

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ชัยยศ วัชรอยู่, การปรับปรุงระบบซ่อมบำรุงเพื่อเพิ่มผลผลิตของอุตสาหกรรมท่อผ้าขนาดกลาง.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2532.
- เชิดพงษ์ คำนุกุศลศิลป์, การปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมปั่นด้าย.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2539
- ไชยันต์ สุวรรณชีวะศิริ, ปฐมบทของไฟเบอร์ออปติก. เล่มที่ 115, มีนาคม-เมษายน 2535,
หน้า 86-95
- ชนวรรณ อัสวไพบูลย์, การเพิ่มผลผลิตโรงงานผลิตของเด็กเล่นที่ใช้ขั้วซีและเฟอร์นิเจอร์เหล็ก
โดยการปรับปรุงวิธีการทำงานและการวางแผนการผลิต. วิทยานิพนธ์ปริญญา
โทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.
- ธราธิป ตรีวิเชียร, การปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วน
และอุปกรณ์ระดับยนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรม
อุตสาหกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539
- ธาดา พงศ์ธาดา, การลดต้นทุนการผลิตในสถานประกอบการ. จำนวน 3,000 เล่ม.
พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ บริษัท ประชาชน จำกัด, 2537.
- บุญเกียรติ ชีวะตระกูลกิจ, การปรับปรุงการบริหารการผลิตของอุตสาหกรรมอัดป้อ และผลิต
กัณฑ์มันสำปะหลังในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร
ธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
- ผจญ ภัคคิกุล, การเพิ่มผลผลิตของอุตสาหกรรมการประกอบตู้เย็น. วิทยานิพนธ์ปริญญา
โทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2532
- มนตรี พิพัฒน์ไพบูลย์, การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมเครื่องสุขภัณฑ์
หินอ่อนเทียมในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชา
วิศวกรรมอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.

ภาษาไทย

ไมเคิล แฮมเมอร์ , เจมส์ แชมป์. รีเอนจินีเยริงเดอะคอร์ปอเรชัน. พิมพ์ครั้งที่ 5.

กรุงเทพมหานคร : คู่แข่ง , 2537

ลอจิกอินเตอร์เฟซพื้นฐาน . เซมิกอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ , เล่มที่ 117 มิถุนายน 2535,

หน้า 101-113

วันชัย วิจารณ์ช, การศึกษาการทำงาน หลักการและกรณีศึกษา . พิมพ์ครั้งที่ 1.

กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2539

วิจิตร ตันตสุทธิ , วันชัย วิจารณ์ช , จริญญา หิทธิธาฟองกุล และ ชูเวช ชาญสง่าเวช . การศึกษาการ

ทำงาน . พิมพ์ครั้งที่ 3 . กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2535 .

ศิริวรรณ ฉันทวิทตพงษ์, การปรับปรุงระบบการซ่อมบำรุงเพื่อเพิ่มผลผลิตของโรงงานผลิตกระป๋อง

ขนาดเล็ก . วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2536

สมนึก วิสุทธิแพทย์, การปรับปรุงการวางแผนการผลิตของโรงงานผลิตกระป๋องขนาดเล็กใน

ประเทศไทย . วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2523 .

สุนันท์ วิเศษสรโรช, การเพิ่มผลผลิตในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนโลหะของรถยนต์ .

วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2533 .

อัมพิกา ไกรฤทธิ, วิศวกรรมคุณค่า . พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร :

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย . 2537

ภาษาอังกฤษ

Banes, Ralph M. Motion and Time Study. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1980.

Hammer, Michael and Champy, James. Reengineering the corporation : a manifesto for

business revolution . New York : HarperCollins Publisher, Inc., 1994

Lancaster, Don TTL cookbook. Indianapolis ; Howard W. Sam & Co., 1974

Mayer, Raymond R. Production and operations management. 4th ed. Singapore : McGraw-Hill,

1982.

ภาษาอังกฤษ

Stevenson, William J. Production / operations management. 3rd ed. Singapore : Richard D. Irwin, 1990.

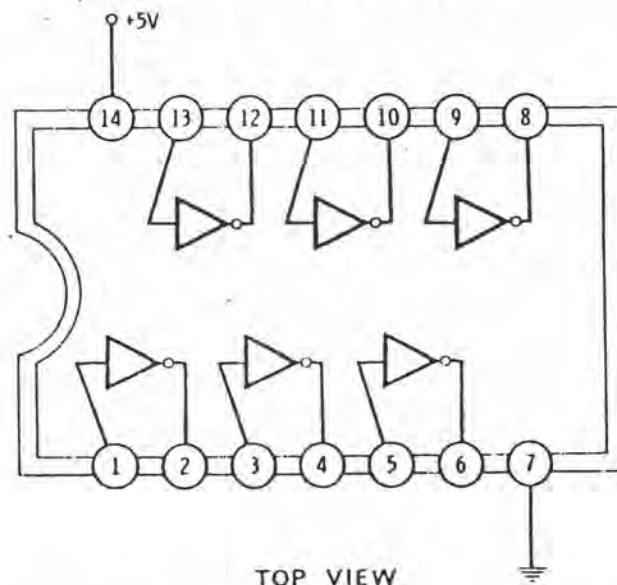
Sumanth, David J. Productivity Engineering and Management. New York : McGraw-Hill, 1985.

ภาคผนวก ก

ไอซี 7404

7404

HEX INVERTER



TOP VIEW

All six inverters may be used independently. On any one inverter, the *low*-input condition drives the output *high*. The *high*-input condition drives the output *low*.

Propagation delay 10 nanoseconds average

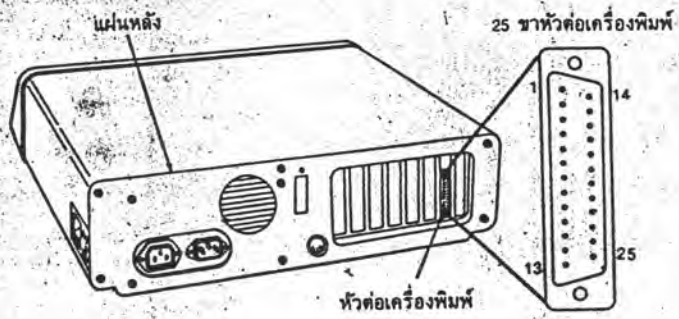
Current per package 12 milliamperes average

รูปที่ ก1 แสดงวงจรภายในไอซี 7404

ภาคผนวก ข

พริ้นเตอร์พอร์ต (Printer port)

รายละเอียดของวงจรพริ้นเตอร์พอร์ตบนเครื่องไอบีเอ็ม พีซี และหัวต่อเครื่องพิมพ์ 25 ขา แสดงดังรูปที่ ข1



รูปที่ ข1 หัวต่อเครื่องพิมพ์ 25 ขา

ตารางที่ ข1 สัญญาณทั้งหมดที่นำไปใช้งาน

ชื่อสัญญาณ	ขาที่	แหล่งจ่าย	ใช้ สำหรับ	รายละเอียด
Data strobe	1	คอมพิวเตอรื	ควบคุม	จะให้พัลส์เป็น low ไปควบคุมสัญญาณข้อมูล
Data 0-7	2-9	คอมพิวเตอรื	ข้อมูล	จะส่งสัญญาณ 8 บิต ไปสร้างตัวอักษร
Acknowledge	10	อุปกรณ์ร่วม	ควบคุม	จะให้พัลส์เป็น low เมื่อรับข้อมูลมาแล้ว
Busy	11	อุปกรณ์ร่วม	ควบคุม	จะให้พัลส์เป็น high เมื่ออุปกรณ์ร่วมไม่พร้อมที่จะทำ
Paper Empty	12	อุปกรณ์ร่วม	ควบคุม	งาน
Select	13	อุปกรณ์ร่วม	ควบคุม	จะให้พัลส์เป็น high เมื่อต้องการกระดาษเพิ่ม
Auto Linefeed	14	คอมพิวเตอรื	ควบคุม	จะให้พัลส์เป็น high เมื่ออุปกรณ์ร่วม online
Signal Ground	16,33	-	กราวด์	พัลส์จะเป็น low เมื่ออุปกรณ์ร่วมต้องการ linefeed
Chassis Ground	17	อุปกรณ์ร่วม	กราวด์	สัญญาณอ้างอิง 0 โวลต์
+5 Volt	18,35	อุปกรณ์ร่วม	-	กราวด์แทน
G r o u n d	19-30	-	-	เป็นแรงดัน pull-up
Returns	31	คอมพิวเตอรื	ควบคุม	เป็นสายชิลด์ระหว่างขา 1-12
Input Prime	32	อุปกรณ์ร่วม	ควบคุม	จะให้พัลส์เป็น low เพื่อรีเซตอุปกรณ์ร่วม
Fault	36	คอมพิวเตอรื	-	จะให้พัลส์เป็น low เพื่อแสดงสถานะของการผิดพลาด
Select	15,36	-	-	
Notused				อินาเบิต DC1/DC3 เมื่อ protocol เป็น high
				-

ภาคผนวก ก

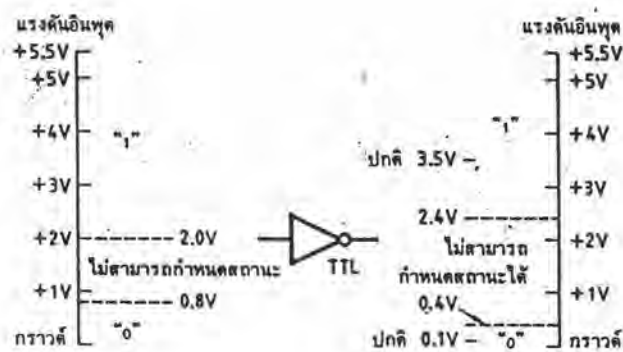
ลอจิกอินเทอร์เฟส

กล่าวถึงคุณสมบัติเฉพาะของไอซีดิจิทัลตระกูลต่าง ๆ การเชื่อมต่อไอซีดิจิทัลต่างตระกูลแบบพื้นฐาน การเชื่อมต่อสวิทช์กับไอซีดิจิทัล การใช้เลยทำการแยกวงจรดิจิทัลกับวงจรกระแสสูง เช่น มอเตอร์หรือโซลินอยด์

คุณสมบัติทางแรงดันของไอซีดิจิทัล

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติทางแรงดันทั้งแรงดันทางอินพุตและเอาต์พุตของ ไอซีดิจิทัลทุกแบบ

ในวงจรดิจิทัลจะพบค่าสองค่าคือ ลอจิก "1" (สูง) และลอจิก "0" (ต่ำ) ในรูปที่ ก1 แสดงคุณสมบัติทางแรงดันของอินเวอร์เตอร์เกต (นอตเกต) สร้างจากอุปกรณ์ไบโพลาร์อยู่ในตระกูล TTL มีคุณสมบัติทางแรงดันอินพุตดังนี้



รูปที่ ก1 แสดงช่วงของระดับแรงดันอินพุตและเอาต์พุตของ ไอซีตระกูล TTL

ที่ลอจิก "0" มีค่าแรงดันอยู่ในช่วง 0 ถึง 0.8 โวลต์ ที่ลอจิก "1" มีค่าแรงดันอยู่ระหว่าง 2.0 ถึง 5.5 โวลต์ ในช่วงระหว่าง 0.8 ถึง 2.0 โวลต์ เป็นช่วงที่ไม่มีการใช้งาน เนื่องจากตัวไอซีจะไม่สามารถรับรู้สถานะ (undefined) ที่ป้อนให้ได้ว่า เป็น "0" หรือ "1" ตัวอย่างเช่น แรงดันอินพุตมีค่า 0.5 โวลต์ จะเป็นลอจิก "0" แรงดันอินพุตมีค่า 1.6 โวลต์ เป็นช่วงที่ไม่ได้ใช้งานจะทำให้ได้เอาต์พุตมีค่าลอจิกที่ไม่แน่นอน และถ้าแรงดันอินพุตเป็น 3.2 โวลต์ จะเป็นลอจิก "1" เป็นต้น

ส่วนทางด้านแรงดันเอาต์พุตจะเป็นคังนี่คือ ที่ลอจิก “0” จะมีค่าแรงดันระหว่าง 0.1 ถึง 0.4 โวลต์ ส่วนลอจิก “1” จะมีค่าแรงดันอยู่ระหว่าง 2.4 ถึง 5 โวลต์ โดยมักจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของโหลดที่ต่ออยู่กับเอาต์พุตสำหรับค่าแรงดันระหว่าง 0.4 ถึง 2.4 โวลต์ มักจะไม่เกิดขึ้นขณะใช้งาน

สำหรับไอซีตระกูล CMOS อนุกรม 4000 และ 74C00 สามารถใช้งานได้กับแหล่งจ่ายไฟในช่วงที่กว้างกว่าไอซีตระกูล TTL คือ ประมาณ +3 ถึง +15 โวลต์ดังนั้นค่าแรงดันอินพุตและเอาต์พุตที่ลอจิก “1” และลอจิก “0” ก็จะมีค่าแตกต่างกันไป

ในรูปที่ ค2 (ก) แสดงค่าแรงดันทางอินพุตและเอาต์พุตเมื่อใช้กับแรงดันแหล่งจ่ายไฟ 10 โวลต์ ที่ลอจิก “1” จะมีค่าแรงดันอยู่ระหว่าง 70 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันแหล่งจ่ายไฟ ส่วนลอจิก “0” จะมีค่าแรงดันอยู่ระหว่าง 0 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันแหล่งจ่ายไฟทั้งอนุกรม 4000 และ 74C00

