



การมัลติเพล็กซ์สัญญาณ โดยการแบ่งย่านความยาวคลื่น
WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING



ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2540

ปริญญาโทปีการศึกษา 2540

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

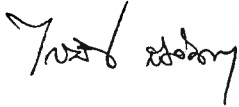
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การมัลติเพล็กซ์โดยการแบ่งย่านความยาวคลื่น

WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING


ผู้จัดทำ

1. นายอภิชาติ สังข์ทอง 38013088



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. ไกรสิน ส่องวัฒนา)



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. ปรีชา ยูทาทิน)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การมัลติเพล็กซ์สัญญาณโดยการแบ่งย่านความยาวคลื่น
WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING

โดย นายอภิชาติ สังข์ทอง

38013088

อาจารย์ที่ปรึกษา ศศ.คร. ไกรสิน ส่วงวัฒนา

บทคัดย่อ

การมัลติเพล็กซ์สัญญาณ โดยการแบ่งย่านความยาวคลื่น เป็นขั้นตอนการวิจัยเพื่อพัฒนาไปพร้อมกับความต้องการทางวิศวกรรมการสื่อสารทางเส้นใยแก้วนำแสง โดยประโยชน์หลักๆ ของระบบนี้ คือสามารถเพิ่มความจุให้กับเส้นใยแก้วนำแสงโดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการติดตั้งมาก สามารถขยายระบบให้มีความยืดหยุ่นสูง และโครงสร้างของระบบเดิมสามารถรองรับอุปกรณ์ที่จะติดตั้งเพิ่มเติมในอนาคตได้ทันที หลักการของการมัลติเพล็กซ์โดยการแบ่งย่านความยาวคลื่นแสง ข้อมูลในแต่ละช่อง (หรือกลุ่มของข้อมูล) จะทำการส่งโดยการมอดูเลตข้อมูลด้วยความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน เนื่องจากการรวมและการแยกแสงมีความซับซ้อน จึงใช้เพียง 2 ความยาวคลื่นเท่านั้นในการมัลติเพล็กซ์ อย่างไรก็ตามในแต่ละความยาวคลื่นสามารถที่จะมอดูเลต กับสัญญาณที่ได้มัลติเพล็กซ์มาก่อน ทำให้ความจุของข้อมูลที่จะส่งเพิ่มมากขึ้น ส่วนการรบกวนระหว่างสัญญาณอินพุตนั้นมีน้อยมาก ระดับพลังงานแสงที่ส่งออกจะเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนของข้อมูล คลื่นแสงที่ถูกมัลติเพล็กซ์ แล้วจะป้อนเข้าสู่เส้นใยแสง ทางด้านรับ แต่ความยาวคลื่นจะถูกแยกออกก่อนโดยฟิลเตอร์ แล้วทำการตีเทค สัญญาณแต่ละช่องออกมา

ABSTRACT

Wavelength Division Multiplexing is past the basic research stage and requires the attention of the optic fiber communication engineering field for its three main advantage : it increases fiber capacity without incurring extra installation costs, its allows for flexible expansion of systems and it provides an evolutionary path for future services no an existing network . In the wavelength division multiplexing approach , each data source (or group of source) is assigned wavelength of transmission. Because of optical mixer complexities, only two wavelengths can be multiplexed presently. However , each wavelength carrier can be used with any of the previous multiplexing schemes. In this way , the data - carrying capacity can be increased many fold. There is little interference between multiplexed input . The total optical power transmitted is increased as the number of data sources increases. This presents problems saturation at receiving optical detector. The different light wavelength are separated before the optical detector by the optical filter. Each wavelength is fed in to a different detector.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|---------------------------------|------|
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ | |
| - ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า | 3 |
| - ทฤษฎีของเรย์-เทรชซิง | 5 |
| - ทฤษฎีโฟตอน | 7 |
| เส้นใยนำแสง | |
| - การป้อนแสงในเส้นใยนำแสง | 8 |
| - การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสง | 10 |
| - โครงสร้างของเส้นใยนำแสง | 12 |
| - คุณสมบัติต่างๆ ของเส้นใยนำแสง | 12 |
| - ดิสเพอร์ชัน | 15 |
| แหล่งกำเนิดแสงในระบบ WDM | |
| - เลเซอร์ไดโอด | 17 |
| - คุณสมบัติของเลเซอร์ไดโอด | 19 |
| - ไฟโอดีทเทคเตอร์ | 20 |
| - พีเอ็นไฟโอดีไดโอด | 21 |
| - พินไฟโอดีไดโอด | 22 |
| - อวาลันซ์ไฟโอดีไดโอด | 23 |
| อุปกรณ์ทางแสง | |
| - เลนส์ | 24 |
| - ปริซึม | 29 |
| - ปริซึมสามเหลี่ยม | 31 |
| - สปลิทเตอร์ | 32 |
| - บีมสปลิทเตอร์แบบสี่เหลี่ยม | 33 |
| - ไฟเบอร์ออปติคัลสปลิตเตอร์ | 34 |
| - ที-คัปเปิลเลอร์ | 34 |
| - พิวส์คัปเปิลเลอร์ | 36 |
| - เอกแพนคัมบ์สปลิทเตอร์ | 37 |
| - สตาร์คัปเปิลเลอร์ | 37 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | หน้า |
|---|------|
| - เกรตติ้งเลี้ยวเบน | 39 |
| ระบบการสื่อสารเส้นใยแสง | |
| - ระบบมัลติเพล็กซ์ | 40 |
| - มอดูเลชัน | 41 |
| - การเข้ารหัสข้อมูล | 44 |
| 1. ข้อมูลดิจิทัล, สัญญาณดิจิทัล | 46 |
| 2. ข้อมูลดิจิทัล, สัญญาณอนาล็อก | 50 |
| 3. ข้อมูลอนาล็อก, สัญญาณอนาล็อก | 55 |
| - สัญญาณแสงและสัญญาณรบกวน | 57 |
| บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง | 58 |
| - แหล่งกำเนิดแสง | 60 |
| - การมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแสง | 60 |
| - การดีมัลติเพล็กซ์ทางแสง | 63 |
| บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง | |
| - ตอนที่ 1 ชุดทดลองที่ใช้ในระบบ WDM | 66 |
| - ตอนที่ 2 การสูญเสียในการมัลติเพล็กซ์แสง | 68 |
| - ตอนที่ 3 การสูญเสียในการดีมัลติเพล็กซ์แสง | 68 |
| บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์การทดลอง | 71 |
| ภาคผนวก | |
| เอกสารอ้างอิง | |

สารบัญรูปลักษณ์

หน้า

| | |
|--|----|
| รูปที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็ก ไฟฟ้า | 3 |
| รูปที่ 2.2 คุณสมบัติของคลื่นแสงเมื่อตกกระทบรอยต่อของสารที่มี ค่าดัชนีหักเหต่างกัน | 6 |
| รูปที่ 2.3 สเปกตรัมของแสงในแต่ละความยาวคลื่น | 6 |
| รูปที่ 2.4 การเลี้ยวเบนของแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ | 7 |
| รูปที่ 2.5 เส้นโซนำแสง | 8 |
| รูปที่ 2.6 มุมในการรับแสง | 9 |
| รูปที่ 2.7 เส้นโซนำแสงแบบสเคปอินเคด | 11 |
| รูปที่ 2.8 เส้นโซนำแสงแบบจีไอ | 11 |
| รูปที่ 2.9 การเดินทางของแสงภายในเส้นโซนำแสง | 15 |
| รูปที่ 2.10 กราฟคุณสมบัติของเลเซอร์ไดโอด | 19 |
| รูปที่ 2.11 กราฟแสดงการสนองต่อความยาวคลื่น | 20 |
| รูปที่ 2.12 แสดงค่า α | 21 |
| รูปที่ 2.13 โครงสร้างของที-เอ็นพีดีไดโอด | 21 |
| รูปที่ 2.14 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮล | 22 |
| รูปที่ 2.15 โครงสร้างของทีนพีดีไดโอด | 22 |
| รูปที่ 2.16 โครงสร้างของ APD | 23 |
| รูปที่ 2.17 เชนส์ | 24 |
| รูปที่ 2.18 แสดงค่าเอฟ-นัมเบอร์ | 25 |
| รูปที่ 2.19 รูปแบบของการรับแสงแบบอินฟินิทคอนจูเกตเรโซ | 26 |
| รูปที่ 2.20 การเกิดสเฟียร์คอลลอเบอร์ชัน | 27 |
| รูปที่ 2.21 รูปแบบการรับแสงแบบยูนิทคอนจูเกตเรโซ | 28 |
| รูปที่ 2.22 ปริซึม | 30 |
| รูปที่ 2.23 มุมวิกฤติในการรับแสงของปริซึม | 30 |
| รูปที่ 2.24 ปริซึมแบบสามเหลี่ยม | 31 |
| รูปที่ 2.25 ปริซึมแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า | 32 |
| รูปที่ 2.26 คุณสมบัติของปริซึมแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า | 32 |
| รูปที่ 2.27 บีมสปลิตเตอร์แบบสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ | 33 |
| รูปที่ 2.28 แสดงลักษณะของทีดีปเปลอร์ | 34 |

| | |
|---|----|
| รูปที่ 2.29 ที-คัปเปิลเลอร์ | 35 |
| รูปที่ 2.30 สคาร์คัปเปิลเลอร์ | 37 |
| รูปที่ 2.31 เกรทติ้งเลี้ยวเบน | 39 |
| รูปที่ 2.32 ระบบมัลติเพล็กซ์โดยการแบ่งย่านความยาวคลื่น | 41 |
| รูปที่ 2.33 การรวมกันของสัญญาณรวมแบบไวท์เกาส์เซียน | 42 |
| รูปที่ 2.34 การเข้ารหัสสัญญาณดิจิทัล | 44 |
| รูปที่ 2.35 รูปแบบการมอดูเลตสัญญาณข้อมูล | 45 |
| รูปที่ 2.36 รูปแบบของการเข้ารหัสสัญญาณแบบต่างๆ | 47 |
| รูปที่ 2.37 การเข้ารหัสของ NRZ | 48 |
| รูปที่ 2.38 การเข้ารหัส RZ | 49 |
| รูปที่ 2.39 การเข้ารหัสโคเฟส | 50 |
| รูปที่ 2.40 ขบวนการพหุคูณเทเลวิชั่นบนสายโทรศัพท์ | 52 |
| รูปที่ 2.41 การมอดูเลตขั้นแบบ PSK | 54 |
| รูปที่ 2.42 รูปแบบการส่งแบบเอเอ็ม | 56 |
| รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบสื่อสารทางแสงโดยวิธี WDM | 58 |
| รูปที่ 3.2 วงจรมอดูเลเตอร์ | 59 |
| รูปที่ 3.3 วงจรดีมอดูเลเตอร์ | 59 |
| รูปที่ 3.4 การมัลติเพล็กซ์โดยใช้บีมสปลิทเตอร์ | 60 |
| รูปที่ 3.5 การมัลติเพล็กซ์โดยใช้บีมสปลิทเตอร์ | 61 |
| รูปที่ 3.6 การทำคัปเปิลเลอร์จากเส้นใยแสง | 61 |
| รูปที่ 3.7 พอร์ทของโคเรชันนอลคัปเปิลเลอร์ | 62 |
| รูปที่ 4.1 ชุดทดลองระบบ WDM | 66 |
| รูปที่ 4.2 การมัลติเพล็กซ์แสง 2 ความยาวคลื่นโดยใช้บีมสปลิทเตอร์ | 66 |
| รูปที่ 4.3 การมัลติเพล็กซ์แสง 2 ความยาวคลื่นโดยใช้คัปเปิลเลอร์ | 67 |
| รูปที่ 4.4 การสูญเสียในการมัลติเพล็กซ์แสง | 67 |
| รูปที่ 4.5 การใช้เกรทติ้งในการมัลติเพล็กซ์แสง | 68 |
| รูปที่ 4.6 การสูญเสียในส่วนของเกรทติ้ง | 68 |
| รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบสัญญาณที่วัดได้ เมื่อผ่านการคิมอด | 69 |
| รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบสัญญาณที่วัดได้ เมื่อผ่านการคิมอด | 70 |

