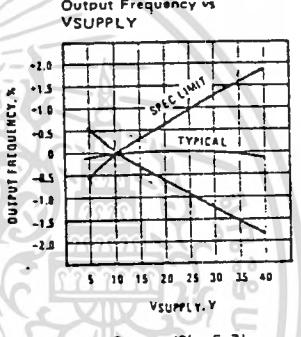
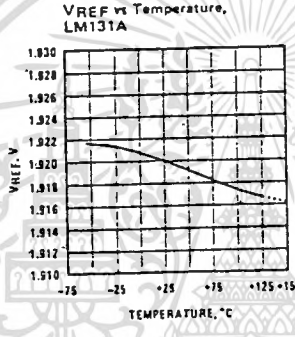
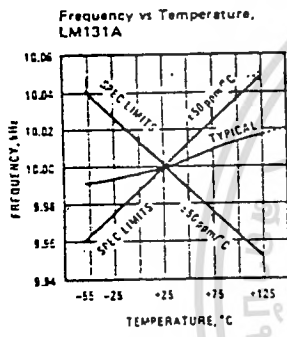
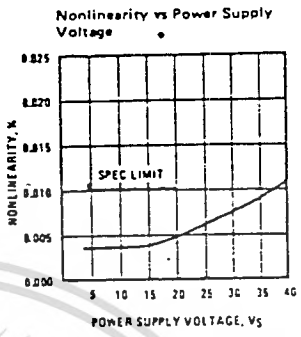
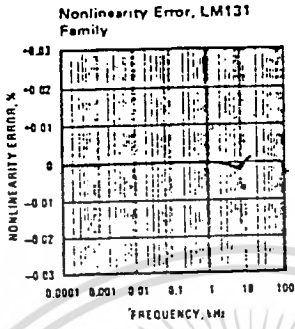
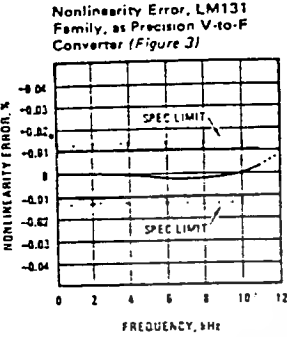
FIGURE 1a

\*Registered trademark of DuPont

### Typical Performance Characteristics

(All electrical characteristics apply for the circuit of Figure 3, unless otherwise noted.)

LM131A/LM131, LM231A/LM231, LM331A/LM331



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Typical Applications (Continued)

### PRINCIPLES OF OPERATION OF A SIMPLIFIED VOLTAGE-TO-FREQUENCY CONVERTER

The LM131 is a monolithic circuit designed for accuracy and versatile operation when applied as a voltage-to-frequency (V-to-F) converter or as a frequency-to-voltage (F-to-V) converter. A simplified block diagram of the LM131 is shown in *Figure 2* and consists of a switched current source, input comparator, and 1-shot timer.

The operation of these blocks is best understood by going through the operating cycle of the basic V-to-F converter, *Figure 2*, which consists of the simplified block diagram of the LM131 and the various resistors and capacitors connected to it.

The voltage comparator compares a positive input voltage,  $V_1$ , at pin 7 to the voltage,  $V_x$ , at pin 6. If  $V_1$  is greater, the comparator will trigger the 1-shot timer. The output of the timer will turn ON both the frequency output transistor and the switched current source for a period  $t = 1.1 R_T C_T$ . During this period, the current  $i$  will flow out of the switched current source and provide a fixed amount of charge,  $Q = i \times t$ , into the capacitor,  $C_L$ . This will normally charge  $V_x$  up to a higher level than  $V_1$ . At the end of the timing period, the current  $i$  will turn OFF, and the timer will reset itself.

Now there is no current flowing from pin 1, and the capacitor  $C_L$  will be gradually discharged by  $R_L$  until  $V_x$  falls to the level of  $V_1$ . Then the comparator will trigger the timer and start another cycle.

The current flowing into  $C_L$  is exactly  $I_{AVE} = i \times (1.1 \times R_T C_T) \times t$ , and the current flowing out of  $C_L$  is exactly  $V_x/R_L \cong V_{IN}/R_L$ . If  $V_{IN}$  is doubled, the frequency will double to maintain this balance. Even a simple V-to-F converter can provide a frequency precisely proportional to its input voltage over a wide range of frequencies.