ส่วนทางด้านเอาต์พุตถ้าเป็นลอจิก “1” จะมีค่าแรงดันเกือบเท่าแหล่งจ่ายไฟและถ้าเป็นลอจิก “0” จะมีค่าใกล้เคียงกับ 0 โวลต์

ไอซี CMOS อนุกรม 74HC00 สามารถทำงานได้ที่แรงดันแหล่งจ่ายไฟตั้งแต่ 2 ถึง 6 โวลต์ ระดับแรงดันอินพุตและเอาต์พุตแสดงดังรูปที่ ค2 (ข) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับไอซี CMOS อนุกรม 4000 และ 74C00 จากรูปที่ ค2 (ก)

รูปที่ ค2 (ค) แสดงระดับแรงดันอินพุตและเอาต์พุตของไอซี CMOS อนุกรม 74HCT00 ระดับแรงดันอินพุตจะเหมือนกับไอซี TTL (ดูเปรียบเทียบกับรูปที่ ค1) ส่วนระดับแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าใกล้เคียงกับไอซี CMOS อนุกรมอื่น ๆ หรือกล่าวง่าย ๆ ก็คือ ไอซี CMOS อนุกรม 74HCT00 จะมีอินพุตเป็น TTL และให้เอาต์พุตเป็น CMOS เพื่อใช้งานในการเชื่อมต่อไอซี TTL กับไอซี CMOS โดยใช้งานที่แรงดันไฟเลี้ยง 5 โวลต์

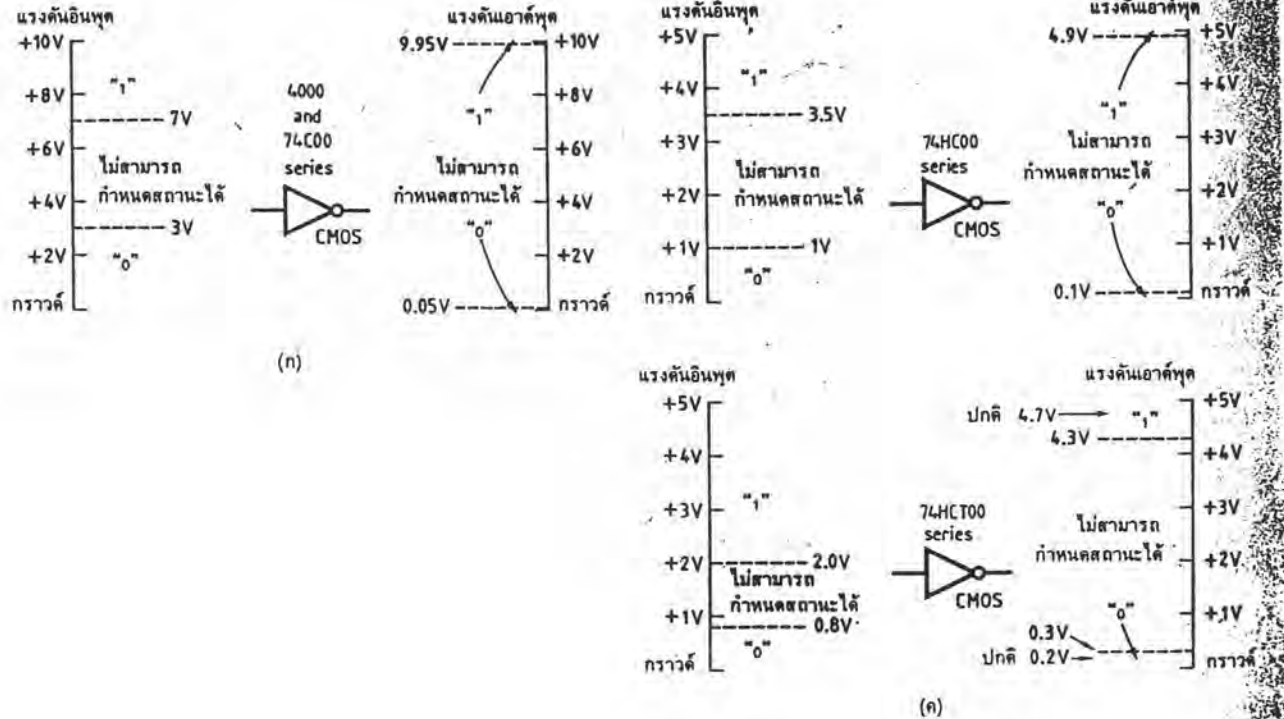
ข้อดีของไอซี CMOS ก็คือ สิ้นเปลืองกำลังงานต่ำและสามารถทนต่อสัญญาณรบกวน (noise immunity) ได้ดี

ความสามารถในการทนต่อสัญญาณรบกวนหมายถึง ขนาดของสัญญาณรบกวนสูงสุดที่รวมกับสัญญาณจริงแล้วไม่ทำให้เอาต์พุตผิดไป ดังแสดงในรูปที่ ค3 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างไอซี TTL กับไอซี CMOS จะเห็นว่าไอซี CMOS สามารถทนต่อสัญญาณรบกวนได้ดีกว่าไอซี TTL

ความสามารถในการจ่ายกระแสเอาต์พุต

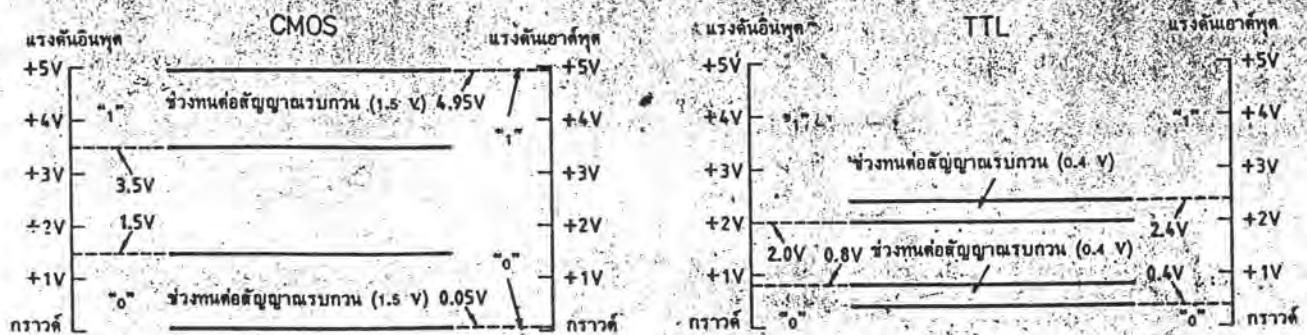
เมื่อก้าวถึงระบบดิจิทัลสิ่งหนึ่งที่จะขาดไม่ได้ก็คือ ความสามารถในการจ่ายกระแสทางเอาต์พุตหรือแฟนเอาต์ (fan out) ซึ่งหมายถึง จำนวนอินพุตของเกตมาตรฐานที่เอาต์พุตสามารถจ่ายให้ได้ตัวอย่างเช่น แฟนเอาต์ของไอซี TTL มาตรฐานมีค่าเท่ากับ 10 หมายความว่าสามารถนำเอาต์พุต 1

เอาต์พุตของไอซี TTL ไปจ่ายให้กับอินพุตของไอซี TTL ด้วยกันได้ 10 อินพุต โดยต้องอยู่ในตระกูลเดียวกัน ส่วนแฟนเอาต์ของไอซี LSTTL มีค่าประมาณ 20 และแฟนเอาต์ของไอซี CMOS อนุกรม 4000 มีค่าประมาณ 50



รูปที่ ก2 แสดงช่วงของระดับแรงดันอินพุตและเอาต์พุตของไอซีตระกูล CMOS ชนิดต่างๆ

- (ก) ไอซีตระกูล CMOS อนุกรม 4000 และ 74C00
- (ข) ไอซีตระกูล CMOS อนุกรม 74HC00
- (ค) ไอซีตระกูล CMOS อนุกรม 74HCT00



รูปที่ ก3 แสดงความสามารถในการทนต่อสัญญาณรบกวนเปรียบเทียบกันระหว่าง ไอซี TTL กับ ไอซี CMOS

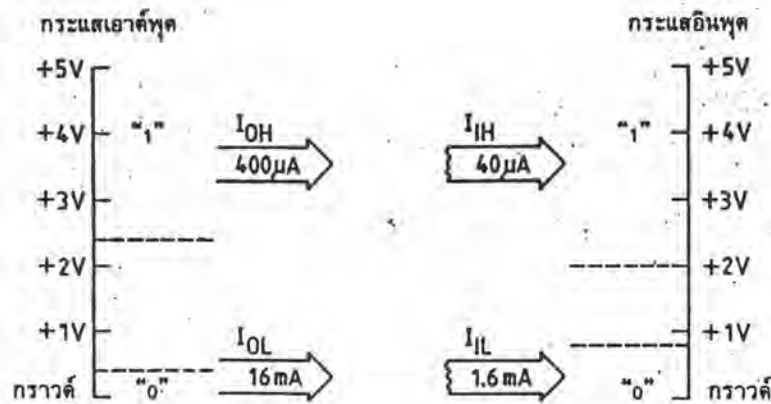
ตารางที่ ค1 แสดงความสามารถในการจ่ายกระแสและการกินกระแสของไอซี TTL และ CMOS ในอนุกรมต่าง ๆ

ไอซีตระกูล		กระแสเอาต์พุต*	กระแสอินพุต
CMOS	Standard TTL	$I_{OH} = 400 \mu A$ $I_{OL} = 16 mA$	$I_{IH} = 40 \mu A$ $I_{IL} = 1.6 mA$
	Low Power Schottky	$I_{OH} = 400 \mu A$ $I_{OL} = 8 mA$	$I_{IH} = 20 \mu A$ $I_{IL} = 400 \mu A$
	Advanced Low Power Schottky	$I_{OH} = 400 \mu A$ $I_{OL} = 8 mA$	$I_{IH} = 20 \mu A$ $I_{IL} = 100 \mu A$
TTL	4000 Series	$I_{OH} = 400 \mu A$ $I_{OL} = 400 \mu A$	$I_{in} = 1 \mu A$
	74HC00 Series	$I_{OH} = 4 mA$ $I_{OL} = 4 mA$	$I_{in} = 1 \mu A$

* ไอซีจิกิตอลที่เป็นบัฟเฟอร์และ ไครเวอร์จะสามารถจ่ายกระแสได้มากกว่านี้

ตารางที่ ค2 แสดงการเปรียบเทียบแฟนเอาต์ของไอซีลจิกแบบต่าง ๆ

อินพุต เอาต์พุต	TTL มาตรฐาน	Low-Power TTL	High-Speed TTL	Schottky TTL	Low-Power Schottky TTL	CMOS
TTL มาตรฐาน	10	40	6	6	20	50
Low-Power TTL	2	10	1	1	5	50
High-Speed TTL	12	40	10	10	40	50
Schottky TTL	12	40	10	10	40	50
Low Power Schottky TTL	5	20	4	4	10	50
CMOS	1/2	1/2	1/2	1	1	50
High Speed CMOS	2	10	1	1	5	50



รูปที่ ค4 แสดงความสามารถในการจ่ายกระแสทางเอาต์พุต และการกินกระแสทางอินพุตของไอซี TTL มาตรฐาน

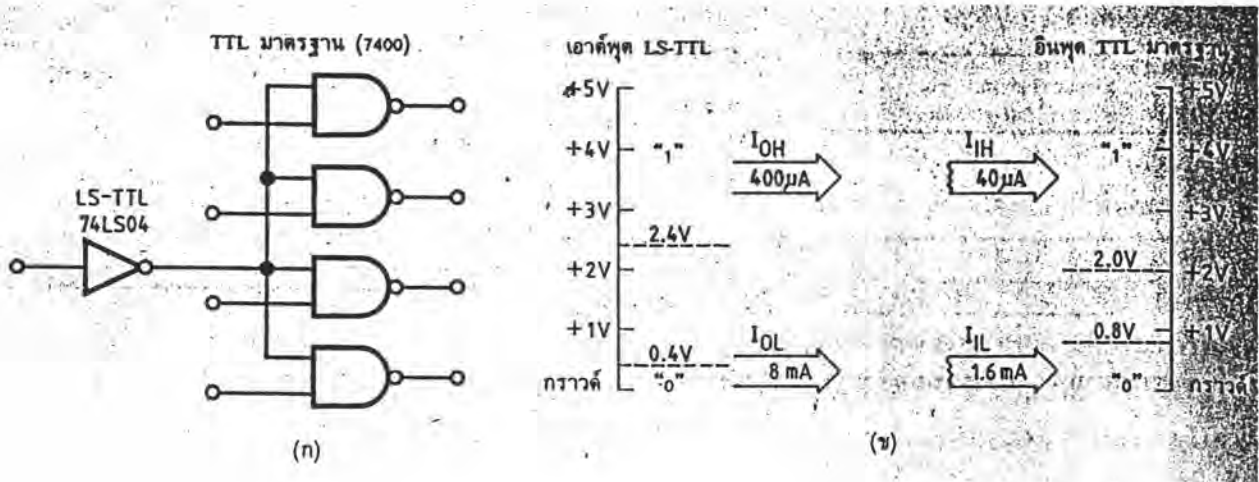
ในรูปที่ ค4 แสดงถึงความสามารถในการจ่ายกระแสและการกินกระแสของไอซี TTL มาตรฐาน จะเห็นว่าเมื่อเอาต์พุตเป็นลอจิก "0" จะสามารถจ่ายกระแสได้ 16 มิลลิแอมป์ (I_{OL}) และเมื่อเอาต์พุตเป็นลอจิก "1" จะสามารถจ่ายกระแสได้ 400 ไมโครแอมป์ (I_{OH})