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบัน ระบบการสื่อสารเส้นใยแก้วนำแสงได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการส่งข่าวสารในรูปแบบต่างๆ ทั้งข้อมูล ภาพ และเสียง เนื่องจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีที่พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ความต้องการในการสื่อสารในรูปแบบต่างๆ มีมากขึ้น ระบบโครงข่ายเดิมที่มีอยู่ได้เพิ่มเติมขึ้นเพื่อที่สามารถรองรับการขยายตัวได้ถึงจุดๆ หนึ่งที่ไม่สามารถจะขยายได้อีกเนื่องจากปัญหาทางด้านต่างๆ ได้แก่ ความถี่ใช้งาน ขนาดของระบบที่ใหญ่โต เป็นปัญหาในการควบคุมและการซ่อมบำรุง ในระบบใยแก้วนำแสง ได้นำมาแก้ปัญหาการขาดแคลนความถี่วิทยุ ซึ่งจำเป็นจะต้องจำกัดที่จุดๆ หนึ่ง เนื่องจากไม่สามารถส่งผ่านเคเบิลทองแดงได้ สำหรับการส่งข้อมูลทางแสงนั้นจะแก้ปัญหาในเรื่องแบนด์วิธ ความจุของข้อมูล แบนด์วิธของแสงกว้างพอที่จะส่งสัญญาณได้หลายช่องสัญญาณ หากเป็นช่องสัญญาณ โทรศัพท์แล้ว เมื่อเทียบกับระบบเคเบิลจะดีกว่าเกือบทุกด้าน แม้ว่าระบบการสื่อสารทางแสงจะยังไม่แพร่หลายมาสู่ระบบภายในท้องถิ่น แต่ก็เป็นตัวหลักในการกระจายข่าวสารข้อมูลสู่ท้องถิ่น จุดที่น่าสนใจอย่างหนึ่ง ที่ว่าระบบการสื่อสารทางแสงยังไม่แพร่หลายสำหรับ ในประเทศไทย เนื่องจาก ความเจริญเติบโตทางด้านสื่อสารยังแออัดอยู่แต่ในเมืองเท่านั้น การสื่อสารทางแสงเป็นระบบที่คนในท้องถิ่นไม่ค่อยรู้จัก

การสื่อสารทางแสงเกิดขึ้นมาเนื่องจากสามารถที่จะผลิตตัวกำเนิดคลื่นในย่านความถี่แสงได้ การพัฒนาได้เริ่มจากอยู่ในรูปของแอลอีดี มาถึงแอลอีดีอินฟราเรดความเร็วสูง จนปัจจุบันสามารถที่จะผลิตเลเซอร์ไดโอดที่มีตอบสนองความเร็วสูงถึง 100 จิกะบิตต่อวินาที นอกจากนั้นสามารถที่จะจูนความยาวคลื่นแสงได้ตามต้องการ

ในระบบโครงข่ายท้องถิ่นเช่นระบบแลน ขนาดของข้อมูลและความเร็วในการส่งไม่มากนัก สามารถที่จะใช้แหล่งกำเนิดแสงแบบแอลอีดีควบคู่ไปกับเส้นใยแก้วแบบมัลติโหมด เนื่องจากที่ความเร็วต่ำ ความเพี้ยนทางโหมดจะไม่มีผลเท่าใดนัก เช่นที่ความเร็ว 1 เมกะบิตต่อวินาที แต่ถ้าเป็นระบบที่มีความจุสูงนั้นคือจะต้องมีความเร็วสูงด้วยเพื่อไม่ให้ความล่าช้าของข้อมูล แหล่งกำเนิดแสงแบบเลเซอร์ไดโอดจึงจำเป็นต้องนำมาใช้ในระบบ อย่างเช่น ระบบแวน โครงข่ายที่เชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต

การที่จะใช้ตัวกำเนิดแสงและเส้นใยแสงในระบบโครงข่ายใดๆนั้นจะต้องให้มีความเหมาะสมมากที่สุด คำว่าเหมาะสมมากที่สุดนั้นหมายถึง จะต้องเป็นการลงทุนที่คุ้มค่าที่สุด เป็นระบบที่มีขนาดพอเหมาะกับข้อมูล สามารถจุข้อมูลได้เพียงพอ โดยจะต้องมีความสอดคล้องกันระหว่างองค์ประกอบสามตัวคือ ข้อมูล แหล่งกำเนิด และ ระบบสายส่ง

แม้ว่าในปัจจุบันระบบการสื่อสารทางแสงจะรองรับการสื่อสารได้เพียงพอ แต่นั่นไม่ใช่หมายความว่า จะหยุดการพัฒนาเพียงแค่นั้น เราจำเป็นต้องพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อรองรับระบบการสื่อสารในอนาคตต่อไปอีก ซึ่งแน่นอนว่า มีความต้องการติดต่อสื่อสารกันมากขึ้น จึงมีแนวความคิดว่า ทำอย่างไรจึงจะลดจำนวนการติดตั้งสายสาขาในอัตราที่น้อยลงเพื่อไม่ให้ระบบเคเบิลใหญ่โตจนเกินไป ทำอย่างไรจึงจะนำระบบที่มีอยู่มาใช้ประโยชน์ให้คุ้มค่าที่สุดเพื่อที่จะลดต้นทุนในการติดตั้ง และทำอย่างไรจึงจะทำให้ระบบมีความยืดหยุ่น

หมด แนวความคิดเหล่านี้ จึงเป็นที่มาของระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณ โดยการแข่งขันความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณ โดยการแบ่งย่านความยาวคลื่น ได้นำหลักการของระบบ FDM เข้ามาใช้ จากคุณสมบัติของคลื่นวิทยุ ช่องสัญญาณที่ส่งไปในเส้นทางเดียวกัน ถ้าหากทำการมอดูเลตกับความถี่คนละความถี่แล้ว จะไม่มีการกวนกัน เมื่อปลายทางจุนความถี่ให้ตรงกับด้านส่งก็สามารถที่จะดึงสัญญาณกลับคืนมาได้

แต่ในส่วนของย่านความถี่แสงจะมีความซับซ้อนมากกว่า ทั้งอุปกรณ์ ลักษณะการทำงานของแต่ละอุปกรณ์ ตัวกำเนิดแสงจะทำหน้าที่คล้ายกับออสซิลเลเตอร์ในเครื่องส่งของระบบ FDM โดยผลิตความถี่แสงในรูปแบบของความยาวคลื่นที่ต้องการ ในส่วนของการมัลติเพล็กซ์ ระบบ FDM จะส่งสัญญาณไปในเส้นทางเดียวกัน โดยมอดูเลตกับความถี่ที่สูงกว่าโดยให้ครอบคลุมแบนด์วิธของสัญญาณ ในระบบ WDM จะใช้หลักการผสมสามารถรองรับการเจริญเติบโตของระบบการสื่อสารในอนาคต โดยไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนอุปกรณ์ที่มีอยู่เดิมทั้งแสงเข้าด้วยกัน เนื่องจากให้แสงที่มัลติเพล็กซ์กันอยู่คนละความยาวคลื่น ดังนั้นสามารถที่จะส่งไปในตัวกลางตัวเดียวกันได้ โดยไม่มีการกวนกัน การมัลติเพล็กซ์สัญญาณ ไม่จำเป็นต้องอีกความยาวคลื่นเข้ามามอดูเลตเหมือนกับ FDM อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการมัลติเพล็กซ์ ที่เรียกว่าอุปกรณ์ทางแสง ได้แก่ บีมสปลิตเตอร์ (Beamsplitter) แทปเปอร์ (Taper) ไครเรชันเนลคัปเปิลเลอร์ (Directional Coupler) และ สตาร์คัปเปิลเลอร์ (Star Coupler) การสื่อสารในปัจจุบัน สตาร์คัปเปิลเลอร์ถูกใช้ในการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณ ซึ่งสามารถรองรับได้ถึงร้อยช่องสัญญาณแสง การมัลติเพล็กซ์สามารถที่จะส่งสัญญาณแสงไปในเส้นใยแก้วเพียงเส้นเดียว ด้านรับจะมีหน้าที่กลับกันกับด้านส่งแต่ใช้อุปกรณ์เดียวกัน

ในส่วนของ การแยกสัญญาณแบบแบนด์กลับคืนมานั้น ในระบบ FDM จะสร้าง โลกอล ออสซิลเลเตอร์ ที่ตรงกับความถี่ส่งเพื่อดึงสัญญาณกลับคืนมา แต่ในระบบ WDM จะใช้หลักการดีเทคความยาวคลื่นแสงที่ตรงกับด้านส่งแล้วเปลี่ยนเป็นกระแสสัญญาณแล้วเข้าวงจรขยายทางอิเล็กทรอนิกส์จะได้สัญญาณกลับคืนมา

ระบบ WDM จึงสามารถที่จะสรุปได้ว่าสามารถที่จะตอบสนองต่อแนวความคิดทั้งสามข้อได้เป็นอย่างดี นั่นคือ

1. สามารถเพิ่มความจุให้กับเส้นใยแสงได้เพิ่มขึ้น
2. ลดต้นทุนในการติดตั้งเพิ่มเติม
3. เป็นระบบที่มีความยืดหยุ่น สามารถรองรับอุปกรณ์การสื่อสารในอนาคต โดยใช้ระบบเดิมที่มีอยู่

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

ในการสื่อสารทางแสงนั้น จะใช้แนวความคิดพื้นฐานจากระบบการสื่อสารทางความถี่ไมโครเวฟได้แก่ ทฤษฎีเกี่ยวกับคลื่น เช่น องค์ประกอบของคลื่น การเคลื่อนที่ของคลื่น โดยจะหาคลื่นว่าทฤษฎีใหม่ๆเพื่อที่นำคลื่นที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ไมโครเวฟมาใช้งาน นักวิทยาศาสตร์ได้ศึกษาคุณสมบัติของแสงในลักษณะ ต่างๆ แล้วสรุปเป็นทฤษฎี ฉะนั้น ในการที่จะนำเอาทฤษฎีเหล่านี้มาประยุกต์ใช้งาน ในด้านสื่อสารจะต้องคำนึงถึงรูปแบบและสถานะของแสงในเวลานั้น

ทฤษฎีที่ใช้อธิบายเกี่ยวกับแสงมีอยู่หลายวิธี ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและง่ายต่อการพิจารณา ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบการสื่อสารทางแสงได้แก่ ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทฤษฎีของเรย์-เทรซซิ่ง (ray-tracing) และ ทฤษฎีของโฟตอน

ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าซึ่งตั้งฉากกัน ตลอดเส้นทางการเคลื่อนที่ สนามชนิดนี้เรียกว่า ทรานสเวอร์สอิเล็กโตรแมกเนติกฟิลด์ (Transverse Electromagnetic Field) ซึ่งคลื่นจะถูกเหนี่ยวนำโดยกระแสซายน์ (Sine) สนามจะเพิ่ม ลด และเปลี่ยน โพลาริตี (Polarity) ตามเวลา