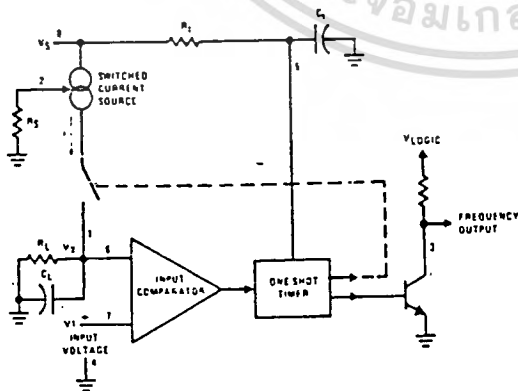


FIGURE 2. Simplified Block Diagram of Stand-Alone Voltage-to-Frequency Converter Showing LM131 and External Components

### DETAIL OF OPERATION, FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM (FIGURE 1a)

The block diagram shows a band gap reference which provides a stable 1.9 VDC output. This 1.9 VDC is well regulated over a  $V_S$  range of 3.9V to 40V. It also has a flat, low temperature coefficient, and typically changes less than 1/2% over a 100°C temperature change.

The current pump circuit forces the voltage at pin 2 to be at 1.9V, and causes a current  $i = 1.90V/R_S$  to flow. For  $R_S = 14k$ ,  $i = 135 \mu A$ . The precision current reflector provides a current equal to  $i$  to the current switch. The current switch switches the current to pin 1 or to ground depending on the state of the  $R_S$  flip-flop.

The timing function consists of an  $R_S$  flip-flop, and a timer comparator connected to the external  $R_T C_T$  network. When the input comparator detects a voltage at pin 7 higher than pin 6, it sets the  $R_S$  flip-flop which turns ON the current switch and the output driver transistor. When the voltage at pin 5 rises to  $2/3 V_{CC}$ , the timer comparator causes the  $R_S$  flip-flop to reset. The reset transistor is then turned ON and the current switch is turned OFF.

\* However, if the input comparator still detects pin 7 higher than pin 6 when pin 5 crosses  $2/3 V_{CC}$ , the flip-flop will not be reset, and the current at pin 1 will continue to flow, in its attempt to make the voltage at pin 6 higher than pin 7. This condition will usually apply under start-up conditions or in the case of an overload voltage at signal input. It should be noted that during this sort of overload, the output frequency will be 0; as soon as the signal is restored to the working range, the output frequency will be resumed.

The output driver transistor acts to saturate pin 3 with an ON resistance of about  $50\Omega$ . In case of overvoltage, the output current is actively limited to less than 50 mA.

The voltage at pin 2 is regulated at 1.90 VDC for all values of  $i$  between  $10 \mu A$  to  $500 \mu A$ . It can be used as a voltage reference for other components, but care must be taken to ensure that current is not taken from it which could reduce the accuracy of the converter.

### PRINCIPLES OF OPERATION OF BASIC VOLTAGE-TO-FREQUENCY CONVERTER (FIGURE 1)

The simple stand-alone V-to-F converter shown in *Figure 1* includes all the basic circuitry of *Figure 2* plus a few components for improved performance.

A resistor,  $R_{1N} = 400 k\Omega \pm 10\%$ , has been added in the path to pin 7, so that the bias current at pin 7 ( $-80 nA$  typical) will cancel the effect of the bias current at pin 6 and help provide minimum frequency of set.

The resistance  $R_S$  at pin 2 is made up of a 12 k $\Omega$  fixed resistor plus a 5 k $\Omega$  (cermet, preferably) gain adjust rheostat. The function of this adjustment is to trim out the gain tolerance of the LM131, and the tolerance of  $R_T$ ,  $R_L$  and  $C_T$ . For best results, all the components

Typical Applications (Continued)

should be stable low-temperature-coefficient components, such as metal-film resistors. The capacitor should have low dielectric absorption; depending on the temperature characteristics desired, NPO ceramic, polystyrene, Teflon\* or polypropylene are best suited.