มาดูทางด้านอินพุตบ้างเมื่อเป็นลอจิก "0" จะกินกระแส 1.6 มิลลิแอมป์ (I_{IL}) และเมื่อเป็นลอจิก "1" จะกินกระแส 40 ไมโครแอมป์ (I_{IH}) นั่นแสดงว่าเอาต์พุตของไอซี TTL มาตรฐาน (standard TTL) สามารถจ่ายกระแสให้กับอินพุตของไอซี TTL มาตรฐานได้เท่ากับ 10 อินพุต ($16 \text{ mA}/1.6 \text{ mA} = 10$ หรือ $400 \text{ } \mu\text{A}/40 \text{ } \mu\text{A}=10$)

คุณสมบัติในด้านการจ่ายกระแสทางเอาต์พุต และการกินกระแสทางอินพุตของไอซีดิจิทัลตระกูลต่าง ๆ สรุปได้ในตารางที่ ค1

รูปที่ ค5 (ก) เป็นตัวอย่างการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์เกตเบอร์ 74LS04 (low power schottky) กับแอสแตร์เกตเบอร์ 7400 (standard TTL) โดยแสดงคุณสมบัติทางแรงดันและกระแสไว้ในรูปที่ ค5 (ข) เมื่อเอาต์พุตของ 74LS04 เป็น "1" จะสามารถจ่ายกระแสให้กับอินพุตที่นำมาต่อได้ 10 อินพุต ($400 \text{ } \mu\text{A}/40 \text{ } \mu\text{A} = 10$) และเมื่อเอาต์พุตของ 74LS04 เป็น "0" จะสามารถจ่ายกระแสให้กับอินพุตที่นำมาต่อได้เท่ากับ 5 อินพุต ($8 \text{ mA}/1.6 \text{ mA} = 5$) เป็นต้น

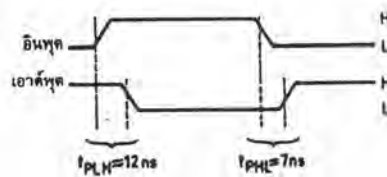
ในตารางที่ ค2 แสดงค่าเปรียบเทียบแฟนเอาต์ระหว่างตระกูล TTL และ CMOS ยกตัวอย่างเช่น ในช่องบนสุดทางขวาสุดเขียนว่า 50 หมายถึง เอาต์พุตไอซี TTL มาตรฐาน 1 เอาต์พุตสามารถต่อกับอินพุตของไอซี CMOS ได้ถึง 50 ตัว สำหรับในช่องที่เขียนไว้ว่า 1/2 หมายถึง ถ้านำไอซี CMOS สองตัวมาต่อขนานกันจึงสามารถจ่ายกระแสให้ TTL ธรรมดาได้หนึ่งตัว



รูปที่ ค5 (ก) การเชื่อมต่อ ไอซี LSTTL กับ TTL มาตรฐาน

(ข) คุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของไอซี LS-TTL และ TTL มาตรฐาน

การหน่วงเวลา



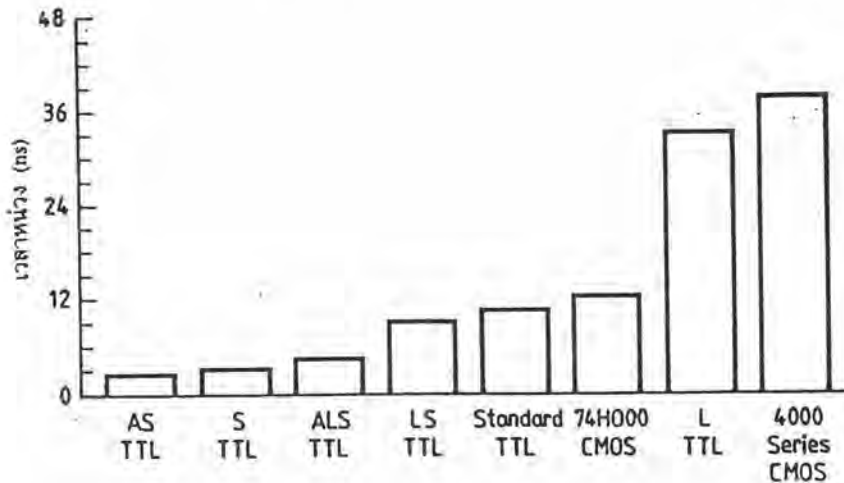
รูปที่ ค6 แสดงรูปคลื่นเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เกต TTL ที่มีผลจากเวลาหน่วง

ความเร็วต่อการตอบสนองต่ออินพุตของไอซีดิจิทัลมีความสำคัญมากในงานออกแบบ วงจรที่ต้องการความเร็วสูง พิจารณาในรูปที่ ค6 รูปบน ซึ่งเป็นลอจิกอินพุตที่เปลี่ยนจากลอจิก “0” ไปเป็น “1” และเปลี่ยนจาก “1” เป็น “0” ส่วนในรูปล่างเป็นการตอบสนองที่เอาต์พุตของเกตนั้น สังเกตดูจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงทางเอาต์พุตจะล่าช้าไปจากการเปลี่ยนแปลงทางอินพุตชั่วระยะเวลาหนึ่ง เรียกช่วงเวลานี้ว่า ค่าเวลาหน่วง (propagation delay) ของเกต มีหน่วยเป็น นาโนวินาที (ns)

ค่าเวลาหน่วงของไอซี TTL เช่น ไอซีเบอร์ 7404 เป็นอินเวอร์เตอร์เกตจะมีค่าเวลาหน่วง 12 นาโนวินาที เมื่ออินพุตเปลี่ยนจากลอจิก “0” ไปเป็นลอจิก “1” และมีค่า 7 นาโนวินาทีเมื่ออินพุตเปลี่ยนจากลอจิก “1” ไปเป็นลอจิก “0”

เราสามารถสรุปค่าเวลาหน่วงของไอซีตระกูลต่าง ๆ ได้ดังกราฟที่แสดงในรูปที่ ค7 จะเห็นว่า ไอซีอนุกรม ASTTL มีค่าเวลาหน่วงต่ำที่สุด นั่นแสดงว่ามีความเร็วในการทำงานสูงสุด และไอซี

อนุกรม 4000 ในตระกูล CMOS จะมีความเร็วในการทำงานต่ำที่สุด ซึ่งโดยทั่วไปแล้วไอซี TTL จะมีความเร็วในการทำงานสูงกว่าไอซี CMOS แต่ไอซี CMOS อนุกรม 74HC00 ก็มีความเร็วในการทำงานที่พอจะเป็นคู่แข่งกับไอซี TTL ได้เช่นกัน



รูปที่ ค7 กราฟสรุปค่าเวลาหน่วงของไอซี TTL และ CMOS อนุกรมชนิดต่าง ๆ

การสูญเสียกำลังงาน

โดยทั่วไปค่าเวลาหน่วงที่ลดลง (ความเร็วเพิ่มขึ้น) การแพร่กระจายกำลังงานและความร้อนจะเพิ่มขึ้น เช่น ไอซี TTL ความเร็วสูงอนุกรม ASTTL จะมีการใช้กำลังงานไปประมาณ 19 มิลลิวัตต์ต่อเกตหนึ่งตัว แต่ไอซี CMOS ที่มีความเร็วต่ำจะมีการใช้กำลังงานเพียงเล็กน้อยเท่านั้นคือ ประมาณ 0.01 มิลลิวัตต์ต่อเกตหนึ่งตัว

มีผู้ออกแบบวงจรถิศจิตอลหลายคนบอกว่าไอซี TTL ในอนุกรม ALSTTL มีความเร็วและการใช้กำลังงานที่เหมาะสมกับการใช้งานเป็นอย่างมาก เพราะจะมีกำลังงานสูญเสียเพียงประมาณ 2 มิลลิวัตต์ และมีเวลาหน่วงเพียงประมาณ 4 นาโนวินาที ซึ่งกำลังที่สูญเสียของไอซี TTL อนุกรม ALSTTL จะมีค่าประมาณหนึ่งในห้าของไอซี TTL มาตรฐานเท่านั้นเมื่อทำงานที่ความเร็วใกล้เคียงกัน

ไอซี CMOS

CMOS (Complementary symmetry Metal Oxide Semiconductor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ MOS ทั้ง N แชนเนล และ P แชนเนลต่อร่วมกันในลักษณะของคอมพลิเมนต์ารี ซึ่งมีข้อดีคือ กินกำลังงานต่ำ ความร้อนต่ำ แรงดันเอาต์พุตสวิงได้ในช่วงกว้าง ความสามารถในการจ่ายกระแสหรือแฟนเอาต์ดี ทน

ต่อการรบกวนได้ดี สามารถออกแบบได้ง่ายและมีราคาถูก อีกทั้งยังสามารถใช้งานได้กับแรงดันไฟเลี้ยงในช่วงกว้างคือ ประมาณ 3 ถึง 15 โวลต์

ข้อเสียของไอซี CMOS ก็คือ ความเร็วในการทำงานต่ำกว่าไอซีไบโพลาร์ (TTL) การจับถือไอซี CMOS นั้นต้องระวังในเรื่องไฟฟ้าสถิต (static discharge) และแรงดันชั่วขณะ (transient voltage) ซึ่งแรงดันชั่วขณะนี้จะสามารถทำลายชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความบางมาก ๆ บนชิปได้ ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้จะเป็นไดอิเล็กทริกภายในตัวคาปาซิเตอร์ซึ่งอาจจะทะลุ (short) ได้หากมีแรงดันชั่วขณะค่าสูง ๆ เข้ามา

การที่ไอซี CMOS กินกำลังงานต่ำมากนั้น ทำให้ได้รับความนิยมมากและถูกนำไปใช้งานในอุปกรณ์หรือมือกระเป๋ากว้างขวาง เช่น เครื่องคิดเลข นาฬิกาข้อมือ คอมพิวเตอร์กระเป๋าคือ เป็นต้น

เทคโนโลยีของ CMOS ได้ถูกนำมาผลิตเป็นไอซีดิจิทัลหลายอนุกรมซึ่งได้แก่ อนุกรม 4000, 74C00 และ 74HC00 ในอนุกรม 4000 เป็นอนุกรมที่เก่าแก่ที่สุด มีหน้าที่การทำงานต่าง ๆ มากมายให้เลือกใช้ ซึ่งหน้าที่บางอย่างไม่มีในไอซี TTL เช่น เกตทรานสมิสชัน (transmission gate) หรือพวกสวิตช์ อิเล็กทรอนิกส์ (bilateral switches) เป็นต้น

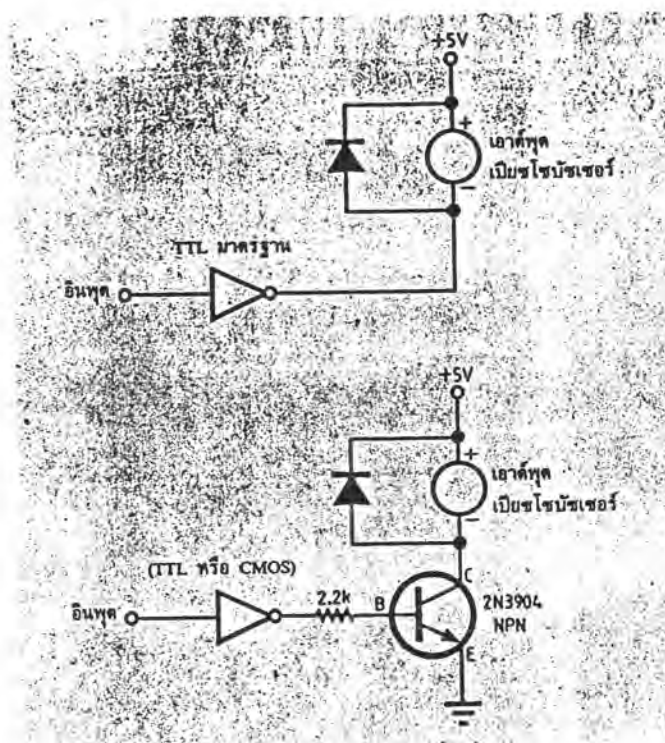
ในอนุกรม 74C00 ของไอซี CMOS ถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อใช้แทนกับไอซี TTL โดยตรง โดยมีขาและหน้าที่ต่าง ๆ เหมือนกัน เช่น ไอซี TTL เบอร์ 7400 ซึ่งเป็นแนนด์เกตสองอินพุต ก็สามารถแทนได้ด้วยไอซี CMOS เบอร์ 74C00 ได้โดยตรง

ส่วนอนุกรม 74HC00 ถูกออกแบบมาเพื่อทดแทนข้อด้อยของไอซี TTL และ CMOS โดยมีหน้าที่การทำงานและตำแหน่งขาต่าง ๆ เหมือนกับไอซี TTL อนุกรม 7400 และไอซี CMOS อนุกรม 4000 เป็นส่วนใหญ่ อนุกรม 74HC00 นี้มีข้อดีคือ มีความสามารถในการจ่ายกระแสได้สูง และทำงานได้ที่แรงดัน 2 ถึง 6 โวลต์

การเชื่อมกับบัชเชอร์ รีเลย์มอเตอร์ และโซลินอยด์

ในส่วนนี้จะเป็นอย่างการเชื่อมต่อวงจรดิจิทัลกับอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น บัชเชอร์ รีเลย์มอเตอร์ และโซลินอยด์