ปรากฏการณ์ของแสงจำนวนมากสามารถอธิบายได้ด้วยการที่ถือว่า แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ที่มีความถี่สูงมาก และมีความยาวคลื่นสั้นมาก เช่น แสงที่ตาของมนุษย์มองเห็น ได้มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.4 ไมโครเมตร (สีน้ำเงิน) ไปจนถึง 0.7 ไมโครเมตร (สีแดง) ในช่วงความยาวคลื่นนี้หากเดินทางในเส้นใยนำแสงจะมีการสูญเสียสูง แต่จะมีการสูญเสียต่ำลงในช่วงใกล้เคียงกับ 0.85 ไมโครเมตร และในช่วง 1.1 - 1.6 ไมโครเมตร ปัจจุบันในการสื่อสารจะใช้ความยาวคลื่นแสงช่วง 800 นาโนเมตร (วินโดว์ที่1), 1330 นาโนเมตร (วินโดว์ที่2), และ 1500 นาโนเมตร (วินโดว์ที่3) แม้ว่าแสงจะมีความถี่สูงกว่าความถี่ของคลื่นวิทยุ แต่จะมีคุณสมบัติคล้ายกัน และเป็นไปตามกฎเกณฑ์เดียวกัน เช่น ในสุญญากาศคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีความเร็วเท่ากับ 300×10^6 เมตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ระบบการสื่อสารทางแสงจะแตกต่างจากการสื่อสารชนิดอื่นในเรื่องของคลื่นพาหะและตัวกลางในการส่ง ในระบบเอเอ็ม (AM) เมื่อมอดูเลตสัญญาณเบสแบนด์ด้วยคลื่นพาหะ (Carrier) 1 เมกะเฮิร์ต แล้วทางเครื่องรับสามารถที่จะจับความถี่ที่ 1 เมกะเฮิร์ต โดยอยู่ในย่าน 0.5 - 1.6 เมกะเฮิร์ต ครอบคลุมย่าน เอเอ็ม ซึ่งคล้ายกับการส่งในระบบการสื่อสารทางแสง สามารถที่จะรับข้อมูลบนความยาวคลื่นหลักโดยใช้อุปกรณ์ที่ตอบสนองต่อความยาวคลื่นนั้น

ในการใช้สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะถูกควบคุมโดยรัฐบาล การใช้ความถี่ที่เพิ่มขึ้นหรือความยาวคลื่นที่ลดลง (Short wave) สามารถที่จะส่งข้อมูลได้ด้วยอัตราสูง เพราะความถี่ที่ใช้สูงมาก ดังนั้นขนาดของเส้นใยแสงจึงเล็กมาก (10 - 200 ไมโครเมตร) ท่อนำคลื่นมีขนาดสัมพันธ์กับความยาวคลื่น ดังนั้นที่ความยาวคลื่นในช่วง 0.8 - 1.5 ไมโครเมตร ท่อนำคลื่นจึงเล็กมาก แต่ยังคงดีกว่าความยาวคลื่น

โดยทั่วไปแสงประกอบไปด้วยกลุ่มของความถี่ การอธิบายถึงพฤติกรรมของแสงจะต้องใช้พารามิเตอร์ที่ครอบคลุมพฤติกรรมทั้งหมด ซึ่งจะมีผลโดยตรงกับการแพร่กระจายในเส้นใยแสง ถ้าแสงมีความยาวคลื่นเดียวซึ่งเกิดจาก DBF LASER สามารถหาความเร็วในการเคลื่อนที่ได้จากสูตร

$$V_p = \lambda / f$$

V_p คือ ความเร็วแสงในตัวกลางใดๆ

λ คือ ความยาวคลื่นแสง

f คือ ความถี่

แต่การอธิบายในกลุ่มของความถี่จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วแสง กับค่าดัชนีหักเหของแสงเมื่อผ่านตัวกลางชนิดต่างๆ

$$V_p = c / n_1$$

$$n_1 = c / V_p$$

n เป็นค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง โดยจะมีค่าเท่ากับ 1 ในสูญญากาศ และมีค่าน้อยกว่า 1 ในตัวกลางอื่นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ λ ได้ดังนี้

$$\lambda_1 = \lambda / n_1$$

จะได้ค่าดัชนีหักเหแปรผันตามความยาวคลื่น ค่าดัชนีในแต่ละสารจะค่าแตกต่างกันออกไป แสดงดังตาราง

| สาร | ดัชนีหักเห | ความเร็วแสง (กิโลเมตรต่อวินาที) |
|----------|------------|---------------------------------|
| สูญญากาศ | 1.0 | 300,000 |
| อากาศ | 1.003 | 300,000 |
| น้ำ | 1.33 | 225,000 |
| ควอตซ์ | 1.46 | 205,000 |
| แก้ว | 1.5 | 200,000 |

ตารางที่ 1 ค่าดัชนีหักเหของสารชนิดต่างๆ

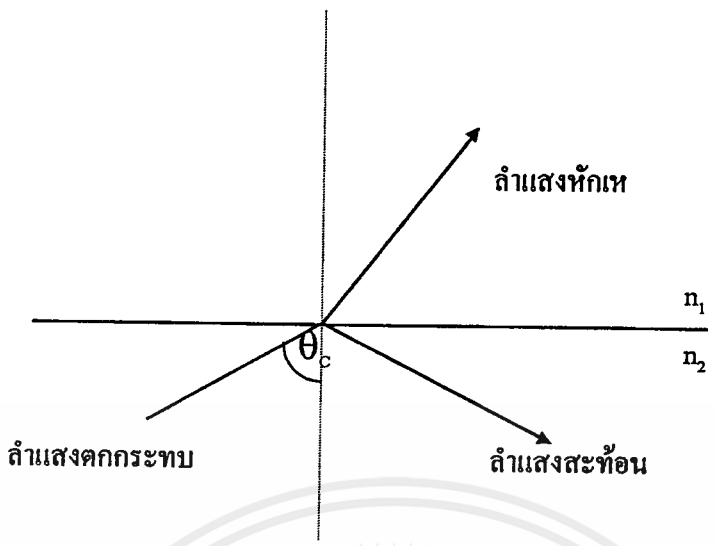
ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารเส้นใยแสง ได้แก่ การเคลื่อนที่ของคลื่นแสงในเส้นใยแสง และการเกิดโหมดต่างๆในเส้นใยแสง

ทฤษฎีของ เรย์-เทรซซิง

เป็นทฤษฎีที่มองแสงในลักษณะของรังสีชนิดหนึ่ง โดยไม่สนใจสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าภายใน ในทฤษฎีนี้จะอธิบายแสงโดยใช้คุณสมบัติ 3 ข้อ คือ

1. แสงเดินทางเป็นเส้นตรง โดยใช้หลักความเป็นจริงเกี่ยวกับความเร็วของแสง และทฤษฎีของเฟอร์มา (FERMA) ซึ่งกล่าวว่า “ ในเส้นทางต่างๆ ที่ต่อระหว่างจุด 2 จุดนั้นแสงจะเดินทางไปบนเส้นทางที่ใช้เวลาน้อยที่สุด” จากคุณสมบัติข้อนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสื่อสารทางแสงในระยะทางสั้นๆ ได้เป็นอย่างดี เช่น ในสนามกีฬาสามารถส่งข้อมูลโดยใช้เลเซอร์โค โอดกำลังสูงยิงผ่านอากาศ ระหว่างสองฝั่งของสนามโดยไม่ต้องเดินสายใยแก้วนำแสง เช่น เลเซอร์โค โอดขนาด 1 มิลลิวัตต์ เส้นใยคือจะส่องไม่ให้มีสิ่งกีดขวาง ซึ่งใช้หลักการเดียวกับเลเซอร์ตรวจวัดอากาศ
2. แสงจะเกิดการหักเหเมื่อผ่านตัวกลาง 2 ชนิดที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน กฎข้อนี้ใช้อธิบายในกรณีแสงเดินทางในเส้นใยแก้วนำแสง
3. แสงจะเกิดการสะท้อนกลับ กฎข้อนี้จะใช้กฎของสเนลล์ (SNELL LAW) ในการอธิบายซึ่งเป็นเงื่อนไขของการทำให้แสงเดินทางไปเฉพาะในเส้นใยแสง

โทเทิลอินเทอนอลรีเฟลคชั่น (Total Internal Reflection)



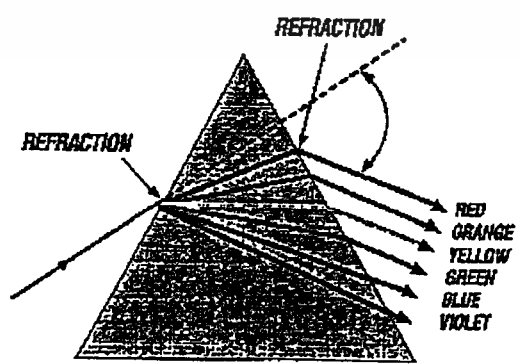
รูปที่ 2.2 คุณสมบัติของแสงเมื่อตกกระทบรอยต่อของสารที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน

เงื่อนไขของการสะท้อนกลับ คือมุมตกกระทบมากกว่ามุมวิกฤติ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง 2 ชนิด

$$\theta_c = \arcsin(n_2/n_1)$$

n_1 และ n_2 เป็นค่าดัชนีหักเหของตัวกลางทั้งสอง เมื่อให้ $n_2 < n_1$ ดังนั้น $n_2/n_1 < 1$ มุม $\theta_c < 90$ องศา เมื่อแสงตกกระทบที่มุมวิกฤติ รังสีหักเหจะเดินทางอยู่ระหว่างขอบเขตไม่ผ่าน n_2 จะไม่มีลำแสงที่ถูกหักเหถ้า $\theta > \theta_c$ นั่นคือคลื่นที่ตกกระทบจะสะท้อนกลับหมด เงื่อนไขนี้เราเรียกว่า เงื่อนไขของการสะท้อนกลับหมด (total internal Reflection) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อผ่านสารที่มี $n_1 > n_2$ เท่านั้น

จากที่กล่าวมาแล้วว่าค่าดัชนีหักเหขึ้นอยู่กั λ ดังนั้นจึงนำมาใช้ประโยชน์ในการรวมและแยกสัญญาณในการสื่อสารทางแสง การหักเหใช้ในการแตกความยาวคลื่นเป็นสเปกตรัมเรียงกัน ดังรูป

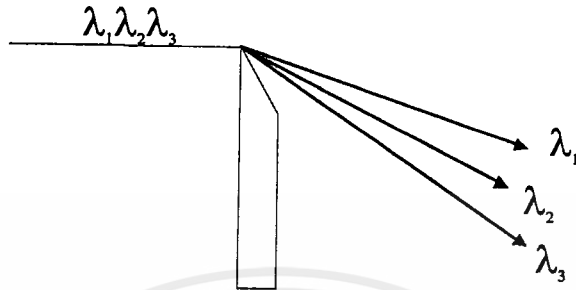


รูปที่ 2.3 สเปกตรัมของแสงในแต่ละความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลี้ยวเบน (DIFFLECTION)

เป็นขบวนการอันหนึ่งที่เป็นสาเหตุให้แสงแตกกระจาย ปรากฏการณ์เลี้ยวเบนถูกใช้ในเรื่องอุปกรณ์ทางแสง เช่น เลเซอร์ไดโอด และเส้นใยแสง การเบี่ยงเบนจะเกิดขึ้นเมื่อแสงถูกกั้นด้วยสารที่แหลมคม มุมเลี้ยวเบนขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นที่ตกกระทบ



รูปที่ 2.4 การเลี้ยวเบนของแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ

ทฤษฎีโฟตอน

แสงประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆที่เรียกว่า โฟตอน คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของโฟตอน คือ

- 1) มีมวลเป็นศูนย์ เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็ว 3×10^8 เมตรต่อวินาที ในอากาศ
- 2) มีประจุไฟฟ้าเป็นศูนย์