A capacitor is added from pin 7 to ground to act as a filter for  $V_{IN}$ . A value of  $0.01 \mu F$  to  $0.1 \mu F$  will be adequate in most cases; however, in cases where better filtering is required, a  $1 \mu F$  capacitor can be used. When the RC time constants are matched at pin 6 and pin 7, a voltage step at  $V_{IN}$  will cause a step change in  $f_{OUT}$ . If  $C_{IN}$  is much less than  $C_L$ , a step at  $V_{IN}$  may cause  $f_{OUT}$  to stop momentarily.

A  $47\Omega$  resistor, in series with the  $1 \mu F$   $C_L$ , is added to give hysteresis effect which helps the input comparator provide the excellent linearity (0.03% typical).

DETAIL OF OPERATION OF PRECISION V-TO-F CONVERTER (FIGURE 3)

In this circuit, integration is performed by using a conventional operational amplifier and feedback capacitor,  $C_F$ . When the integrator's output crosses the nominal threshold level at pin 6 of the LM131, the timing cycle is

\*Registered trademark of DuPont

initiated. The average current fed into the op amp's summing point (pin 2) is  $i \times (1.1 R_C C_T) \times f$  which is perfectly balanced with  $-V_{IN}/R_{IN}$ . In this circuit, the voltage offset of the LM131 input comparator does not affect the offset or accuracy of the V-to-F converter as it does in the stand-alone V-to-F converter; nor does the LM131 bias current or offset current. Instead, the offset voltage and offset current of the operational amplifier are the only limits on how small the signal can be accurately converted. Since op amps with voltage offset well below 1 mV and offset currents well below 2 nA are available at low cost, this circuit is recommended for best accuracy for small signals. This circuit also responds immediately to any change of input signal (which a stand-alone circuit does not) so that the output frequency will be an accurate representation of  $V_{IN}$ , as quickly as 2 output pulses' spacing can be measured.

In the precision mode, excellent linearity is obtained because the current source (pin 1) is always at ground potential and that voltage does not vary with  $V_{IN}$  or  $f_{OUT}$ . (In the stand-alone V-to-F converter, a major cause of non-linearity is the output impedance at pin 1 which causes  $i$  to change as a function of  $V_{IN}$ .)

The circuit of Figure 4 operates in the same way as Figure 3, but with the necessary changes for high speed operation.

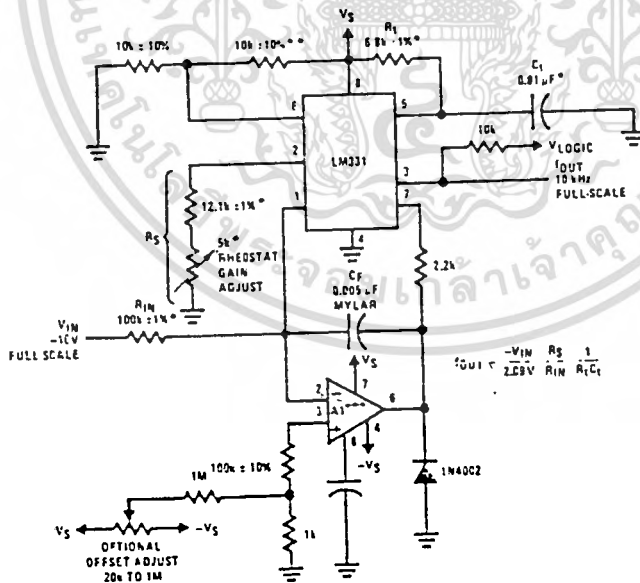


FIGURE 3. Standard Test Circuit and Applications Circuit, Precision Voltage-to-Frequency Converter

LM131A/LM131, LM231A/LM231, LM331A/LM331



Typical Applications (Continued)

DETAILS OF OPERATION, FREQUENCY-TO-VOLTAGE CONVERTERS (FIGURES 5 AND 6)