รูปที่ ค8 (ก) เป็นการเชื่อมต่อเปลือยโซบัชเชอร์กับไอซี TTL มาตรฐานโดยตรง การเชื่อมต่อโดยตรงสามารถทำได้เพราะเปลือยโซบัชเชอร์กินกระแสค่าประมาณ 3 ถึง 5 มิลลิแอมป์ ในขณะที่เอาต์พุตของไอซี TTL สามารถจ่ายได้ถึง 16 มิลลิแอมป์ เปลือยโซบัชเชอร์นี้เป็นอุปกรณ์ที่มีขั้วและขณะใช้งานต้องต่อไดโอดขนานไว้ดังรูปด้วย เพื่อป้องกันแรงดันชั่วขณะที่อาจจะย้อนกลับไปยังวงจรได้



รูปที่ ค8 การเชื่อมต่อไอซีลอจิกกับเบี่ยงโซลีนอยด์

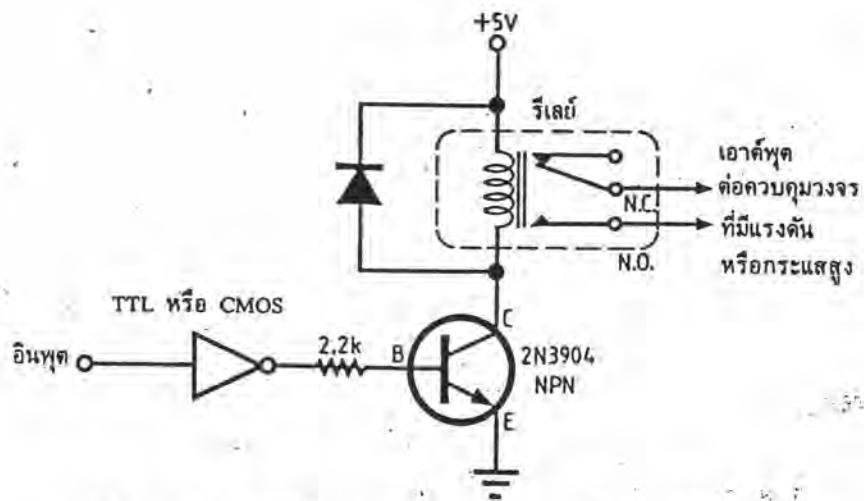
(ก) การเชื่อมต่อ ไอซี TTL กับเบี่ยงโซลีนอยด์โดยตรง

(ข) การเชื่อมต่อ ไอซี TTL หรือ CMOS กับเบี่ยงโซลีนอยด์โดยมีทรานซิสเตอร์เป็นวงจรถับ

สำหรับไอซีลอจิกอนุกรมอื่นจะไม่สามารถจ่ายกระแสให้กับเบี่ยงโซลีนอยด์ได้ จึงจำเป็นต้องใช้วงจรถับซึ่งอาจจะใช้ทรานซิสเตอร์ตามรูปที่ ค8 (ข) ก็ได้ เมื่อเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เกิดเป็น "1" ทรานซิสเตอร์จะทำงานเบี่ยงโซลีนอยด์จะส่งเสียงดัง แต่ถ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เกิดเป็น "0" ทรานซิสเตอร์หยุดทำงานเบี่ยงโซลีนอยด์ก็จะหยุดทำงานด้วย โดยวงจรมีสามารถใช้งานได้ทั้งไอซี TTL และ CMOS ทุกลูก

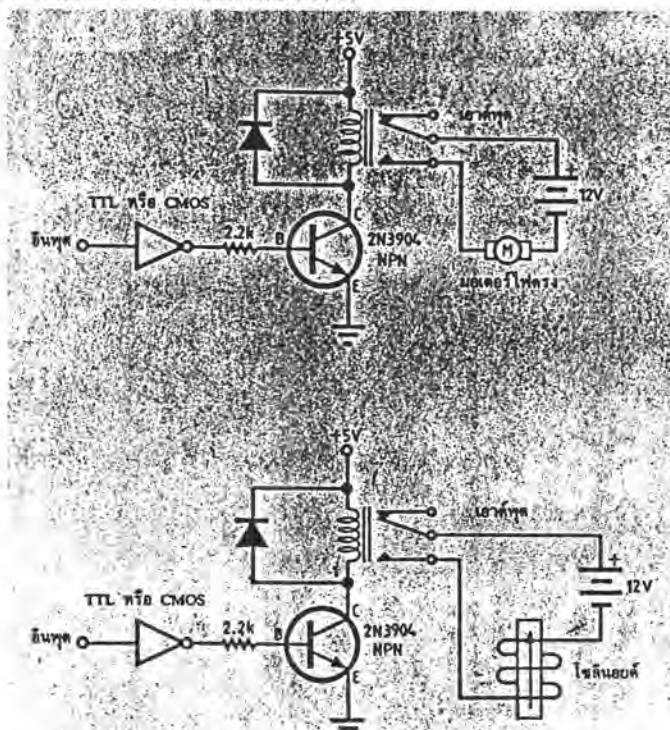
เมื่อจำเป็นต้องต่อวงจรดิจิทัลเข้ากับวงจรที่มีแรงดันหรือกระแสสูง วิธีที่ดีที่สุดคือ การใช้รีเลย์ดังรูปที่ ค9 โดยใช้ได้ทั้งไอซี TTL และ CMOS พิจารณาการทำงานเมื่อเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เกิดเป็น "1" ทรานซิสเตอร์จะทำงานต่อหน้าสัมผัสจาก NC (normally closed) มาต่อที่ NO (normally open) เมื่อเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เกิดเป็น "0" หน้าสัมผัสของรีเลย์ก็จะคืนไปยังตำแหน่ง NC ตาม

เดิม ส่วนไดโอดที่ต่อขนานกับรีเลย์นั้นทำหน้าที่ป้องกันแรงดันย้อนกลับที่เกิดจากขดลวดของรีเลย์ไม่ให้เป็นอันตรายต่อทรานซิสเตอร์ได้



รูปที่ ๙ การใช้รีเลย์ในวงจรดิจิทัล โดยมีทรานซิสเตอร์เป็นวงจรขับ

ตัวอย่างการต่ออุปกรณ์กระแสและแรงดันสูงสุดดังรูปที่ ๑๐ (ก) และ (ข) ซึ่งเป็นอุปกรณ์มอเตอร์ไฟฟ้าและโซลินอยด์ โดยมีรีเลย์เป็นตัวสวิตช์แยกวงจรออกจากกันและเป็นวงจรพื้นฐานที่ใช้งานกันทั่ว ๆ โดยมีการทำงานเหมือนกันทั้งสองวงจร



รูปที่ ๑๐ การใช้รีเลย์ทำหน้าที่แยกระหว่างวงจรดิจิทัลกับวงจรที่มีแรงดันหรือกระแสสูง (ก) เมื่อใช้กับมอเตอร์ไฟฟ้า (ข) เมื่อใช้กับโซลินอยด์

ภาคผนวก ง

ไฟเบอร์ออปติก

ในอนาคตอันใกล้ไฟเบอร์ออปติกจะมีบทบาทอย่างมากในงานสื่อสารต่าง ๆ เช่น ระบบชุมสายโทรศัพท์อิเล็กทรอนิกส์, ระบบการส่งสัญญาณวิดีโอ, การส่งข้อมูลทางคอมพิวเตอร์ ฯลฯ

ข้อได้เปรียบของไฟเบอร์ออปติก

เหตุผลที่ไฟเบอร์ออปติกเริ่มเข้ามามีบทบาทอย่างมากก็เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีของมันสามารถช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ทางด้านการสื่อสารที่เกิดขึ้นอันเนื่องจากการใช้สายตัวนำคู่ธรรมดาหรือสายโคแอกเชียลได้ดี เช่น

- * แแถบความถี่ (bandwidth) กว้างมากขึ้น
- * ขนาดเล็ก และน้ำหนักเบา
- * การสูญเสียในการส่งต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวกลางชนิดอื่น
- * ปราศจากการรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI)
- * แยกระบบไฟฟ้าของภาครับและภาคส่งออกจากกัน
- * ให้ความปลอดภัยกับข้อมูลที่ส่ง
- * ไม่ต้องกลัวอุบัติเหตุจากการระเบิดของอุปกรณ์

การที่ไฟเบอร์ออปติกมีแถบความถี่กว้างก็หมายถึงว่ามีความสามารถในการส่งข้อมูลได้มากในเวลาพร้อม ๆ กันดังตัวอย่างเช่น สามารถส่งสัญญาณวิดีโอได้มากกว่า 1 ช่อง (สัญญาณวิดีโอมีแถบกว้างความถี่ระหว่าง 500 kHz - 10 MHz), สามารถเพิ่มช่องโทรศัพท์ได้มากขึ้น และความเร็วหรืออัตราการส่งข้อมูลในระบบคอมพิวเตอร์สูง ทั้งนี้ถ้าจำนวนช่องที่ส่งมีไม่กี่ช่อง ความเร็วในการส่งจะสูง แต่ถ้าจำนวนช่องที่ส่งมีจำนวนมาก (ส่งแบบขนาน) ความเร็วในการส่งจะลดลง

ไฟเบอร์ออปติกมีลักษณะเป็นเส้นแก้วไฟเบอร์ที่มีขนาดเล็กประมาณเส้นผม และมีน้ำหนักเบา อีกทั้งยังมีการสูญเสียสัญญาณในการส่งต่ำ ดังนั้นเมื่อนำมาใช้กับงานสื่อสารที่ต้องการส่งจำนวนช่องข้อมูลคราวละมาก ๆ จึงเป็นการประหยัดมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สายตัวนำคู่ธรรมดาหรือสายโคแอกเชียล

การรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็เป็นปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่ง ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ เช่น ในกรณีของเครื่องบินรุ่นใหม่ ๆ ที่มีระบบการทำงานส่วนใหญ่เป็นแบบอัตโนมัติ ถูกควบคุมโดยระบบคอมพิวเตอร์ ถ้าสายตัวกลางที่ทำหน้าที่ติดต่อระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ อยู่ใกล้กับ

เครื่องส่งวิทยุ, เรดาร์ หรือมอเตอร์ไฟฟ้า สนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กจากอุปกรณ์เหล่านี้ อาจจะไปยังสายตัวกลาง ทำให้เกิดการส่งข้อมูลที่คลาดเคลื่อน ซึ่งอาจทำให้การทำงานผิดพลาดเกิดอุบัติเหตุได้ ดังนั้นการใช้ไฟเบอร์ออปติกเป็นตัวกลางแทนจะแก้ปัญหานี้ได้

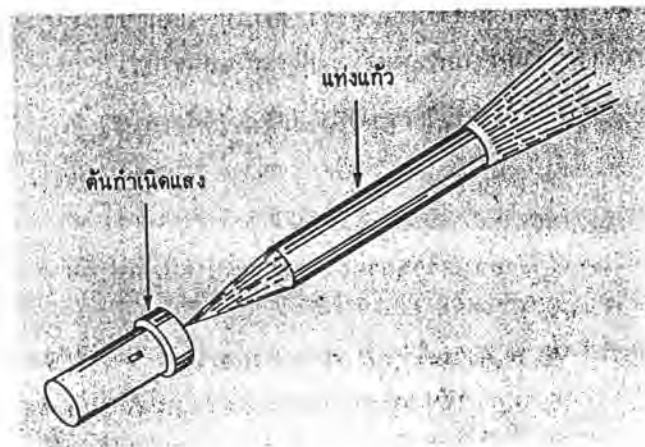
ไฟเบอร์ออปติกยังสามารถแยกระบบไฟฟ้าของภาครับและภาคส่งออกจากกันได้ ประโยชน์ข้อนี้จะเห็นได้ชัด ดังตัวอย่างเช่น ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีอุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ไฟแรงสูง ซึ่งถูกควบคุมโดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ไฟแรงต่ำ ไฟเบอร์ออปติกจะแยกวงจรไฟแรงสูงและไฟแรงต่ำออกจากกัน ทำให้เกิดความปลอดภัยกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์และผู้ใช้

ลำแสงที่ใช้ในไฟเบอร์ออปติกถูกผลิตขึ้นจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ปราศจากน้ำสัมผัส ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะใช้กับระบบควบคุมและสวิตซ์ซึ่ง ในสภาวะแวดล้อมที่เต็มไปด้วยแก๊สหรือไอของสารที่สามารถจะระเบิดได้ เช่นแก๊สธรรมชาติ, ether หรือ cyclo propane ซึ่งถ้าใช้รีเลย์หรือสวิตซ์อาจเกิดประกายไฟเนื่องจากการเปิดที่หน้าสัมผัส แล้วเกิดการระเบิดขึ้นได้

และสุดท้ายไฟเบอร์ออปติกยังสามารถให้ความปลอดภัยกับข้อมูลที่ส่งได้สูง เพราะเป็นการยากต่อการแอบเชื่อมต่อสัญญาณเพื่อขโมยข้อมูล

ความเป็นมา

พื้นฐานสำคัญอย่างหนึ่งของไฟเบอร์ออปติก ก็คือ การแพร่กระจายของลำแสงในตัวกลางที่เป็นแก้วโปร่งใส ดังรูปที่ ๓1 ซึ่งถูกค้นพบโดยไม่ตั้งใจของนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษชื่อ John Tyndall ในปี พ.ศ. 2413 เขาพบว่า แสงที่ถูกส่งออกไปจะมีการสะท้อนกลับภายในทั้งหมด ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับการไหลของน้ำผ่านสายยาง



รูปที่ ๓1 การค้นพบการแพร่กระจายของแสงในแทงแก้วเมื่อร้อยกว่าปีมาแล้ว

ต่อมา J.L.Baird ได้ใช้ท่อแก้วในการส่งข้อมูลของสีในระบบโทรทัศน์สี แต่ก็ไม่มีการนำมาใช้งานจริง ในปี พ.ศ.2509 G.Hockham และ C.Kao ได้พัฒนาการส่งข้อมูลสื่อสารด้วยเส้นใยแก้ว ซึ่งก็ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ เพราะเส้นใยแก้วมีการสูญเสียในการส่งต่ำ