พลังงานของโฟตอน 1 ตัว จะมีค่าเท่ากับ

$$E_p = h \times f \quad \text{จูล}$$

E_p คือ พลังงานของโฟตอน

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์มีค่าเท่ากับ 6.625×10^{-34} จูลวินาที

f คือ ความถี่แสง มีหน่วยเป็น เฮิร์ต

การหาพลังงานของโฟตอน โดยอาศัยความสัมพันธ์ของความยาวคลื่น จะได้ว่า

$$E_p = hc / \lambda$$

หน่วยของพลังงานที่นิยมใช้อีกอันหนึ่งก็คือ อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ซึ่งเป็นพลังงานจลน์ที่ถูกเร่งความต่างศักย์ 1 โวลต์ ความสัมพันธ์ระหว่างอิเล็กตรอนโวลต์กับจูล คือ

$$1 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ จูล}$$

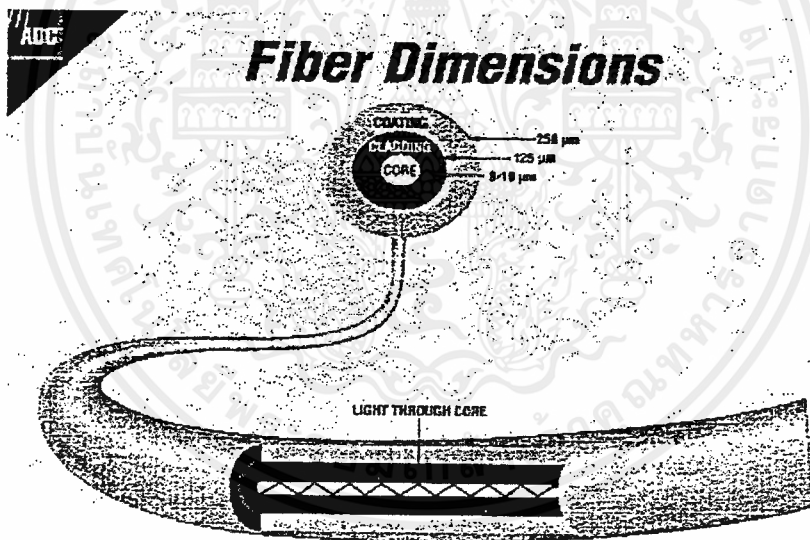
ทฤษฎีโฟตอนที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารเส้นใยแสง ได้แก่ อธิบายการทำงานของอุปกรณ์กำเนิดแสง และอุปกรณ์รับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น จะมีอุปกรณ์และส่วนประกอบของระบบที่คล้ายกับการสื่อสารทางแสงทั่วไป แต่มีอุปกรณ์บางตัวที่เพิ่มเติมเข้าไป และบางอุปกรณ์มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบางอย่าง ก่อนเข้าสู่รายละเอียดของระบบ การมัลติเพล็กซ์โดยการแบ่งย่านความยาวคลื่น จะอธิบายการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบ เพื่ออำนวยความสะดวกในการทำความเข้าใจภายในระบบ รวมถึงการทดสอบความสามารถของตัวอุปกรณ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้มากขึ้น

เส้นใยนำแสง (OPTIC FIBER)

เส้นใยแสงสำหรับการสื่อสารในปัจจุบันได้มีการพัฒนาประสิทธิภาพ จนสามารถลดค่าการสูญเสียเหลือประมาณไม่ถึง 0.1 ดิบิตต่อกิโลเมตร ทำให้ลดจำนวนสถานีทวนสัญญาณได้เป็นจำนวนมาก แม้จะมีการพัฒนาเส้นใยแสงแต่โครงสร้างก็ยังคงเหมือนเดิม คือประกอบไปด้วย ส่วนของแกนกลาง (CORE) และ ส่วนของ แคลด (CLAD) การพัฒนาคุณภาพของเส้นใยแสงคือ การทำให้ค่าดัชนีหักเหของแกนกลาง และ แคลด ตลอดจนความยาวสาย เนื่องจากค่าดัชนีหักเหระหว่าง แกนกลาง กับ แคลด แตกต่างกันน้อยมากประมาณ 0.2 - 3 เปอร์เซ็นต์ สารฉนวนที่นำมาทำจะต้องไม่มีสิ่งเจือปนอื่นที่ไม่ต้องการ ค่าดัชนีหักเหของแกนกลางจะต้องมากกว่าค่าดัชนีหักเหของแคลด เพื่อให้แสงสะท้อนอยู่ภายในเส้นใยแสง



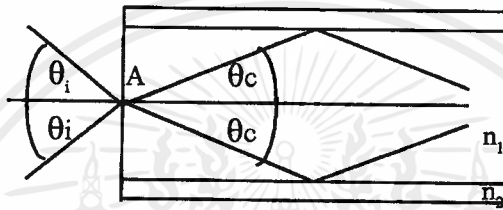
รูปที่ 2.5 เส้นใยนำแสง

การป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยแสง

เนื่องจากแสงที่ปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดนั้น จะกระจายกว้างออกเนื่องจากปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของแสงตาม ในการที่จะป้อนแสงเข้าไปในแกนกลางที่มีขนาดเล็กมากนั้นต้องใช้เลนส์ (LENS) ทำการรวมแสงซึ่งจะได้กล่าวต่อไป แต่ว่าแสงที่รวมนั้นไม่ใช่ว่าจะถูกป้อนเข้าไปในเส้นใยแสงทั้งหมด แสงที่มีมุมตกกระทบที่เหมาะสมเท่านั้นจึงจะเข้าไปในเส้นใยแสงได้ ดังรูป แสดงมุมรับแสงของเส้นใยแสง จุดที่ป้อนแสงเข้าเส้นใยนั้นจะเป็นจุดคอของตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสงต่างกัน 3 ชนิดคือ อากาศ แกนกลางของเส้นใยนำแสง และ แคลด การสื่อสารเป็นเอกสารที่ส่งวนเวียนสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนักผู้ใดเห็นใบเซปรีเอชันดำเนินการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใยแสงและ แคลค ของเส้นใยแสงทำให้ค่าดัชนีหักเหของแสงของตัวกลางทั้ง 3 ชนิดเป็น n_0 ($n_0 = 1$), n_1 และ n_2 ตามลำดับ เกิดการหักเห การสะท้อนกลับของแสงที่รอยต่อของอากาศ กับ แกนกลาง และ แกนกลาง กับ แคลค มุมรับแสงที่มากที่สุดที่ไม่ให้แสงเข้าไปในแคลคเรียกว่า นิวเมอริคอลอเพอเจอร์ (NUMERICAL APERTUR) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยแสง

แสงที่ไม่เป็นเมอร์ดินอล หรือแสงที่ผ่านตัวกลางกลมของเส้นใย โดยพิจารณาในการคำนวณหามุมที่รับได้ หรือ แอคเซปแตนซ์ แองเกิ้ล (ACCEPTANCE ANGLE) และ นิวเมอริคอลอเพอเจอร์ การกระจายของโหมด (PROPAGATION MODE) จะต้องมีน้อยกว่ามุมวิกฤติ ตามรูป เป็น ลำแสงที่มุมวิกฤติที่เข้าไปในเส้นใยมีขนาดเท่ากับ θ_i ไม่เท่ากับ θ_c ที่รอยต่อระหว่าง อากาศซึ่งมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1 และแกนของเส้นใยแสงมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ n_1 แสงที่เข้าไปในเส้นใยจะอยู่ภายในมุม $2\theta_i$ เรียกว่ามุมในการรับแสง



รูปที่ 2.6 มุมในการรับแสง

เมื่อใช้กฎของสเนลล์ที่จุด A จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \sin \theta_i / \sin \theta_c &= n_1 / n_{\text{air}} = n_1 \\ \sin \theta_i &= n_1 \times \sin \theta_c \end{aligned}$$

เทอมของ θ_i เรียกว่า Numerical Aperture N.A.

$$\text{N.A.} = \sin \theta_i = n_1 \times \sin \theta_c$$

จาก

$$\begin{aligned} \cos^2 \theta &= 1 - \sin^2 \theta \\ \text{N.A.} &= (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \\ \theta_i &= \sin^{-1} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \end{aligned}$$

สามารถอธิบายค่านิวเมอริคอลในเทอมของ รีเฟกทีฟ รีเฟรคทีฟ อินเดค ดิฟเฟอเรนซ์ (Relative Refractive Index difference ; Δ) ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / (2 \times n_1^2)$$

$$(N.A.)^2 = (n_1^2 - n_2^2) = 2 \times n_1^2 \times \Delta$$

$$N.A. = n_1 \times (2 \times \Delta)^{1/2}$$

เพื่อความสะดวก จะประมาณค่าดังนี้

$$\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / (2 \times n_1^2)$$

$$= [(n_1 + n_2)(n_1 - n_2)] / (2 \times n_1^2)$$

ให้ n_1 ประมาณเท่ากับ n_2

$$\Delta = [2 \times n_1(n_1 - n_2)] / (2 \times n_1^2)$$

จะได้ว่า

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

การกระจายของโหมด (MODE PROPAGATION)

จากการที่กล่าวมาแล้วว่าแสงเดินทางไปในเส้นใยได้โดยมุมต่ำกว่า θ_c แสงที่เกิดขึ้นที่มุมต่างๆ จะแสดงโหมดของการกระจาย จำนวนโหมดทั้งหมดในเส้นใยเพิ่มขึ้นตาม θ_c ที่เพิ่มขึ้น θ_c ขึ้นอยู่กับ n_2 / n_1 ตามจำนวนของโหมดทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ารีเฟล็กทีฟ รีเฟรคทีฟ อินเดค ดิฟเฟอเรนซ์ $(n_2 - n_1) / n_1$ เพิ่ม ในส่วนของโหมดอันดับสูง แสงจะทะลุเข้าไปในเคลด เป็นพลังงานที่สูญเสีย ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อเส้นใยโค้งงอ

การแบ่งชนิดของเส้นใยแสง

1. แบ่งตามชนิดของฉนวน (DIELECTRIC) ที่ใช้ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ

- 1) เส้นใยแสงแบบแก้วซิลิกา (SILICA GLASS OPTIC FIBER) ซึ่งใช้ฉนวนที่เป็นแก้วซิลิกา
- 2) เส้นใยแสงที่ประกอบด้วยฉนวนหลายชนิด (MULTI COMPONENT OPTIC FIBER) ซึ่งใช้ฉนวนที่เป็นแก้วหลายชนิดปนกัน
- 3) เส้นใยแก้วแบบพลาสติก (PLASTIC OPTIC FIBER) ซึ่งใช้ฉนวนที่เป็นพลาสติก

สำหรับเคเบิลเส้นใยแสงที่ใช้ในการสื่อสารโทรคมนาคม (Telecommunication Network) นั้นนิยมใช้เส้นใยแสงแบบแก้วซิลิกาเพราะมีข้อดีคือ การสูญเสีย (LOSS) ต่ำและคุณสมบัติการส่ง (TRANSMISSION CHARACTERISTICS) คงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

แต่สำหรับงานที่ต้องการส่งคือขงมา ใช้งานง่ายและใช้กับการสื่อสารระยะทางใกล้ ใช้กับการเดินสายในรถยนต์ ในกรณีนี้นิยมใช้เส้นใยแสงที่เป็นแบบพลาสติก