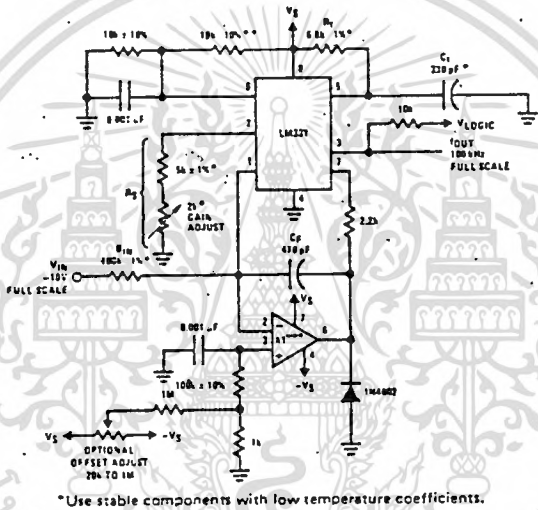
In these applications, a pulse input at  $f_{IN}$  is differentiated by a C-R network and the negative-going edge at pin 6 causes the input comparator to trigger the timer circuit. Just as with a V-to-F converter, the average current flowing out of pin 1 is  $I_{AVERAGE} = i \times (1.1 R_1 C_1) \times f$ .

In the simple circuit of Figure 5, this current is filtered in the network  $R_L = 100 \text{ k}\Omega$  and  $1 \mu\text{F}$ . The ripple will be less than 10 mV peak, but the response will be slow,

with a 0.1 second time constant, and settling of 0.7 second to 0.1% accuracy.

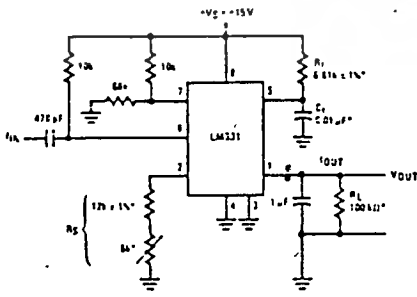
In the precision circuit, an operational amplifier provides a buffered output and also acts as a 2-pole filter. The ripple will be less than 5 mV peak for all frequencies above 1 kHz, and the response time will be much quicker than in Figure 5. However, for input frequencies below 200 Hz, this circuit will have worse ripple than Figure 5. The engineering of the filter time-constants to get adequate response and small enough ripple simply requires a study of the compromises to be made. Inherently, V-to-F converter response can be fast, but F-to-V response can not.

LM131A/LM131, LM231A/LM231, LM331A/LM331



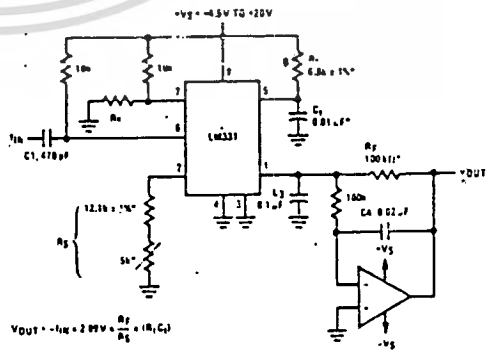
- \*Use stable components with low temperature coefficients. See Typical Applications section.
- \*\* This resistor can be 5 k $\Omega$  or 10 k $\Omega$  for  $V_S = 8\text{V}$  to 22V, but must be 10 k $\Omega$  for  $V_S = 4.5\text{V}$  to 8V.
- \*\*\* Use low offset voltage and low offset current op amps for A1; recommended types LF351B or LF356.

FIGURE 4. Precision Voltage-to-Frequency Converter, 100 kHz Full-Scale,  $\pm 0.03\%$  Non-Linearity



$$V_{OUT} \approx f_{IN} \times 2.99 \times \frac{R_1}{R_2} \times (R_1 C_1)$$

\*Use stable components with low temperature coefficients.  
FIGURE 5. Simple Frequency-to-Voltage Converter, 10 kHz Full-Scale,  $\pm 0.05\%$  Non-Linearity



$$\text{SELECT } R_2 = \frac{(V_S - 2V)}{0.7 \text{ mA}}$$

\*Use stable components with low temperature coefficients.  
FIGURE 6. Precision Frequency-to-Voltage Converter, 10 kHz Full-Scale with 2-Pole Filter,  $\pm 0.01\%$  Non-Linearity Maximum