ต่อมาในปี พ.ศ. 2513 บริษัทคอนนิงกลาสจำกัดแห่งสหรัฐอเมริกา ได้ค้นพบกรรมวิธีการผลิตเส้นใยแก้วที่มีการสูญเสียต่ำมาก คือ เพียง 1-2 dB/km จากนั้นก็ได้มีการวิจัยและพัฒนากันอย่างกว้างขวาง จนถึงปัจจุบันนี้เส้นใยแก้วมีการสูญเสียเพียง 0.2 dB/km เท่านั้นจึงเหมาะสมกับการสื่อสารในระยะทางไกลมากขึ้น

ทฤษฎีของแสง

การที่จะศึกษาถึงเทคโนโลยีของไฟเบอร์ออปติกควรที่จะมีพื้นฐานเกี่ยวกับการหักเหและการสะท้อนของแสงเสียก่อน

เริ่มจากดัชนีหักเหแสงของตัวกลาง (n) ซึ่งก็คืออัตราส่วนของความเร็วแสงในสุญญากาศต่อความเร็วของแสงในตัวกลาง (เช่น แก้ว, พลาสติก, น้ำ) ในที่นี้เราจะประมาณความเร็วของแสงในสุญญากาศเท่ากับความเร็วของแสงในอากาศ จากความสัมพันธ์นี้จึงเขียนเป็นสูตรได้ว่า

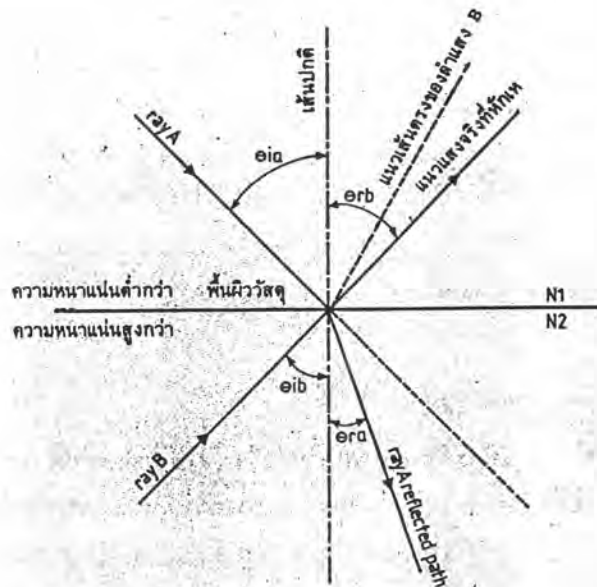
$$n = \frac{C}{V_m} \quad \dots (1)$$

เมื่อ

C = ความเร็วของแสงในสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s

V_m = ความเร็วของแสงในตัวกลาง

ปรากฏการณ์หักเหของแสงจะเกิดขึ้น เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง ($n_1 \neq n_2$) ดังรูปที่ 2 พิจารณารังสี A ซึ่งเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหแสง n_1 ไปยังตัวกลาง n_2 ($n_1 < n_2$) จะเห็นว่ารังสีหักเห--ของ A จะเปลี่ยนทิศทางไปจากเดิม โดยเบนเข้าหาเส้น
 ป ก ดิ ม า ก ชี้



รูปที่ ๓2 ปรากฏการณ์การหักเหของแสง

ในกรณีตรงกันข้าม ถ้าแสงเดินทางจากตัวกลาง n_2 ไปยังตัวกลาง n_1 ($n_2 > n_1$) ดังเช่น รังสี B จะทำให้รังสีหักเหของ B เบนออกจากเส้นปกติมากขึ้น

จากความสัมพันธ์นี้สามารถอธิบายได้โดยกฎของ Snell ดังสูตร

$$n_1 \sin \theta_{ia} = n_2 \sin \theta_{ra} \quad \dots(2)$$

หรือ

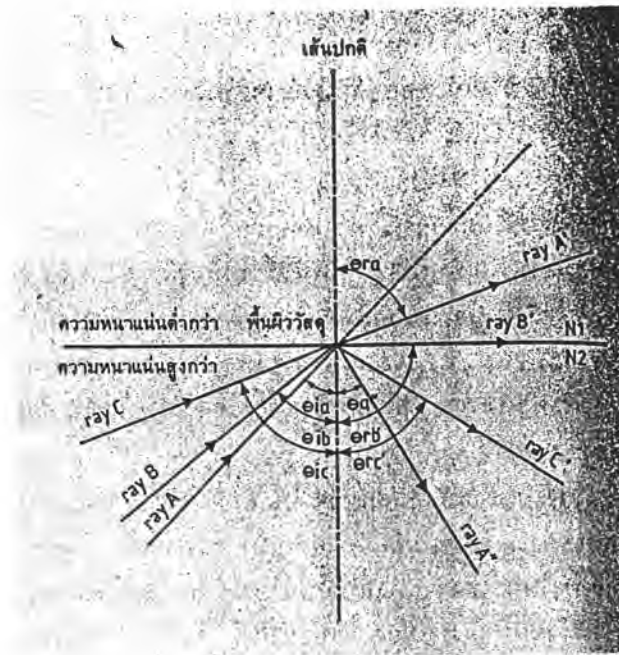
$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_{ra}}{\sin \theta_{ia}} \quad \dots(3)$$

เมื่อ

$$\theta_{ia} = \text{มุมตกกระทบของรังสี A}$$

$$\theta_{ra} = \text{มุมหักเหของรังสี A}$$

สำหรับในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของไฟเบอร์ออปติก ก็คือ เฉพาะในกรณีที่แสงจะต้องเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหแสงมากไปหาน้อยเท่านั้น ดังรูปที่ ๓3 จะแยกเป็น 3 กรณีต่างๆ กัน โดยจะกล่าวถึงรังสี B ก่อน



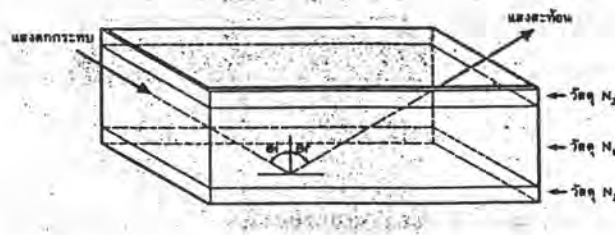
รูปที่ ๓3 การหักเหที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับภายในทั้งหมด

จากรูปจะเห็นว่ารังสีหักเห B จะขนานไปตามผิวของตัวกลาง ในกรณีนี้จะได้ว่ามุมตกกระทบ θ_b เป็นมุมวิกฤตสำหรับรังสี A จะมีมุมตกกระทบน้อยกว่ามุมวิกฤต ดังนั้นรังสีส่วนใหญ่ก็จะเป็นรังสีหักเห A' ทะลุผ่านตัวกลางออกไปจะมีบางส่วนเท่านั้นที่เป็นรังสีสะท้อน A'' ที่สะท้อนกลับออกมาด้วยมุมสะท้อนที่เท่ากับมุมตกกระทบ ส่วนรังสี C จะมีมุมตกกระทบมากกว่ามุมวิกฤต ทำให้ไม่เกิดการหักเหแต่จะเกิดการสะท้อนกลับภายในทั้งหมด (total internal reflection) กรณีของรังสี C ก็คือลักษณะการใช้งานไฟเบอร์ออปติกนั่นเอง

ไฟเบอร์ออปติก

ไฟเบอร์ออปติกมีลักษณะคล้ายกับท่อนำคลื่นไมโครเวฟ ถ้ามีความรู้เกี่ยวกับท่อนำคลื่นมาก่อนก็จะสามารถเข้าใจการทำงานของไฟเบอร์ออปติกได้ง่ายยิ่งขึ้น

รูปแบบอย่างง่ายของไฟเบอร์ออปติก แสดงดังรูปที่ ๓4 จากรูปจะเห็นว่าวัสดุที่มีดรรชนีหักเหแสง n_1 แทรกอยู่ระหว่างวัสดุที่มีดรรชนีหักเห n_2 ซึ่ง n_1 จะมากกว่า n_2 เล็กน้อยภายในก็จะเกิดการสะท้อนกลับภายในทั้งหมดของแสง ระหว่างรอยต่อของวัสดุทั้งสอง ($n_1 - n_2$ และ $n_2 - n_1$) การสะท้อนกลับภายในทั้งหมดนี้จะมีประสิทธิภาพสูงถึง 99.9 เปอร์เซ็นต์ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการสะท้อนของกระจกเงาธรรมดาจะมีเพียง 85-96% เท่านั้น

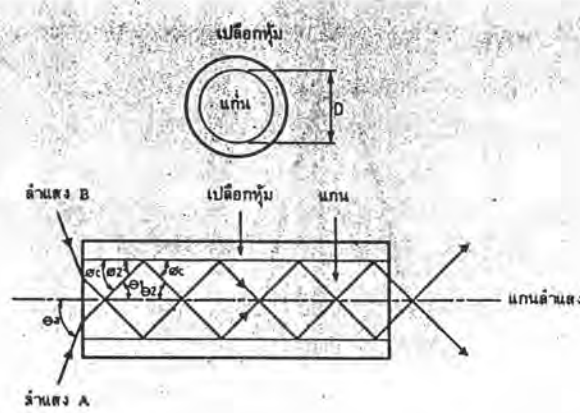


รูปที่ 4 รูปแบบ โครงสร้างอย่างง่ายของไฟเบอร์ออปติก

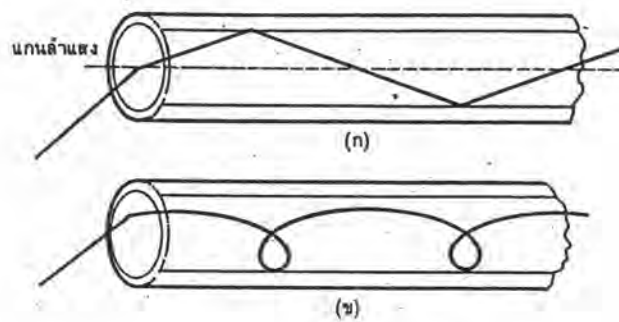
ในการใช้งานจริงของไฟเบอร์ออปติกจะถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นท่อกลมมากกว่าเป็นสี่เหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นแกน (core) มีดัชนีหักเหแสงสม่ำเสมอ n_1 และส่วนที่เปลือกหุ้มแกน (cladding) มีดัชนีหักเหแสง n_2 การแพร่กระจายที่จะเกิดขึ้นในไฟเบอร์ออปติกนี้จะมีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ ลักษณะแรกเป็นแบบซิกแซก (*meridional propagation*) ซึ่งจะมีรังสีไม่มากนักที่เกิดการแพร่กระจายแบบนี้ เพราะรังสีจะต้องตกกระทบที่แกนกลางของไฟเบอร์ออปติก (optical axis) แต่การแพร่กระจายแบบนี้ง่ายต่อการทำความเข้าใจด้วยการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ซึ่งในบทความนี้จะกล่าวถึงแต่ลักษณะนี้เท่านั้น

ลักษณะที่สองเป็นแบบวงก้นหอย (*skew propagation*) การแพร่กระจายแบบนี้ยากต่อการทำความเข้าใจ จึงไม่ขอกล่าวถึง รายละเอียดทั้งหมด ขอให้ดูรูปที่ 6 ประกอบ

การที่จะทำให้เกิดการสะท้อนกลับภายในทั้งหมดขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบของรังสีที่เดินทางจากอากาศ มีดัชนีหักเหแสง n_2 ไปยังแกนของไฟเบอร์ออปติกที่มีดัชนีหักเหแสง n_1 ซึ่งมุมตกกระทบมากที่สุดที่ยังยอมรับได้จะมีค่าเป็น θ_c และเนื่องจากไฟเบอร์ออปติกมีลักษณะเป็นท่อกลม



รูปที่ 5 แสดงหน้าตัดและการแพร่กระจายคลื่นแสง โดยอาศัยการสะท้อนกลับภายในทั้งหมดของไฟเบอร์ออปติก



รูปที่ ๖6 ลักษณะการแพร่กระจายแสงในเส้นใยแสง

(ก) การแพร่กระจายแบบซิก-แซก

(ข) การแพร่กระจายแบบวงก้นหอย

ดังนั้นถ้าเกิดมีรังสีหลาย ๆ รังสีตกกระทบทำมุม θ_a รอบแกนกลางก็จะเกิดเห็นเป็นกรวยขึ้น ซึ่งจะมีปลายกรวยอยู่ที่แกนกลางดังรูปที่ ๖7 ฉะนั้นถ้ารังสีที่ตกกระทบแกนกลางแล้วยังสามารถทำให้เกิดการสะท้อนกลับภายในทั้งหมดได้ จะต้องมีมุมตกกระทบน้อยกว่ามุม θ_a หรือต้องอยู่ในกรวยนั่นเอง