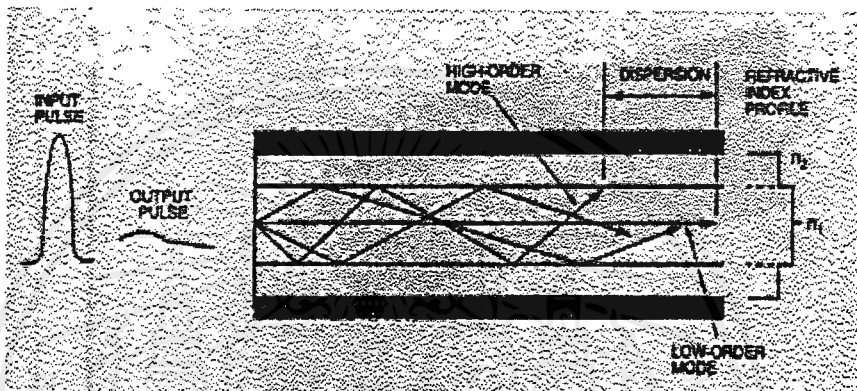
สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. เส้นใยแสงแบบโหมดเดียว (SINGLE MODE OPTIC FIBER ; SM)
2. เส้นใยแสงแบบหลายโหมด (MULTIMODE OPTIC FIBER)

3. แบ่งตามลักษณะของดัชนีการหักเห

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ตามลักษณะของดัชนีการหักเห คือ

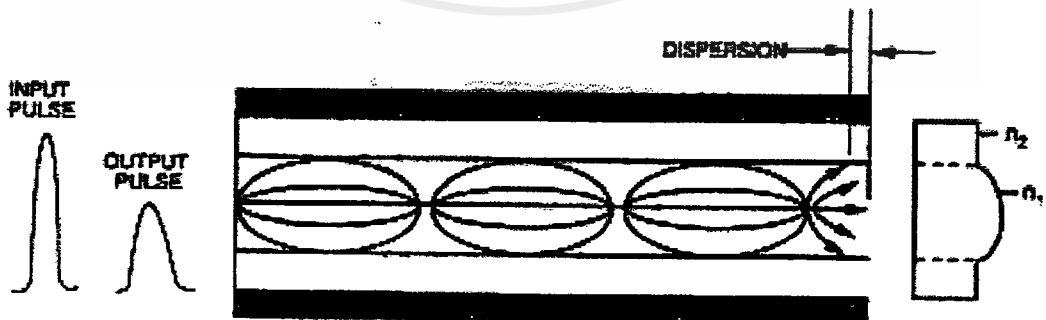
1. สเตปอินเดคคอปติคไฟเบอร์ (STEP INDEX OPTIC FIBER ; SI) เป็นเส้นใยแสงที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหระหว่าง แกน กับ แคลด เป็นลักษณะแบบขั้นบันได (STEP) จึงเรียกว่าเส้นใยแสงแบบสเตปอินเดคค โดยมีลักษณะการเดินทางของแสง ดังรูป



รูปที่ 2.7 เส้นใยนำแสงแบบสเตปอินเดคค

2) เกรดอินเดคคอปติคไฟเบอร์ (GRADED INDEX OPTIC FIBER ; GI) เป็นเส้นใยแสงที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหระหว่างแกน กับ แคลด ของเส้นใยแสงค่อยๆ ลดลงทีละน้อยต่างกับเส้นใยแสงแบบเอสไอ

เส้นใยแสงแบบจีไอ เป็นเส้นใยแสงที่จัดทำเป็นพิเศษ เพื่อการส่งแสงที่มีโหมดการเดินทางแบบหลายโหมด (MULTI MODE) ซึ่งมีการกระจายของโหมด ดังรูป



รูปที่ 2.8 เส้นใยนำแสงแบบจีไอ

จะเห็นว่า ค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแสงแบบจีไอนี้ จะค่อยๆ ลดลงทีละน้อยในแนวรัศมีของเส้นใยแสง ส่วนเส้นใยแสงแบบเอสไอนั้นจัดอยู่ในพวกของเส้นใยแสงแบบเอสไอเหมือนกัน แต่ว่าเนื่องจากจุดประสงค์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการให้เป็น โหมดเดียวจึงทำให้อัตราส่วนผลต่างของค่าดัชนีหักเหของแกน กับ แคลดมีค่าน้อยมาก จึงแบ่ง ชนิดแยกออกไปต่างหาก ดังนั้นในกรณีที่เราเรียกว่าเส้นใยแสงแบบเอสไออนั้น โดยทั่วไปจะหมายถึง เส้นใยที่เป็น มัลติโหมดคอปติคไฟเบอร์ ที่มีผลต่างของดัชนีการหักเหเปลี่ยนแปลงเป็นขั้นบันได

โครงสร้างของเส้นใยแสง

องค์ประกอบพื้นฐานที่กำหนดโครงสร้างของเส้นใยแสงคือ เส้นผ่าศูนย์กลางแกน, เส้นผ่าศูนย์กลางของแคลด, นิวเมอริคอลลอเพอเจอร์ และอื่นๆ องค์ประกอบเหล่านี้เรียกว่า เป็น พารามิเตอร์ทางโครงสร้างของเส้นใยแสง พารามิเตอร์เหล่านี้นอกจากมีผลต่อการสูญเสีย, แบนด์วิธของการส่ง (TRANSMISSION BANDWIDTH), ความแข็งแรงทางเมคานิกส์และคุณสมบัติอื่นๆ ของเส้นใยแสงแล้วยังเป็นองค์ประกอบสำคัญสำหรับการเชื่อมต่อของเส้นใยแสงกับเส้นใยแสง หรือการต่อของเส้นใยแสงกับอุปกรณ์แสง (OPTIC DEVICE) อีกด้วย นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์ประกอบทางโครงสร้างเพิ่มเติมอีกได้แก่ เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของศูนย์กลาง (ECCENTRICITY), อัตราความเพี้ยนของวงกลม (NON - CIRCULAR RATE) สำหรับพารามิเตอร์ประกอบนี้จะไม่มีผลอะไรทางด้านคุณสมบัติการส่ง แต่มันจะมีผลอย่างมากต่อการสูญเสียของการต่อของเส้นใยแสง

ตัวอย่างเช่น ในการกำหนดโครงสร้างของเส้นใยแสงชนิดมัลติโหมด ต้องอาศัยพารามิเตอร์ 4 อันคือ เส้นผ่าศูนย์กลางของแกน, เส้นผ่าศูนย์กลางกลางนอก, นิวเมอริคอลลอเพอเจอร์ และลักษณะของค่าดัชนีหักเห ในการกำหนดค่าต่างๆ ของพารามิเตอร์ ทางโครงสร้างทั้ง 4 เหล่านี้จำเป็นต้องคำนึงถึงผลพารามิเตอร์ทางโครงสร้างแต่ละอัน ที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆ ของเส้นใยแสง การสร้างได้ง่ายและประหยัด

สำหรับโครงสร้างของเส้นใยแสงแบบซิงเกิลโหมด จะกำหนดจากพารามิเตอร์ 3 อัน คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของโหมดฟิลด์ (MODE FIELD), เส้นผ่าศูนย์กลางกลางนอก และ ความยาวคลื่นคัทออฟ (CUT OFF WAVELENGTH) ซึ่งต่างกับกรณีของเส้นใยแสงแบบ มัลติโหมดที่กล่าวมาแล้ว สาเหตุที่ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางของโหมดฟิลด์เป็นพารามิเตอร์ทางโครงสร้างของเส้นใยแสงแบบซิงเกิลโหมดแทนการใช้เส้นผ่าศูนย์กลางของแกนนั้นก็ถือว่า เส้นผ่าศูนย์กลางของโหมดฟิลด์ มีค่ามาก

คุณสมบัติต่างๆ ของเส้นใยแสง

การสูญเสียแสงในเส้นใยแสง

ในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสง มีองค์ประกอบสำคัญ 2 อันที่จะกำหนดความเร็วในการส่ง และระยะห่างของการถ่ายทอสัญญาณ (REPEATER SPAN) องค์ประกอบเหล่านี้คือ การสูญเสียแสงกับแบนด์วิธของการส่ง การสูญเสียแสง (OPTICAL LOSS) เป็นตัวบอกให้ทราบว่ากำลังของแสงที่เดินทางไปในเส้นใยแสงนั้นจะลดลงไปจากเดิมเท่าไร ซึ่งการสูญเสียแสงยังมีค่าน้อยเท่าไรจะทำให้สามารถส่งสัญญาณแสงได้ไกลมากยิ่งขึ้น

การสูญเสียแสง แบ่งออกตามความแตกต่างของโครงสร้างที่เกิดขึ้นได้ เป็นการสูญเสียที่มีอยู่ในตัวของเส้นใยแสงเอง (FIXED LOSS) และการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นมา (ADDITION LOSS) เมื่อนำเส้นใยแสงไปใช้ในระบบการสื่อสาร สาเหตุของการสูญเสียแสงแบ่งออกได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) การสูญเสียแสงที่เกิดจากการดูดแสง (ABSORPTION LOSS)

การสูญเสียแสงที่เกิดจากการดูดแสงนี้เป็นลักษณะทำนองเดียวกันกับมันส์ค่าที่ดูดแสงได้ดี กล่าวคือ สารที่ใช้ผลิตเส้นใยแสงนั้นเป็นตัวดูดแสงที่เดินทางในเส้นใยแสง แล้วเปลี่ยนเป็นการสูญเสียทางความร้อน โดยทั่วไป แล้วจะมีการสูญเสียอื่นเนื่องมาจากแก้วเอง (สารที่ใช้ผลิตเส้นใยแสง) และเนื่องจากสารอื่นที่เจือปน อยู่ในแก้ว (IMPURITY)

สำหรับการสูญเสียจากการดูดแสงของแก้วนั้น มันจะดูดแสงอุลตราไวโอเล็ต (ULTRAVIOLET) กับ แสงอินฟราเรด (INFRARED) การดูดแสงอุลตราไวโอเล็ตนั้นจะดูดมากที่สุดที่ความยาวคลื่นใกล้กับ 0.1 ไมโครเมตร และการดูดแสงอินฟราเรดจะดูดมากที่สุดที่ความยาวคลื่นใกล้กับ 10 ไมโครเมตร ส่วนที่ ความยาวคลื่นอื่นๆ นั้น การสูญเสียจะลดลงอย่างมาก

การสูญเสียจากการดูดแสงอันเนื่องมาจากสารแปลกปลอมปนอยู่นั้น ในตอนแรกที่พัฒนาเส้นใยแสง ใหม่ๆ นั้นปรากฏว่าส่วนใหญ่เป็นไอออน (ION) ของโลหะต่างๆ เช่น ไอออนของเหล็ก, ไอออนของทองแดงและ อื่นๆ แต่ต่อมาเทคนิคในการทำให้การสูญเสียต่ำลงได้ไปมากจนสามารถกำจัดไอออนของโลหะต่างๆ ออกไปได้ ในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็น ไฮดรอกซิลไอออน (HYDROXIL ION) การทำให้การสูญเสียแสงที่มีอยู่ในเส้นใยแสง ให้มีค่าน้อยนั้นเป็นการกำจัดการสูญเสียจากการดูดแสง อันเนื่องมาจากไอออนของโลหะและไฮดรอกซิลไอออน เหล่านี้นั่นเอง ความยาวคลื่นที่มีค่าการสูญเสียแสงน้อยที่สุดเรียกว่าวินโดว (WINDOW) ซึ่งมีความยาวคลื่น เท่ากับ 0.85 ไมโครเมตร, 1.3 ไมโครเมตร และ 1.55 ไมโครเมตร

2) การสูญเสียแสงที่เกิดจากการกระจัดกระจายแสงแบบเรย์ลี (Rayleigh Scattering Loss)