ตัวแปรอันหนึ่งที่จะวัดความสามารถ ในการรวมแสงของไฟเบอร์ออปติก ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของกรวย ก็คือ ตัวเลขอะเพอร์เจอร์ NA (Numerical Aperture) ซึ่งแสดงด้วยสูตร

$$NA = \sin \theta_a \quad \dots(4)$$

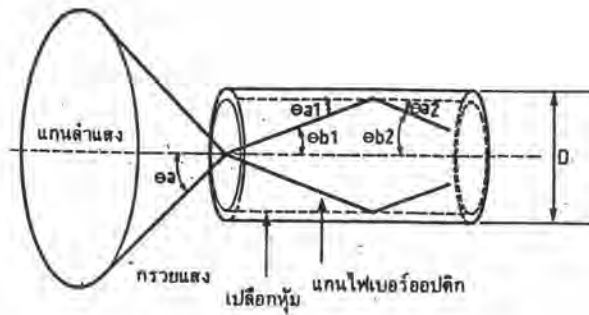
การหาค่า NA ในเทอมของดรรชนีหักเหแสง n_1 , n_2 และ n_3 (ดูรูปที่ ๖7 ประกอบ) พิจารณาจากที่ว่าถ้ารังสีตกกระทบทำมุม จะเกิดมุมวิกฤติภายในไฟเบอร์ออปติกระหว่าง n_1 และ n_2 เขียนเป็นสมการโดยใช้กฎของ Snell ได้ดังนี้

$$n_1 \sin (90^\circ - \theta_{a1}) = n_2 \sin 90^\circ$$

$$n_1 \cos \theta_{a1} = n_2$$

$$\cos \theta_{a1} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\sin \theta_{a1} = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1} \quad \dots(5)$$



รูปที่ 77 กรวยแสงของไฟเบอร์ออปติก

และจากการหักเหที่ n_3 และ n_1 เขียนเป็นสมการตามกฎของ snell ได้

$$n_3 \sin \theta_a = n_1 \sin \theta_{b1}$$

$$n_3 \sin \theta_a = n_1 \sin \theta_{a1} \quad (\theta_{b1} = \theta_{a1}) \quad \dots (6)$$

จาก (4), (5) และ (6) ได้

$$NA = \sin \theta_a = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1} \quad \dots (7)$$

แต่ดรรชนีหักเหแสงของอากาศ $n_3 = 1$ ดังนั้น

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

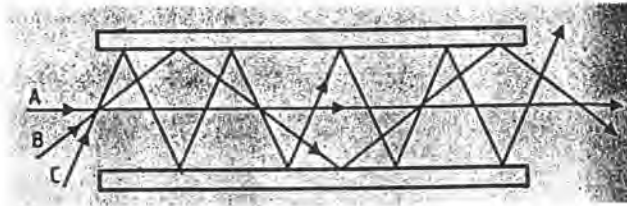
โดยทั่วไปไฟเบอร์ออปติกจะมีตัวเลขอะเพอร์เจอร์ NA อยู่ในช่วง 0.1 - 0.5 และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง D อยู่ในช่วง 25-650 μm ซึ่งถ้าวัดความสามารถในการรวมแสงเมื่อค่านิ่งถึงเส้นผ่านศูนย์กลางด้วย จะได้ตามสมการ

$$\xi = (NA \times D)^2 \quad \dots (9)$$

การกระจายของพัลส์

รังสีของลำแสงหนึ่ง ๆ ที่ถูกส่งเข้าไปในไฟเบอร์ออปติกสามารถที่จะมีทางเดินของแสงได้ต่าง ๆ กัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับมุมของรังสีที่มาถึงไฟเบอร์ออปติก (ดูรูปที่ 78 ประกอบ) ทางเดินของแสงนี้เรียกว่า โหมด (mode) ซึ่งโหมดที่ต่ำที่สุด (low order mode) จะขนานกับแกนกลางของไฟเบอร์

ออปติก (รังสี A) และโหมดที่สูงที่สุด (highest order mode) จะทำให้เกิดมุมวิกฤติในไฟเบอร์ออปติก (รังสี C) และในระหว่างโหมดทั้งสองยังมีโหมดอีกมากมาย ซึ่งแต่ละโหมดนั้นมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นเฉพาะตัว



รูปที่ ๙8 โหมดต่างๆ ของไฟเบอร์ออปติก

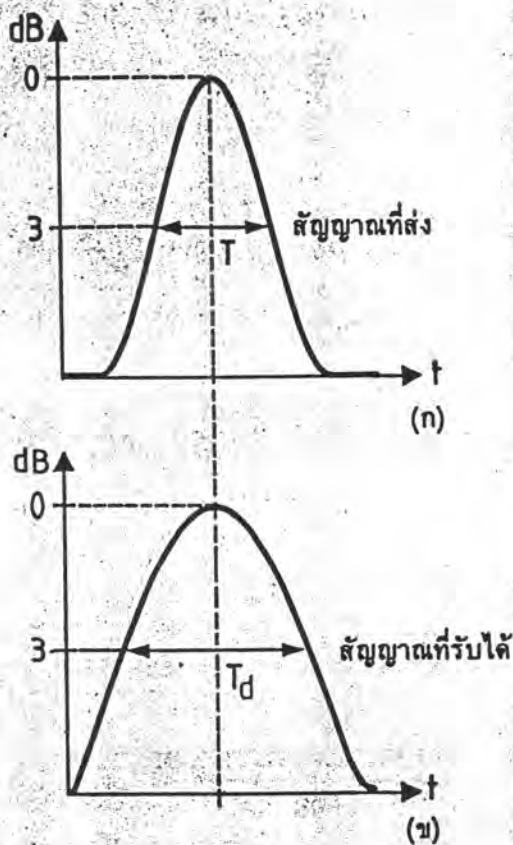
ที่นี้ถ้าจะเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างโหมดต่าง ๆ ในด้านความยาวของทางเดินแสง จะเห็นว่าแต่ละโหมดมีความยาวของทางเดินแสงแตกต่างกัน เช่น โหมดต่ำสุดจะมีความยาวต่ำสุด และโหมดสูงสุดมีความยาวสูงสุด

ถ้าไฟเบอร์ออปติกมีแกนที่มีดัชนีหักเหแสงสม่ำเสมอเพียงชั้นเดียวและมีส่วนที่เป็นเปลือกหุ้มชั้นเดียวเหมือนกันจะเห็นว่าดัชนีหักเหแสงจะเปลี่ยนค่าอย่างทันทีทันใดจากมากไปน้อย ดังเช่นไฟเบอร์ออปติกที่กล่าวถึงในหัวข้อที่แล้วเรียกไฟเบอร์ออปติกชนิดนี้ว่า แบบสเตป (step index fiber) ซึ่งมีจำนวนโหมด (N) ที่สามารถรับได้ตามสมการดังนี้

$$N = \frac{(\pi D [NA] / \lambda)^2}{2} \quad \dots(10)$$

สำหรับไฟเบอร์ออปติกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของแกน (D) มากกว่าความยาวคลื่นที่ส่งประมาณ 10 เท่า (10λ) จะสามารถมีจำนวนโหมดได้เป็นจำนวนมาก ไฟเบอร์ออปติก ชนิดนี้ถ้าแบ่งตามโหมดจะถูกจัดอยู่ในประเภท มัลติโหมด (multimode fiber)

รูปที่ ๙9 อธิบายถึงผลของการกระจายพัลส์ (intermodal dispersion) ที่เกิดขึ้นกับสัญญาณดิจิทัล เนื่องจากผลต่างของเวลาที่ใช้ในการเดินทางแต่ละโหมด รูป ๙9 (ก) เป็นพัลส์ที่ผลิตขึ้นจากแหล่งกำเนิดแสงส่งเข้าไปในไฟเบอร์ออปติกที่มีการกระจายพัลส์สูง ดังนั้นที่เอาต์พุตจึงมีพัลส์ที่กว้างขึ้น ดังรูป ๙9 (ข)



รูปที่ ๑๑ ลักษณะสัญญาณพัลส์

(ก) พัลส์แสงที่อินพุต

(ข) พัลส์แสงที่เอาต์พุต ซึ่งเกิดการกระจายของพัลส์

ถ้าเป็นการส่งข้อมูลที่มีอัตราการส่งต่ำจะไม่มีปัญหาอะไรจากผลของการกระจายพัลส์นี้ แต่ถ้าเป็นการส่งข้อมูลที่มีอัตราเร็วสูง จะทำให้เกิดการเหลื่อมล้ำทับกันระหว่างพัลส์สองลูกที่อยู่ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ ๑๑ ทำให้เกิดความกำกวมและผิดพลาดของข้อมูลที่ส่งขึ้นได้

การหาการกระจายของพัลส์นี้จะเป็นการหาผลต่างของความกว้างพัลส์ที่อินพุต (T) และเอาต์พุต (T_d) ที่ -3 dB (ดูรูปที่ ๑๑ ประกอบ) ดังสมการ

$$\text{Dispersion} = T - T_d \quad \dots(11)$$

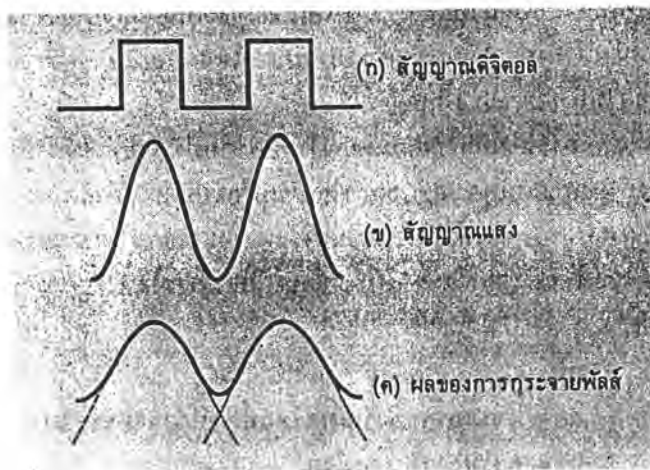
โดยทั่วไปการกระจายของพัลส์จะมีหน่วยเป็น ns/km และแถบความถี่มีหน่วยเป็น MHZ/km ดังนั้นจึงสามารถหาแถบความถี่ของไฟเบอร์ออปติกได้ โดยใช้สมการ

$$B \text{ (M z/km)} = \frac{310}{\text{Disp. (ns/km)}} \quad \dots(12)$$

ค่าดัชนีหักเหของไฟเบอร์

การแก้ปัญหาการกระจายของพัลส์สามารถทำได้ โดยการออกแบบให้ไฟเบอร์ออปติกมีการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหอย่างต่อเนื่อง โดยลดค่าดัชนีหักเหแสงให้น้อยลง เมื่อเพิ่มระยะห่างจากแกนกลางมากขึ้น แต่การที่จะเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหของแสงให้เรียบต่อเนื่องนั้นทำได้ยาก จึงต้องแก้ปัญหาด้วยการเพิ่มจำนวนชั้นของไฟเบอร์ออปติกให้มากขึ้นดังรูปที่ 11 โดยแต่ละชั้นต้องมีค่าดัชนีหักเหแสงเป็นไปตามสมการ

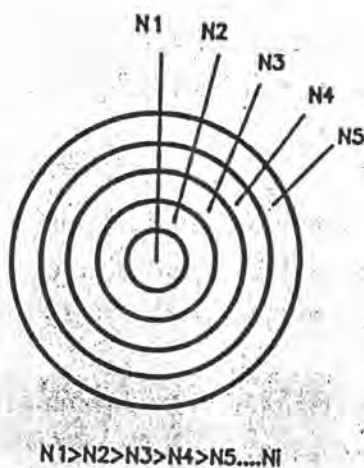
$$n_1 > n_2 > n_3 > n_4 > n_5 > \dots > n_i \dots(13)$$



รูปที่ 10 ผลการกระจายพัลส์ของสัญญาณดิจิทัล

ไฟเบอร์ออปติกชนิดนี้เรียกว่า ไฟเบอร์ชนิดมีดัชนีหักเหลดลงต่อเนื่อง (graded index fiber) ซึ่งจะมีความเร็วในการแพร่กระจายคลื่นแสงในชั้นที่ห่างจากแกนกลางเร็วกว่าชั้นที่อยู่ใกล้แกนกลาง จึงสามารถแก้ปัญหาการกระจายของพัลส์ได้ระดับหนึ่ง และยังทำให้มีแถบกว้างความถี่สูงกว่าแบบสเตป (step index fiber) ด้วย สำหรับจำนวนโหมดของไฟเบอร์ออปติกชนิดนี้จะเป็นไปตามสมการ

$$N = \frac{(\pi D[NA]/\lambda)^2}{2} \dots(14)$$



รูปที่ 11 หน้าตัดของไฟเบอร์แบบครรชนีหักเหลดลงต่อเนื่อง

การแบ่งไฟเบอร์ออกเป็นประเภทตามโหมดนั้น นอกจากจะมีมัลติโหมด แล้วยังมีโมโนโหมด (monomode fiber) อีกด้วยซึ่งแบบหลังจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางสั้นมาก เมื่อเทียบกับแบบแรก คือ มีราว 3-5 μm เส้นผ่านศูนย์กลางของโมโนโหมดหาได้ตามสมการ

$$D = \frac{2.4 \lambda}{\pi [\text{NA}]} \quad \dots(15)$$

ไฟเบอร์แบบโมโนโหมดจะยอมรับเฉพาะโหมดต่ำสุดเพียงโหมดเดียวเท่านั้น ดังนั้นจึงเป็นการลดจำนวนโหมดลงมาผลทำให้การกระจายของพัลส์ลดลงด้วย และด้วยเหตุนี้มันจึงเหมาะที่จะใช้ในระบบที่มีการส่งสัญญาณระยะไกล ๆ และมีอัตราเร็วว่าการส่งข้อมูล

การสูญเสียในสายส่ง

ในระบบไฟเบอร์ออปติกจะใช้หน่วยเดซิเบลในการอ้างถึงอัตราการสูญเสียในแต่ละส่วนประกอบของระบบ โดยทั่วไปแล้วมักกำหนดเป็นเดซิเบลต่อกิโลเมตร (dB/km) เช่น ถ้ามีการสูญเสีย 3 dB/km จะหมายถึงว่า เมื่อแสงเดินทางในไฟเบอร์ออปติกไปแล้ว 1 กิโลเมตร จะเหลือแสงเพียงครึ่งหนึ่งเท่านั้น แต่ในบางครั้งก็อาจมีการใช้หน่วยเป็น เดซิเบล ต่อไมล์ (dB/mi) แทน

การสูญเสียในระบบของไฟเบอร์ออปติกจะทำให้กำลังของแสงที่เอาต์พุต (P_o) ลดลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังแสงที่อินพุต (P_{in}) การลดลงนี้จะเป็นการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลดังรูปที่ 12 (ก) โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_o = P_{in} e^{-\alpha L} \quad \dots(16)$$

เมื่อ

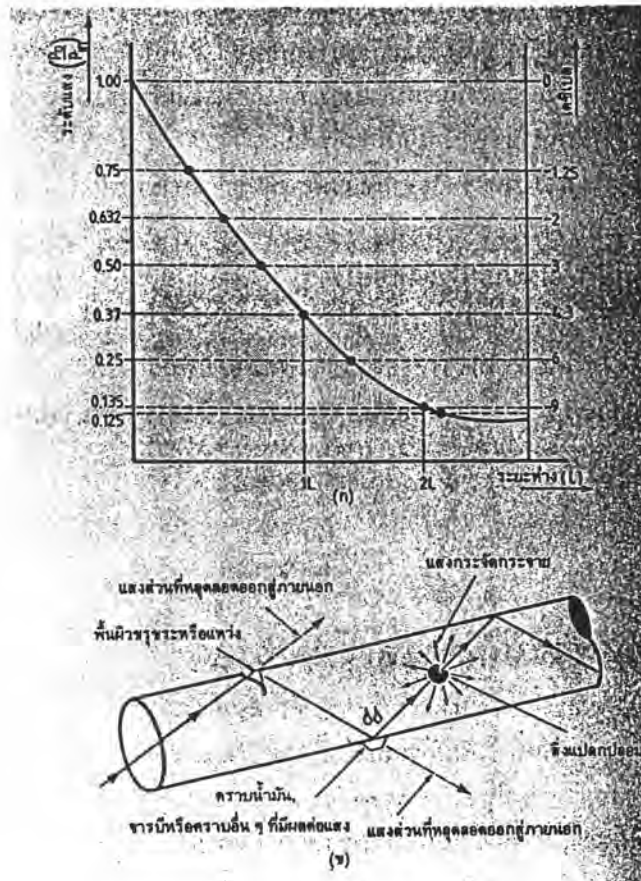
α = ความยาวของไฟเบอร์ออปติกที่กำลังพิจารณา

L = ความยาวหนึ่งหน่วย

การสูญเสียในระบบไฟเบอร์ออปติก สามารถจำแนกได้เป็นหลายหัวข้อ ดังนี้

การสูญเสียเนื่องจากข้อบกพร่องของส่วนประกอบ

จากรูปที่ 12 (ข) จะแสดงหนทางต่างๆ ที่เกิดการสูญเสียเนื่องจากข้อบกพร่องของไฟเบอร์ออปติก โดยเริ่มจากอย่างแรก คือการเกิดข้อบกพร่องที่ผิวหน้าของส่วนที่เป็นเปลือกหุ้ม เช่นรอยแหวนหรือรอยขีดข่วน จะทำให้มีแสงส่วนหนึ่งหลุดลอดออกไปภายนอกได้ ทำให้กำลังของแสงลดลงไป



รูปที่ 12 (ก) กราฟแสดงการลดลงของ P_o เมื่อความยาว (L) เพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล
 (ข) การสูญเสียต่าง ๆ ที่เกิดจากข้อบกพร่องของไฟเบอร์ออปติก

อย่างที่สองคือ มีการเปราะเปื้อนที่ผิวนอกของไฟเบอร์ออปติก เช่น มีคราบของน้ำมันมาเกาะติดอยู่ สิ่งเปราะเปื้อนเหล่านี้ก็จะมีค่าดัชนีหักเหแสงค่าหนึ่ง ซึ่งถ้ามีค่าใกล้เคียงกับดัชนีหักเหแสงของไฟเบอร์ออปติกแล้ว อาจจะทำให้แสงเกิดการหักเหออกมาสู่ภายนอกได้เช่นกัน

และสุดท้ายก็คือ ความบกพร่องอันเนื่องมาจากจุดรอยต่อที่เกิดจากความไม่บริสุทธิ์ของวัสดุที่ใช้ทำไฟเบอร์ออปติกซึ่งเมื่อแสงมาตกกระทบที่จุดเหล่านี้ ก็จะทำให้เกิดการกระจายของแสงในทุกทิศทาง ซึ่งอาจมีทั้งในทิศทางที่เสริมและหักล้างกับแนวรังสีของแสงเดิมก็ได้

การสูญเสียเนื่องจากกฎการแปรผกผันกำลังสองของระยะทาง

ในระบบของแสงจะมีการสูญเสียอย่างหนึ่ง ซึ่งเกิดจากการขยายออกของลำแสง กล่าวคือ สมมติเรามีไฟแฟลชส่องไปที่กำแพง โดยมีระยะห่าง 1 เมตร แล้ววัดความสว่างต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยที่กำแพง ทำซ้ำโดยเพิ่มระยะทางเป็น 2 เมตรแล้ววัดใหม่จะเห็นว่าค่าใหม่นี้จะเหลือเพียง 1/4 เท่าของค่าเดิมเท่านั้น ซึ่งจากตัวอย่างนี้จึงสรุปได้ว่า ความสว่างต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยจะแปรผกผันกับกำลังสองของระยะทาง ($1/d^2$)

การสูญเสียเนื่องจากการส่ง

ในขณะที่แหล่งกำเนิดแสง เช่น LED ส่องแสงเข้าไปยังไฟเบอร์ออปติก จะมีแสงส่วนหนึ่งตกกระทบส่วนที่เป็นเปลือก แสงส่วนนี้จะไม่แพร่กระจายไปในแกนของไฟเบอร์ออปติกแต่จะหักเหออกสู่ภายนอก

การสูญเสียเนื่องจากการดูดกลืน

การสูญเสียแบบนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำไฟเบอร์ออปติก ซึ่งเป็นสัดส่วนผกผันกลับกับความโปร่งใสของวัสดุกล่าวคือ ถ้ายิ่งใสมาก การสูญเสียก็จะน้อยลง และยิ่งขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ในการส่งอีกด้วย แต่จะไม่ขึ้นกับสเปกตรัมของแสง

การสูญเสียเนื่องจากการไม่แมตช์กันของเส้นผ่านศูนย์กลาง

การสูญเสียแบบนี้เกิดขึ้นจากการคับปลิงจากไฟเบอร์ออปติกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ (D_L) ไปยังไฟเบอร์ออปติกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก (D_S) กว่า ซึ่งจะมีค่าเป็นไปตามสมการ

$$\text{loss} = -10 \log \frac{DS}{DL} \text{ dB} \quad \dots(17)$$

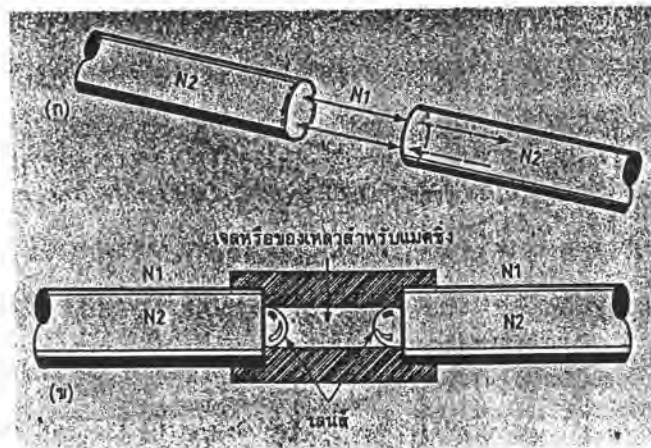
การสูญเสียเนื่องจากการไม่แมตซ์กันของตัวเลข

การสูญเสียแบบนี้เกิดขึ้นจากการคับปลิงจากไฟเบอร์ออปติกที่เป็นตัวส่งมีตัวเลขอะเปอร์เจอร์ NA_T ไปยังไฟเบอร์ออปติกที่เป็นตัวรับมีตัวเลขอะเปอร์เจอร์ NA_R ซึ่งจะมีค่าเป็นไปตามสมการ

$$\text{loss} = -10 \log \frac{NA_R}{NA_T} \text{ dB} \quad \dots(18)$$

การสูญเสียเนื่องจากการคับปลิงผ่านช่องว่างอากาศ

การสูญเสียแบบนี้เกิดขึ้นจากการคับปลิงที่จุดต่อระหว่างไฟเบอร์ออปติกกับช่องว่างที่เป็นอากาศ ดังรูปที่ 13 (ก) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงอย่างมากและทันทีทันใด ถ้านำไปเปรียบเทียบกับสายส่งของระบบวิทยุก็จะเหมือนกับการไม่แมตซ์กันของอิมพีแดนซ์ ซึ่งในสายส่งระบบวิทยุก็จะแก้ปัญหานี้ด้วยการต่ออิมพีแดนซ์แมตซ์ซิ่ง



รูปที่ 13 การสูญเสียและการแก้ไขอันเนื่องมาจากการคับปลิง

- (ก) ช่องต่ออากาศที่ใช้ในการคับปลิงก่อให้เกิดการสูญเสีย
- (ข) การใช้แมตซ์ซิ่งเพื่อลดการสูญเสีย

สำหรับไฟเบอร์ออปติกก็จะมีอุปกรณ์แมตซ์ซึ่งเช่นกันซึ่งมีไว้ใช้ในการแก้ปัญหาการไม่แมตซ์กันของอิมพีแดนซ์แสง (optical impedances) หรืออาจเรียกว่า สัมประสิทธิ์ของการหักเห (coefficient of reflection) ดังรูปที่ 13 (ข)

จากรูปจะเห็นว่ามีการใช้แมตซ์ซึ่งในการคัปปลิงระหว่างไฟเบอร์ออปติก ซึ่งที่ปลายอาจมีเลนส์ติดอยู่หรือไม่ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการของระบบ ภายในแมตซ์ซึ่งจะมีของเหลวซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์หักเหใกล้เคียงกับค่า T ของระบบ ซึ่งจะสามารถลดการสูญเสียลงได้ ค่า T ของระบบหาได้จากสมการ

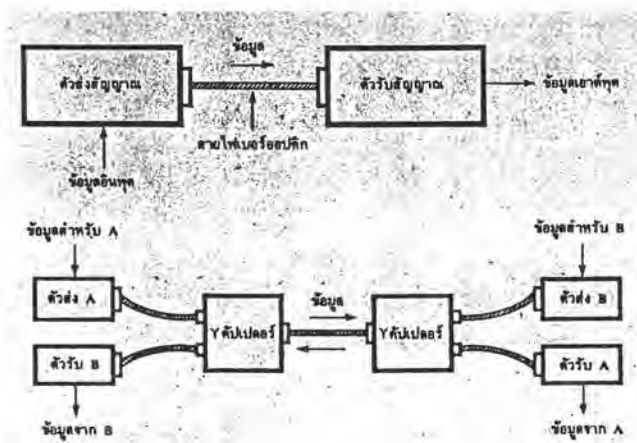
$$T = \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \quad \dots(19)$$

เมื่อ

- T = สัมประสิทธิ์หักเหรวมของระบบ
- P₁ = สัมประสิทธิ์การหักเห
- P₂ = สัมประสิทธิ์การหักเหของตัวส่ง

ระบบสื่อสารไฟเบอร์ออปติก

ในระบบสื่อสารจะประกอบด้วย แหล่งกำเนิดสัญญาณ (เช่น เลเซอร์, ดิโอดเปล่งแสง, สัญญาณอะนาล็อก), เครื่องส่ง, ตัวกลางในการแพร่กระจายคลื่น (ซึ่งก็คือ ไฟเบอร์ออปติก), ปรีแอมป์, เครื่องรับ และเอาต์พุต



รูปที่ 14 การสื่อสารด้วยไฟเบอร์ออปติกแบบต่างๆ

- (ก) ระบบสื่อสารแบบซิมเพล็กซ์
- (ข) ระบบสื่อสารแบบคูเพล็กซ์

ในส่วนของเครื่องส่งเองมีลักษณะแตกต่างกันออกไปตามแต่ชนิดของการมอดูเลตหรือเข้ารหัส ทางเครื่องรับเองก็ต้องมีดีมอดูเลเตอร์หรือตัวถอดรหัส เพื่อแยกเอาสัญญาณที่ต้องการออกมา

รูปที่ ง14 แสดงรูปแบบของการติดต่อสื่อสาร ซึ่งมีอยู่ 2 ระบบใหญ่ๆ คือ ระบบซิมเพล็กซ์ (simplex system) ดังรูปที่ ง14 (ก) มีเครื่องส่งสำหรับส่งข้อมูลในรูปของแสงไฟยังเครื่องรับได้ในทิศทางเดียวเท่านั้น โดยเครื่องรับไม่สามารถที่จะตอบหรือส่งข้อมูลกลับมาได้ ระบบนี้ต้องการเครื่องส่งและเครื่องรับอย่างละ 1 เครื่องต่อ 1 ช่องสัญญาณ

ถัดมาก็คือ ระบบดูเพล็กซ์ (duplex system) ดังรูปที่ ง14 (ข) ซึ่งสามารถที่จะส่งข้อมูลได้ทั้งสองทิศทางในเวลาพร้อม ๆ กัน โดยระบบนี้ต้องการเครื่องรับ, เครื่องส่ง และคัปเปิลเลอร์ (Y-coupler) อย่างละ 1 เครื่อง ที่ปลายทางค้ำหนึ่ง ๆ