การสูญเสียแบบนี้เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น เมื่อแสงตกไปกระทบกับวัตถุที่มีขนาดใกล้เคียงกับ ความยาวคลื่น แล้วทำให้แสงนั้นแตกออกไปในทิศทางต่างๆ ตัวอย่างของปรากฏการณ์เช่นนี้คือการที่เรามอง เห็นท้องฟ้าสีเงิน, และมองเห็นท้องฟ้าเป็นสีแดงตอนตะวันตกดินนั้น เกิดจากการแตกกระจายของแสง ผู้ที่ทำการอธิบายปรากฏการณ์การแตกกระจายของแสงนี้คือนักฟิสิกส์ชื่อ เรย์ลี (RAYLEIGH) ดังนั้นจึงใช้ชื่อ ของเขาเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า เรย์ลีสแกทเทอริง (RAYLEIGH SCATTERING)

สำหรับการผลิตเส้นใยแสงนั้น ทำได้โดยการให้ความร้อนประมาณ 2,000 องศาแก่แท่งแก้ว จากนั้นดึง แท่งแก้วให้เป็นเส้นใยแสงขนาดเล็ก ในตอนนี้ต้องทำให้เส้นใยแสงนั้นมีอุณหภูมิลดลงจาก 2,000 องศา เป็น อุณหภูมิห้องประมาณ 20 องศาอย่างรวดเร็ว การทำเช่นนี้ทำให้ความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นเกิดขึ้นใน เส้นใยแสง เป็นสาเหตุให้เกิดเรย์ลีสแกทเทอริงขึ้นในเส้นใยแสง จัดเป็นสาเหตุการเกิดการสูญเสียแสงที่หลีกเลี่ยง ไม่ได้ในขั้นตอนการผลิตถือเป็นการสูญเสียที่มีประจำอยู่ในตัวของเส้นใยแสง ขนาดของเรย์ลีสแกทเทอริง จะเป็นสัดส่วนกลับกับความยาวคลื่นแสงยกกำลัง 4 เช่นที่ความยาวคลื่น 1 ไมโครเมตร ค่าการสูญเสียแบบเรย์ลี จะมีค่าประมาณ 1 เดซิเบลต่อกิโลเมตร และความยาวคลื่น 1.6 ไมโครเมตร ค่าการสูญเสียประมาณ 0.1 เดซิเบล ต่อกิโลเมตร

นอกจากนั้นขนาดของเรลีสแกทเทอร์ริง ยังเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิที่ใช้ในคอนแทกการดึงแท่ง PREFORM (PREFORM) ให้เป็นเส้นใยแสง ถ้าหากทำให้อุณหภูมิค่าได้การสูญเสียแบบสแกทเทอร์ริงก็จะน้อยลง ปัจจุบันค่าการสูญเสียนี้ สำหรับเส้นใยแสงแบบเชิงเกล็ด โหมดมีค่าประมาณ 0.001 ดีบีต่อกิโลเมตร

3) การสูญเสียจากการกระจายแสง อันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในเส้นใยแสง (Uniformity Loss)

สำหรับเส้นใยแสงที่สร้างขึ้นมาจริงๆ นั้น จากสาเหตุต่างๆ ในการสร้างทำให้ไม่สามารถได้เส้นใยแสงที่มีลักษณะกลม 100 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้น แกน และ แคลคท์ที่ประกอบกันเป็นเส้นใยแสงก็ไม่สามารถทำให้ได้ลักษณะรูปทรงกระบอกกลมที่สม่ำเสมอได้สมบูรณ์ตลอดเส้นใยแสงได้ กล่าวคือ ตรงรอยต่อระหว่างแกนกับ แคลคท์นั้นไม่สม่ำเสมอตลอด ซึ่งคล้ายถนนขรุขระ เมื่อมีรอยต่อไม่เรียบสม่ำเสมอเช่นนี้จะทำให้เกิดการกระจายของแสงได้ ทำให้แสงบางส่วนไม่สามารถเดินทางไปในแกนได้จะกระจายออกไปข้างนอก ดังนั้นรอยต่อที่ไม่เรียบสม่ำเสมอจะทำให้แสงที่เดินทาง เกิดการสะท้อนกลับอย่างสะเปะสะปะทำให้การสูญเสียแสงเพิ่มขึ้น

4) การสูญเสียจากการกระจายแสงอันเนื่องมาจากการโค้งงอของเส้นใยแสง (BENDING LOSS)

เป็นการสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อเส้นใยแสงถูกทำให้โค้งงอไป หากการโค้งงอทำให้แสงในเส้นใยทำให้แสงทำมุมมากกว่ามุมวิกฤติแล้ว แสงจะกระจายออกไปนอกแกน ทำให้เกิดการสูญเสียขึ้น ดังนั้นในการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสงจะต้องไม่ให้เกิดการโค้งงอของเส้นใยแสงเป็นส่วนโค้งที่มีรัศมีเกินกว่ารัศมีที่ยอมให้งอโค้งได้

5) การสูญเสียที่เกิดจากการโค้งงอแบบไมโครเบนดิง (MICRO BENDING)

เป็นการสูญเสียที่เกิดจากการที่มีแรงกดที่ไม่สม่ำเสมอมากระทำต่อด้านข้างของเส้นใยแสง ทำให้แกนของเส้นใยแสงบิดงอไปเล็กน้อย (ประมาณ 2-3 ไมโครเมตร) เป็นเหตุให้เกิดการสูญเสียเพิ่มขึ้น การสูญเสียนี้เรียกว่าการสูญเสียแบบไมโครเบนดิง ด้วยเหตุนี้ในการออกแบบโค้งงอของเส้นใยแสงจะต้องทำการป้องกันแรงกดจากด้านข้าง เช่นทำชั้น (LAYER) ป้องกันการกระแทกหุ้มเส้นใยแสง เป็นต้น

6) การสูญเสียที่เกิดจากการต่อเส้นใยแสง (CONNECTION LOSS)

การต่อเส้นใยแสงนั้นคล้ายกับการต่อท่อของประปาหรือท่อแก๊ส กล่าวคือต้องต่อเข้ากันอย่างไรไม่ให้ น้ำหรือแก๊สรั่วออกมาได้ กรณีทำการต่อเส้นใยแสง 2 เส้นเข้าด้วยกันนั้น อันดับแรกจำเป็นต้องทำการปรับแกนทั้งสองที่แสงเดินทางให้ตรงกันพอดี ถ้าหากแกนทั้งสองต่อกันไม่สนิทพอดีนั้น แสงที่ออกจากแกนหนึ่ง บางส่วนจะไม่เข้าไปในแกนอีกด้านหนึ่งแต่จะกระจายออกไปข้างนอกทำให้เกิดการสูญเสีย หากตรงรอยต่อเกิดช่องว่างเพียงเล็กน้อยจะเกิดการสะท้อนกลับของแสง ถ้าหากช่องว่างโค้งจะทำให้เกิดการสะท้อนกลับที่เรียกว่า เฟรสเนลรีเฟลคชั่น (FRESNEL REFLECTION)

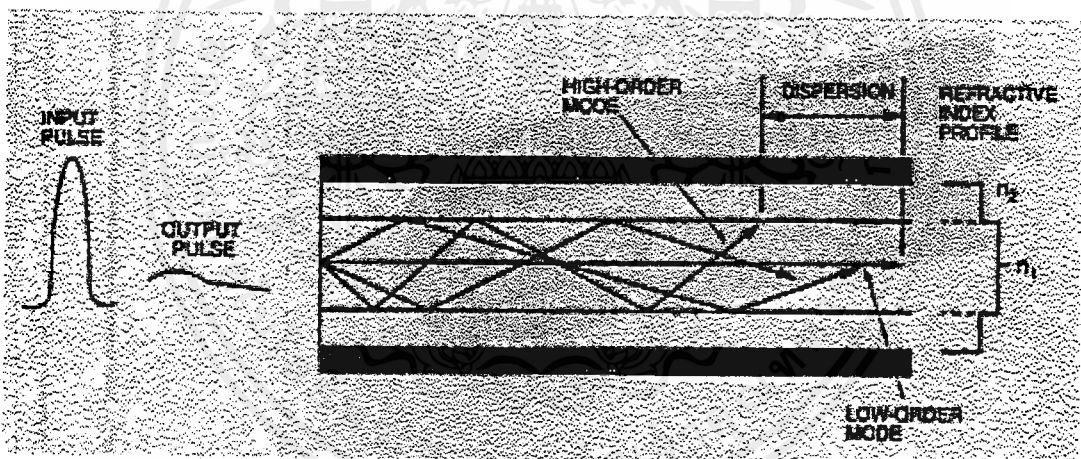
7) การสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างเส้นใยแสง กับอุปกรณ์กำเนิดแสงและอุปกรณ์รับแสง (CLOUPLING LOSS)

แสงที่ปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดแสงนั้นมีเงื่อนไขในการที่จะป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยแสง นั่นก็คือ ค่า นิวเมอริคัลของเอจ กรณีใช้ค้นกำเนิดแสงได้แก่ เลเซอร์ไดโอด หรือ แอลอีดี จะมีความแตกต่างกันทาง ความกว้างของลำแสงที่ปล่อยออกมาจากคั่นกำเนิดแสง ซึ่งเลเซอร์ไดโอดจะมีการสูญเสียน้อยกว่าแม้ว่าจะใช้เลนส์ทำการรวมแสงแล้วก็ตาม นอกจากนั้น โครงสร้างของเส้นใยแสงที่ถูกป้อนแสงเข้าไปนั้น ขนาดของ เส้นผ่าศูนย์กลาง กลางของแกน ของเส้นใยแสงแบบซิงเกิ้ลโหมด และ แบบจีโอจะมีค่าต่างกันทำให้ขนาดการสูญเสียของการเชื่อมต่อแสงมีค่าต่างกันด้วย เส้นใยแสงที่มีค่านิวเมอริคัลมาก นั่นคือแสงที่ออกจากเส้นใยแสงแบบ จีโอ จะมีลำแสงกว้างกว่าลำแสงที่ออกจากเส้นใยแสงแบบซิงเกิ้ลโหมด ทำให้การสูญเสียแสงมีมากกว่า

ดิสเพอร์ชัน (DISPERSION)

1) การขยายกว้างออกของโหมด (MODE DISPERSION)

สำหรับเส้นใยแสงแบบมัลติโหมดนั้น ความเร็วของการเดินทางของแต่ละโหมดภายในเส้นใยแสงจะต่างกัน ดังรูป



รูปที่ 2.9 การเดินทางของแสงภายในเส้นใยนำแสง

เมื่อป้อนพัลส์ที่ถูกผสมแบบพัลส์มอดูเลชัน (PULSE MODULATION) เข้าไปในเส้นใยแสงแบบมัลติโหมดของแสงที่ออกจากปลายอีกด้านหนึ่งของเส้นใยแสง เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับอินพุท จะเห็นว่า ขยายออกกว้างกว่า การที่เกิดขึ้นอย่างนี้นั้นแม้ว่าความยาวคลื่นของคั่นกำเนิดแสงจะเหมือนกันก็ตาม แต่พัลส์ของแสงที่ป้อนเข้าไปนั้นจะแบ่งออกเป็นโหมดต่างๆ ที่มีความเร็วในการเดินทางต่างกัน ดังนั้นในการสื่อสารเส้นใยแสงจึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า โหมดดิสเพอร์ชัน จึงไม่สามารถทำให้ระยะห่างระหว่างพัลส์เล็กมากๆ ได้

ดังนั้นจะเห็นว่าเส้นใยแสงแบบมัลติโหมดนั้น ส่วนใหญ่โหมดดิสเพอร์ชันจะเป็นตัวกำหนดแบนด์วิดท์ แม้ว่าจะพยายามทำให้โหมดดิสเพอร์ชันน้อยลง โดยการทำให้ค่าดัชนีหักเหของแกน เป็นลักษณะพาราโบลาค์ ซึ่งก็คือเส้นใยแสงแบบจีโอแล้วก็ตามแต่เนื่องจากมีขีดจำกัดในความแน่นอนของรูปร่างของค่าดัชนีหักเห ด้วยเหตุนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบการส่งข่าวสารจำนวนมากที่ต้องการคุณสมบัติ แบนด์วิดท์กว้างนั้นจะใช้เส้นใยแสงแบบซิงเกิลโหมด ซึ่งไม่มีโหมดคิสเพอซัน โดยการทำให้มีโหมดเดียว