นอกจาก 2 ระบบนี้แล้วยังมี ระบบเฮลฟ์ดูเพล็กซ์ (half duplex system) ซึ่งสามารถส่งข้อมูลได้ทั้งสองทิศทางเช่นกันแต่ต้องไม่พร้อมกัน ระบบนี้ไม่เป็นที่สนใจเท่าใดนัก

วงจรภาคขับของเครื่องส่งและวงจรขยายของเครื่องรับ

ก่อนที่จะนำระบบไฟเบอร์ออปติกไปใช้งานทางด้านการสื่อสาร จะต้องหาวงจรที่จะใช้เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้า (ดิจิทัลหรืออะนาลอก) ไปเป็นลำแสง และวงจรที่เปลี่ยนจากลำแสงที่ออกจากไฟเบอร์ออปติกกลับมาเป็นสัญญาณไฟฟ้าเหมือนเดิม ซึ่งวงจรที่ใช้ก็คือ วงจรภาคขับและวงจรภาครับ (driver and receiver preamplifier circuit)

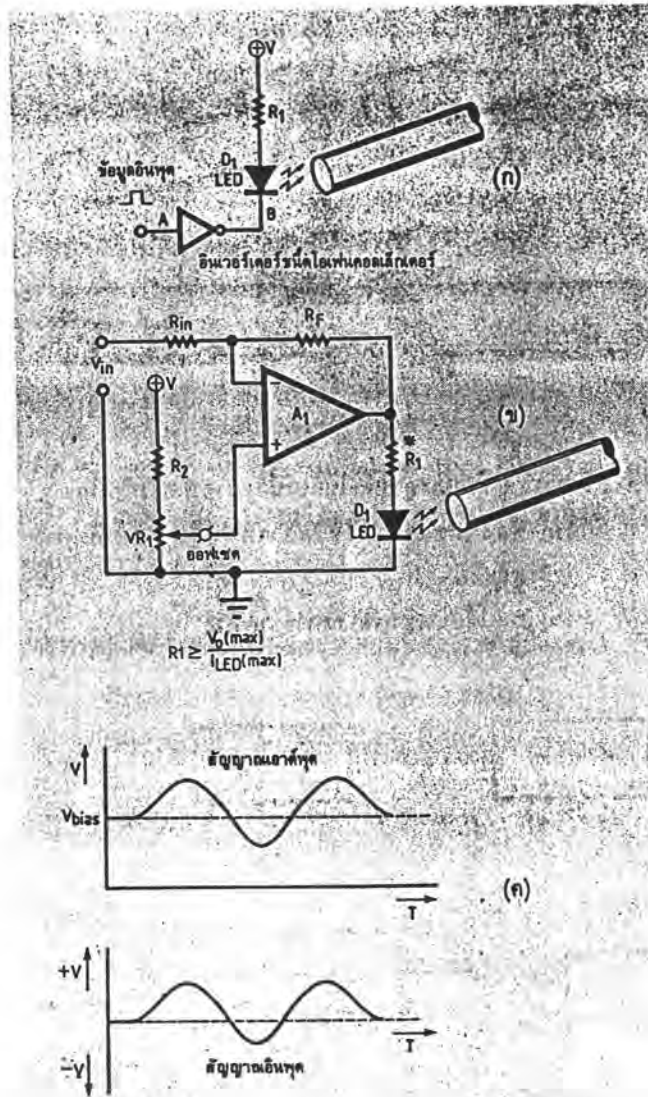
รูปที่ ง15 แสดงวงจรภาคขับของเครื่องส่งทั้ง 2 แบบโดยใช้ LED เป็นแหล่งกำเนิดแสง รูปที่ ง15 (ก) ใช้ในการสื่อสารข้อมูลดิจิทัล ซึ่งสัญญาณดิจิทัลมีเพียง 2 สถานะเท่านั้นคือ “high” กับ “low” หรือ “1” กับ “0” ดังนั้น LED ที่ใช้จึงใช้เพียง on และ off หรือสว่างกับดับ ตามสถานะของสัญญาณดิจิทัลเท่านั้น

จากรูปจะเห็นว่า วงจรประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์แบบคอลเล็กเตอร์เปิด ซึ่งเมื่ออินพุต A เป็น “high” เอาต์พุต B จะเป็น “low” ดังนั้นที่ขั้วแคโทดของ LED จึงเปรียบเสมือนเป็นกราวด์ ทำให้มีกระแสไหลผ่าน LED เกิดลำแสงส่งเข้าไปยังไฟเบอร์ออปติก

เมื่ออินพุต A เป็น “low” เอาต์พุต B ก็จะเป็น “high” LED ก็จะไม่ได้อ่ดลงกราวด์ จึงไม่มีกระแสไหลผ่านตัวมัน ไม่เกิดลำแสงที่จะส่งเข้าไปในไฟเบอร์ออปติก

ความต้านทาน R_1 ใช้ในการกำหนดกระแสที่ไหลผ่าน LED ไม่ให้มีค่ามากเกินไป ซึ่งจากกฎของโอห์มจะหาค่าได้ดังนี้

$$R_1 = \frac{(V+) - 0.7}{I_{\max}} \quad \dots(20)$$



รูปที่ 15 วงจรขับของภาคส่ง

- (ก) ภาคขับของสัญญาณดิจิทัล
- (ข) ภาคขับของสัญญาณอะนาลอก
- (ค) การตั้งระดับแรงดันออฟเซต

รูปที่ 15 (ข) ใช้ในการสื่อสารข้อมูลอะนาลอกจากรูปจะเห็นว่าวงจรประกอบด้วยออปแอมป์เป็นหลัก โดยแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นทางเดินสัญญาณ (signal path) และส่วนที่เป็นตัวปรับออฟเซต (dc offset bias) ซึ่งในส่วนหลังนี้จะต้องตั้งให้แรงดันที่เอาต์พุตทำให้ LED สว่างเพียงครึ่งหนึ่งของความสว่างสูงสุด (โดยตั้ง $V_{in} = 0$ โวลต์) เราจะใช้สัญลักษณ์แทนแรงดันที่วานี้ด้วย V_{bias} ดังรูปที่ 15 (ค)

สาเหตุที่ต้องทำเช่นนี้ก็เพื่อป้องกันการลatching ที่ครั้งไหนที่หลอด LED จะยังสว่างอยู่ แต่ว่าจะสว่างน้อยลงกว่าเดิม ในส่วนของเส้นทางเดินสัญญาณจะจัดเป็นวงจรขยายแบบกลับเฟส โดยมีอัตราขยายเท่ากับ $-R_f$ ดังนั้นถ้าเขียนเป็นสมการรวมทั้งหมดจะได้

$$V_o = \frac{-V_{in} \times R_f}{R_{in}} + V_{i_{in}} \frac{R_f + 1}{R_{in}} \dots(21)$$

แต่เนื่องจาก R_2 กับ VR_1 ต่อเป็นวงจรแบ่งแรงดัน ดังนั้น V_1 จึงเปลี่ยนค่าได้ตั้งแต่ 0 โวลต์ จนถึงค่าสูงสุด ซึ่งจะเป็นไปตามสมการ

$$V_1 = \frac{(V+) \times P_1}{R_2 + VR_1} \dots(22)$$

จากสมการที่ (21) และ (22) จะได้สมการของ $V_{o(max)}$ คือ

$$V_{o(max)} = \frac{-V_{in} \times R_f}{R_{in}} + \frac{(V+) \times VR_1}{R_2 + P_1} \frac{R_f + 1}{R_{in}} \dots(23)$$

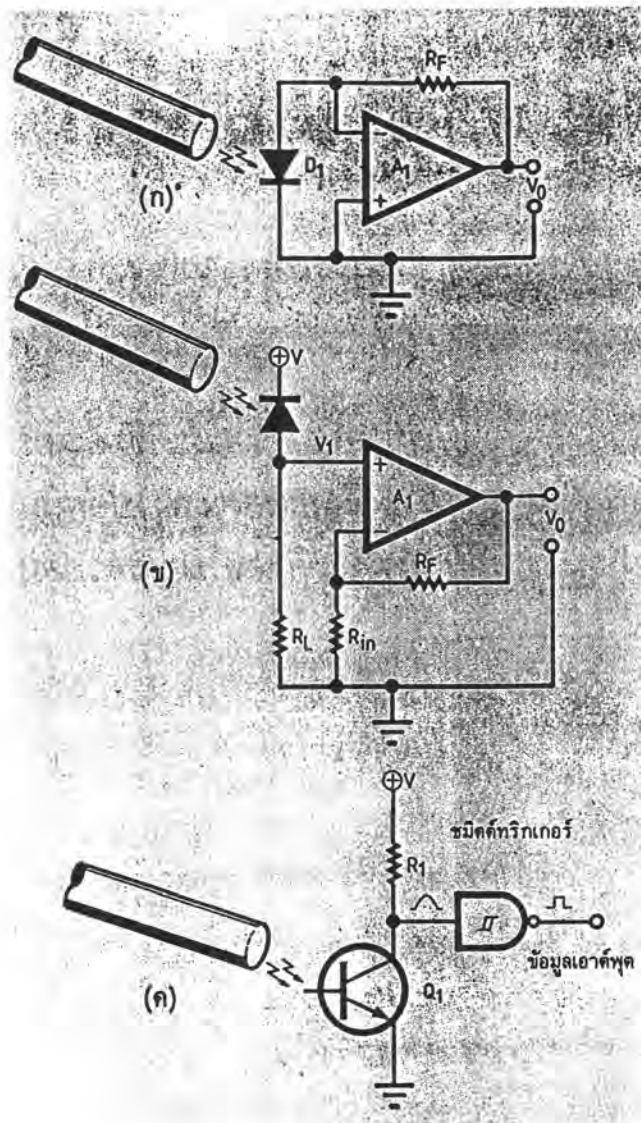
สำหรับวงจรปริแอมป์ของภาครับทั้งสามจะแสดงดังรูปที่ ง16 (ก) และรูปที่ ง16 (ข) จะเป็นวงจรสำหรับสัญญาณอะนาล็อก และรูปที่ ง16 (ค) จะใช้สำหรับสัญญาณดิจิทัล

เครื่องรับสำหรับสัญญาณอะนาล็อกจะใช้อปแอมป์เป็นตัวขยายสัญญาณ และใช้โฟโตไดโอดเป็นตัวรับแสง โดยแสงที่ออกจากไฟเบอร์ออปติกจะตกกระทบบนรอยต่อ p-n ผลิตรกระแส I_0 ขึ้น ค่าของกระแสจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสว่างที่ตกกระทบบนรอยต่อ รูปที่ ง16 (ก) จัดเป็นวงจรขยายแบบกลับเฟส โดยโฟโตไดโอดจะต่อเข้ากับอินเวอร์ตติ้งกับกราวด์ ผลิตรกระแส I_0 ขึ้นไหลผ่าน R_f และเนื่องจากที่ขาอินเวอร์ตติ้งจะมีศักย์ไฟฟ้าเป็น 0 โวลต์ ดังนั้นจึงเขียนสมการของ V_o ได้ดังนี้

$$V_o = (-I_0) \times R_f \dots(24)$$

และรูป (ข) จัดเป็นวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส โดยกระแส I_0 ที่โฟโตไดโอดผลิตขึ้นจะไหลผ่าน R_L เกิดเป็นแรงดันอินพุต V_1 ที่ขาอินเวอร์ตติ้ง ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการของ V_o ได้ดังนี้

$$V_o = I_0 \times R_L \times \frac{R_f}{R_{in}} + 1 \dots(25)$$



รูปที่ 16 วงจรภาครับ

- (ก) ภาครับแบบอินเวอร์ตติ้ง
- (ข) ภาครับแบบนอนอินเวอร์ตติ้ง
- (ค) ภาครับสัญญาณดิจิทัล โดยใช้ขมิตต์ทริกเกอร์

ในกรณีของสัญญาณดิจิทัล การเกิดการกระจายของพัลส์จะทำให้ที่ขอบขาขึ้นและขอบขาลงของพัลส์ไม่เปลี่ยนจาก “low” เป็น “high” หรือ “high” เป็น “low” ในทันทีทันใดแต่ละจะต้องใช้เวลาค่าหนึ่งในการเปลี่ยนระดับ ดังนั้นจึงต้องออกแบบวงจรเป็นดังรูปที่ 16 (ค)

จากรูปจะใช้โฟโตรีสซิสเตอร์เป็นตัวรับแสงแทน และจะต่อเป็นแบบอิมิตเตอร์ร่วมเมื่อมีแสงมาตกกระทบที่ขาเบสทรานซิสเตอร์จะนำกระแสทำให้แรงดันที่ขาคอลเล็กเตอร์ต่ำลงมาก และในทางตรงกันข้ามเมื่อไม่มีแสงมาตกกระทบทรานซิสเตอร์จะคัตออฟทำให้แรงดันที่ขาคอลเล็กเตอร์สูงมากเกือบเท่ากับไฟเลี้ยง ($V+$) ด้วยเหตุนี้จึงเกิดมีสัญญาณออกจากขาคอลเล็กเตอร์ แต่สัญญาณนี้ยังไม่เป็นสัญญาณดิจิทัลที่บริสุทธิ์ จึงต้องผ่านวงจรมัลติไทรกเกอร์ก่อน เพื่อทำให้เป็นสัญญาณดิจิทัลที่บริสุทธิ์

ประวัติผู้เขียน

นายบุญยงค์ จิตวิวรรณะกุล เกิดวันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2511 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า เอกอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2532 และสำเร็จการศึกษาปริญญาโท Master of Science in Electrical Engineering program, Electrical Engineering and Computer Science Department at Union College, New York, U.S.A. in 1997 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2537 ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง วิศวกรไฟฟ้า การไฟฟ้านครหลวง กรุงเทพมหานคร