2) การขยายกว้างออกของความยาวคลื่น (WAVELENGTH DISPERSION)

ในตัวกลางที่มีเนื้อเดียวกัน แต่ถ้าหากความยาวคลื่นต่างกันแล้วค่าดัชนีการหักเหจะต่างกัน เป็นผลทำให้ความเร็วในการเดินทางต่างกับตามค่าความยาวคลื่น ปรากฏการณ์ที่เห็นได้ชัดเกี่ยวข้องกับค่าดัชนีหักเหที่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นคือ การกระจายแสงออกเป็นสีต่างๆ ของปริซึม การเกิดรุ้งกินน้ำ แสงที่ใช้ในการสื่อสารนั้นความจริงแล้วไม่ใช่แสงที่มีความยาวคลื่นเพียงความยาวคลื่นเดียว กล่าวคือมีความยาวคลื่นปนอยู่ด้วยแต่มีค่าน้อยมาก ทำให้เกิดการขยายกว้างออกของความยาวคลื่น ด้วยเหตุนี้ก็จะเกิดความแตกต่างของความเร็วแสงในการเดินทางตามความยาวคลื่นที่ต่างกัน (ความยาวคลื่นยิ่งมีค่ามากเท่าใด ค่าดัชนีหักเหจะน้อยลงเท่านั้น และจะเป็นผลทำให้ความเร็วในการเดินทางเพิ่มขึ้น) การขยายกว้างออกของความยาวคลื่นนี้เป็นสาเหตุให้แบนด์วิดท์ถูกจำกัดค่าความกว้าง เช่นเดียวกับกรณีของโหมดคิสเพอซัน กรณีนี้เราเรียกว่า แมททิเรียลคิสเพอซัน (MATERIAL DISPERSION)

นอกจากนี้กรณีที่ค่าผลต่างของค่าดัชนีการหักเหของแกน กับ แคลดมีค่าน้อยนั้นปรากฏการณ์การสะท้อนกลับหมดของแสงที่รอยต่อของแกน กับ แคลดจะไม่เหมือนกับที่เกิดขึ้นกับกระจกกล่าวคือ ส่วนหนึ่งของแสงจะทะลุเข้าไปในแคลดก่อนแล้วจึงจะสะท้อนกลับหมดและขนาดการทะลุเข้าไปนี้จะแตกต่างกันตามความยาวคลื่น เป็นผลให้ระยะทางการเดินทางของแสงนี้ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น (ความยาวคลื่นยิ่งมีค่ามากเท่าใด ขนาดการทะลุเข้าไปใน แคลดจะมากขึ้นเท่านั้น และจะทำให้เส้นทางการเดินทางยาวขึ้น) การขยายกว้างออกของระยะทางการเดินทางของแสงนี้เรียกว่า สตรัคเจอร์คิสเพอซัน (STRUCTURE DISPERSION) ในการสื่อสารด้วยเส้นใยแสงนั้นการเกิดแมททิเรียลคิสเพอซัน และ สตรัคเจอร์คิสเพอซันจะรวมกันเรียกว่า เวฟเลงธ์คิสเพอซัน (WAVELENGTH DISPERSION)

ความสัมพันธ์ระหว่าง โหมดคิสเพอซัน, แมททิเรียลคิสเพอซัน และ สตรัคเจอร์คิสเพอซัน จะเป็นดังนี้คือ

โหมดคิสเพอซัน \gg แมททิเรียลคิสเพอซัน $>$ สตรัคเจอร์คิสเพอซัน ดังนั้น สำหรับมัลติโหมดส่วนใหญ่โหมดคิสเพอซัน จะเป็นตัวกำหนด แบนด์วิดท์ของการส่ง

3) ขนาดความกว้างแบนด์วิดท์ของการส่ง (TRANSMISSION BAND WIDTH)

ปัจจุบันแบนด์วิดท์ที่ใช้ในการส่งที่ใช้ในการสื่อสารเส้นใยแสงนั้น เป็นตัวบอกให้ทราบว่าจะสามารถส่งสัญญาณแสงที่ผสมกับสัญญาณของข่าวสารด้วยความถี่สูงมากแค่ไหน ปกติจะแสดงขนาดความกว้างตรงจุดที่คุณสมบัติความถี่เบสแบนด์ของเส้นใยแสงตกลง 6 เดซิเบล

สมมติว่าเราป้อนอิมพัลส์ ซึ่งเป็นเวฟฟอร์มที่สมบูรณ์แบบกล่าวคือ ตรงฐานเวฟฟอร์มไม่ขยายกว้างออก เมื่ออิมพัลส์นี้เดินทางไปบนเส้นใยแสงได้ระยะทางค่าหนึ่ง ตรงจุดปลายทางของเส้นใยแสงนั้น อิมพัลส์ที่เดินทางมาจะขยายกว้างออก เนื่องจากคุณสมบัติคิสเพอซัน แม้ว่าในระหว่างทางที่แสงเดินทางมาจะไม่มีแสงกระจายออกจากแกน (RADIATION MODE) เลยก็ตาม แต่ทว่าการที่มันขยายกว้างออกไปนั้นจะต้องทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักวิทยาศาสตร์ได้พบข้อบกพร่องในการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดลดลงอย่างแน่นอน จากการตรวจดู อิมพัลส์เวฟฟอร์ม ตรงจุดปลายทางของเส้นใยแสงนี้ สามารถใช้เป็น ขั้นตอนของการประเมินค่าคุณสมบัติของการขยายกว้างออกของเส้นใยแสงได้ สังเกตว่าการใช้หลักการเช่นนี้ ในย่านความถี่ซึ่งเรียกว่า เบสแบนด์ฟรีแควนซ์ซาราเรเคอริสติก (BASEBAND FREQUENCY CHARACTERISTIC)

คำว่าเบสแบนด์ฟรีแควนซ์ซาราเรเคอริสติก นั้นหมายถึง คุณสมบัติความถี่ของอัตราส่วนของขนาดของ สัญญาณไฟฟ้าซึ่งเป็นสัญญาณชานน์เวฟที่นำมาผสมทางด้านอินพุท กับสัญญาณไฟฟ้าที่แยกออกมาจากการ ผสม (MODULATION) ทางด้านเอาต์พุท ในสายส่งที่เป็นเส้นใยแสง สำหรับเส้นใยแสงที่เป็นมัลติโหมด เนื่องจากผลของโหมดคิสเพอซัน เมื่อความถี่ที่นำมาผสมทางด้านอินพุทสูงขึ้น ขนาดของสัญญาณที่แยกออกมา จากการผสมทางด้านเอาต์พุทลดลง นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับระยะทางด้วย ขนาดความกว้างแบนด์วิธที่ 6 ตีบี นั้น เรียกว่าเป็นช่วงความถี่ที่ขนาดของสัญญาณไฟฟ้าที่แยกออกมาจากการผสม ภายหลังจากแสงเดินทางได้ 1 กิโลเมตร แล้วปรากฏว่าขนาดของมัลติคลงเป็นครึ่งหนึ่งหรือ 3 ตีบี เมื่อเทียบกับขนาดของสัญญาณไฟฟ้านำมาผสมทางด้านอินพุท และใช้หน่วยเป็น เมกะเฮิร์ตเมตร

แหล่งกำเนิดแสงสำหรับระบบ WDM

เลเซอร์ไดโอด

ในระบบการสื่อสารเส้นใยแก้วจะใช้แอลอีดีในวงจำกัด เช่น การเชื่อมต่อระบบแลน ระบบการส่งข้อมูลด้วยความเร็วต่ำ และระยะทางใกล้โดยใช้เส้นใยแก้วแบบมัลติโหมด ซึ่งนับว่าเพียงพอแล้ว ในระบบการข้อมูลความเร็วสูง และระยะทางไกลๆ จำเป็นต้องใช้เส้นใยแก้วแบบซิงเกิลโหมด เพื่อตอบสนองต่อความเร็วในการส่งและลดการสูญเสียได้มาก แต่เนื่องจากแกนของเส้นใยแก้วมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็กมาก นั่นคือ ค่า เอ็นเอ (NA) มีค่าน้อยมาก ดังนั้นแหล่งกำเนิดแสงที่เหมาะสมกับเส้นใยแสงแบบซิงเกิล โหมดก็คือเลเซอร์ไดโอด เนื่องจากลำบีมของเลเซอร์ไดโอดแคบพอที่จะยิงเข้าไปในเส้นใยแสง

การอธิบายการทำงานของเลเซอร์ไดโอด จะพิจารณาที่ระดับพลังงานในอะตอมของสารกึ่งตัวนำ โดยปกติอิเล็กตรอนจำนวนมากจะรวมตัวกันอยู่ในแถบพลังงานต่ำ และมีอิเล็กตรอนจำนวนเล็กน้อยอยู่ที่แถบพลังงานสูง สมมติว่าจำนวนอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็น N ในจำนวนนี้แบ่งอยู่ใน อยู่ n_1 ตัว และอยู่ใน แถบพลังงานสูงอยู่ n_2 ตัว ในสภาพปกติ นั้น n_1 จะมากกว่า n_2 ในสภาพเช่นนี้ ถ้าหากเราให้แสงจากภายนอกแก่มันจะทำให้เกิดปรากฏการณ์สตีมูลเตอ อิมิชชัน (STIMULATED EMISSION) และการดูดพลังงาน ซึ่งขนาดของมันจะเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนของ n_2 และ n_1 แต่โดยทั่วไปการดูดพลังงานจะมีมากกว่าทำให้แสงที่เข้ามาจะมีขนาดลดลง หากมีวิธีใดวิธีหนึ่งที่ทำให้ n_2 มากกว่า n_1 ซึ่งเรียกว่าเกิด อินเวอร์ชัน คิสทริบิวชัน (INVERSION DISTRIBUTION) ได้แล้วก็จะทำให้การปล่อยพลังงานมีมากกว่าการดูดพลังงาน ในกรณีนี้ทำให้ความเข้มของแสงที่ป้อนเข้ามาเพิ่มขึ้นและเกิดปฏิกิริยาการขยายแสง พลังงานจากภายนอกที่เป็นตัวทำให้เกิดสตีมูลเตอ อิมิชชัน เพื่อให้ปล่อยแสงออกมาจะใช้วิธีการฉีดอิเล็กตรอนโดยการทำให้กระแสไหลก็จะเกิดปฏิกิริยาการขยายทางกระแสได้

คุณสมบัติที่ใช้ในการอธิบายการทำงานของเลเซอร์ไดโอดมีดังนี้

1. มีปรากฏการณ์ อินเวอร์ชัน คิสทรีบิวชัน
2. มีปรากฏการณ์ สติลลูเกต อิมิชชัน
3. มี เรโซเนเตอร์

ในกรณีของเลเซอร์ไดโอดจะใช้หลักการของ อินเวอร์ชัน คิสทรีบิวชัน ในการทำงานซึ่งในแอลอีดีจะไม่มี โดยทั่วไปเลเซอร์ไดโอดจะปล่อยแสงจากด้านข้างเมื่อมีไบอัสตรงให้กับเลเซอร์ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะถูกฉีดเข้าไปในแอคทีฟเลเยอร์ (Active Layer) ที่เกิด รีคอมบินชัน ส่วนหนึ่งจะเกิดการปล่อยพลังงานตามธรรมชาติ ซึ่งเวลาให้พลังงานอิเล็กตรอนจะเลื่อนขึ้นไปในระดับพลังงานสูงหาก ไม่มีการปฏิบัติการใดๆแล้วอิเล็กตรอนจะกลับลงสู่ระดับพลังงานเดิม นอกจากนั้นแล้วมีประจุอีกส่วนหนึ่งถูกกระตุ้นให้ปล่อยแสงโดยโฟตอนอื่นๆ ถ้าความหนาแน่นของกระแสมีมาก โดยการไบอัสแรงดันเพิ่มขึ้น จะมีประจุจำนวนมากสำหรับสติลลูเกต อิมิชชัน นั่นคือ ได้อัตราการขยายทางแสงขึ้นมา เมื่ออัตราการขยายตัวนี้มีค่ามากกว่าการสูญเสียในไดโอด (ซึ่งเกิดจากการดูดพลังงานของอิเล็กตรอนเพื่อเลื่อนไปยังระดับพลังงานที่สูงกว่า และเอาพลังงานอีกส่วนหนึ่งมากระตุ้นให้ลงมาสู่ระดับพลังงานเดิม) จนถึงค่ากระแสเทรชโฮลแล้ว ที่จุดนี้จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ เลเซอร์ออสซิลเลชัน

โดยทั่วไปเลเซอร์ไดโอดจะมีโครงสร้างเป็น 3 ชั้น ในการทำให้เกิดเลเซอร์ออสซิลเลชัน นั่นคือส่วนที่ทำหน้าที่เป็นเรโซเนเตอร์เร็วกว่าแอคทีฟเลเยอร์ ซึ่งมีตำแหน่งอยู่ระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดที่กับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นการทำให้เกิดเลเซอร์ออสซิลเลชันนั้นจะต้องทำให้ผลต่างระหว่างระดับพลังงานของคอนดักชันแบนด์ของสารพีและคอนดักชันแบนด์ของแอคทีฟเลเยอร์มีค่ามากพร้อมทั้งทำให้ผลต่างระหว่างพลังงานของคอนดักชันแบนด์กับวาเลนแบนด์ของสารพี มีค่ามากด้วย นอกจากนั้นยังต้องทำให้ระดับพลังงานของวาเลนแบนด์ของสารเอ็นมีค่าต่ำกว่าระดับพลังงานของวาเลนแบนด์ของแอคทีฟเลเยอร์ด้วย ในการทำเช่นนี้เพื่อทำให้ค่าดัชนีหักเหของแอคทีฟเลเยอร์มีค่ามากกว่าเลเยอร์ข้างเคียงทำให้มีสภาพเสมือนเป็นเส้นใยแสง เมื่อนำมาเชื่อมต่อกันเป็นผลทำให้เกิดกำแพงของพลังงาน (HETERO BARRIER) อิเล็กตรอนส่วนเกินที่อยู่ในสารเอ็นเคลื่อนที่ไปยังสารพีและโฮลส่วนเกินที่มีอยู่ใน สารเอ็น เคลื่อนที่ไปในสารเอ็น ผลการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และ โฮล ทำให้อิเล็กตรอนและโฮลที่เคลื่อนที่ไปนั้น ถูกกักขังอยู่ใน แอคทีฟเลเยอร์เป็นผลทำให้เกิดสภาพอินเวอร์ชัน คิสทรีบิวชัน ได้เป็นอย่างดีทำให้มีผลในการขยายความเข้มของการปล่อยแสงนั้นก็เกิดปรากฏการณ์สติลลูเกต อิมิชชันนั่นเอง

ในส่วนของเรโซเนเตอร์ สามารถทำได้โดยใช้สิ่งที่มีความคมมากๆ ไปตัดสารกึ่งตัวนำที่ประกบกันเป็นเลเซอร์ไดโอดให้มีช่องเปิดเรียกว่าโอเพิน วอลล์ (OPEN WALL) การทำเช่นนี้ทำให้แสงเลเซอร์เกิดการสะท้อนกลับบริเวณรอยต่อระหว่างแอคทีฟเลเยอร์กับ อากาศเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเห ซึ่งสัมพันธ์กับการสะท้อนกลับหาได้จากสมการ

$$R = \left[\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right]^2$$

โดยที่

n_1 = ค่าดัชนีหักเหของแอสทีฟเลเซอร์

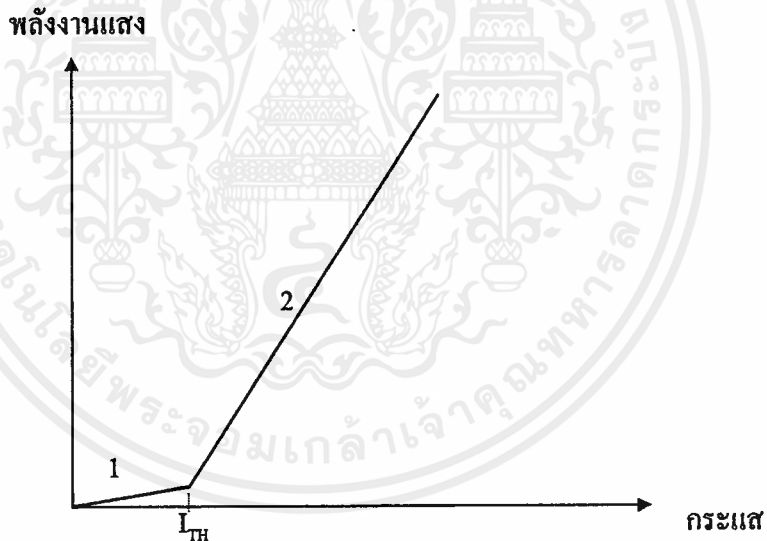
n_2 = ค่าดัชนีหักเหของอากาศ

ส่วนใหญ่สารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำเลเซอร์นั้นจะเป็นสารจำพวกอินเดียม (In), แกลเลียม (Ga), อาเซนไนด์ (As), อลูมิเนียม (Al) และฟอสฟอรัส สมมติว่าแอสทีฟเลเซอร์ทำมาจาก AlGaAs จะมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 3.6 เมื่อแทนในสูตรจะได้ว่า

$$\begin{aligned} R &= \left[\frac{(3.6 - 1)}{(3.6 + 1)} \right]^2 \\ &= 32 \text{ เปอร์เซ็นต์} \end{aligned}$$

ซึ่งหมายความว่าถ้าแสงเดินทางมาตรงรอยต่อระหว่างแอสทีฟเลเซอร์กับ อากาศ 100 เปอร์เซ็นต์จะทะลุผ่านไป 68 เปอร์เซ็นต์ และสะท้อนกลับ 32 เปอร์เซ็นต์

คุณสมบัติการทำงานของเลเซอร์ไดโอด



รูปที่ 2.10 กราฟคุณสมบัติของเลเซอร์ไดโอด

การทำงานของเลเซอร์ไดโอดจะเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 เป็นช่วงการทำงานที่ไม่เป็นเชิงเส้น ลักษณะคล้ายกับการทำงานของแอลอีดี ในช่วงนี้เลเซอร์ไดโอด จะปล่อยแสงแบบ นอน - โคฮีเรนต์ (Non - Coherent Light) อันเกิดจากการกระตุ้นตามธรรมชาติ แสงช่วงที่ 2 เป็นช่วงการทำงานที่เป็นเชิงเส้น จุดเริ่มต้นของ กระแสที่เป็นเชิงเส้นประมาณ 20 มิลลิแอมป์ ซึ่งเรียกว่า กระแสเทรชโฮล ในทางปฏิบัติกระแสที่ใช้จะอยู่ในช่วง 40 มิลลิแอมป์ หากใช้กระแสสูงมากจะทำให้เกิดโอเวอร์ฮีท มีผลทำให้ไลฟไทม์ (Life Time) ของ เลเซอร์ไดโอดสั้นลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยวิธีใดๆ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพลังงานแสงที่เอาท์พุท สำหรับเลเซอร์ไดโอด มีค่าประมาณ 1 - 10 มิลลิวัตต์ ลักษณะของแสงที่เลเซอร์ไดโอดปล่อยออกมาจะมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ

- 1) เป็นชนิดที่ปล่อยแสงในลักษณะคลื่นแบบต่อเนื่อง (Continuous Wave)
- 2) เป็น ชนิดปล่อยแสงเป็นพัลส์ แบบนี้จะมีการกำลังสูงกว่าแบบแรก

โดยปกติในการสื่อสารจะใช้แบบคลื่นต่อเนื่องแต่ในงานบางเช่น ตัวเซนเซอร์ หรือ รีโมท จะใช้แบบพัลส์ เพื่อให้กำลังในการส่งส่ง ไปได้ไกล เลเซอร์ไดโอดทำงานได้เร็วกว่าแอลอีดี โดย t_r ของ เลเซอร์ มีค่าระหว่าง 0.1 - 1 นาโนวินาที จึงทำให้สามารถมอดูเลตกับความถี่สูงๆ ได้ ส่วนสเปคตรัม ของเลเซอร์มีค่าน้อยกว่า แอลอีดีคืออยู่ระหว่าง 1 - 5 นาโนวินาที

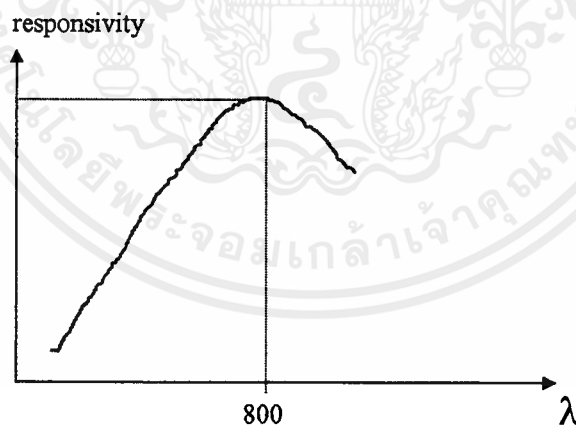
โฟโตดีเทคเตอร์ (PHOTO DETECTOR)

การทำงานของโฟโตดีเทคเตอร์หรือ โฟโตไดโอดจะตรงกันข้ามกับเลเซอร์ไดโอด การทำงานจะต้องจ่ายแรงดันแบบรีเวอร์สไบอัส คุณสมบัติที่สำคัญของโฟโตไดโอด ได้แก่

- 1) เรสปอนสิวิตี (RESPONSIVITY ; ρ) คือ ความสามารถในการตอบสนองต่ออินพุทที่เข้ามา โดยคิดในรูปของอัตราส่วนระหว่างกระแสเอาท์พุทของโฟโตไดโอด ต่อ พลังงานแสงที่ตกกระทบ

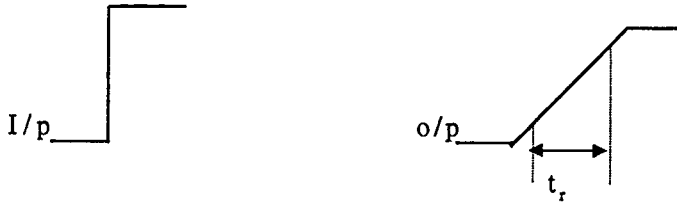
$$\rho = I / P \quad \text{แอมป์ต่อวัตต์}$$

- 2) สเปคตรัมเรสปอนส์ (SPECTRUM RESPONSE) หมายถึง เคอร์ฟของเรสปอนสิวิตี ในฟังก์ชันของความยาวคลื่น



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงการสนองต่อความยาวคลื่น

- 3) ไรส์ไทม์ (RISE TIME ; t_r) คือเวลาสำหรับตัวโฟโตไดโอดมีกระแสเอาท์พุท เปลี่ยนจาก 10 เปอร์เซ็นต์ เป็น 90 เปอร์เซ็นต์ ของค่าสูงสุด เมื่อพลังงานแสงที่เข้ามามีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะ ดังรูป

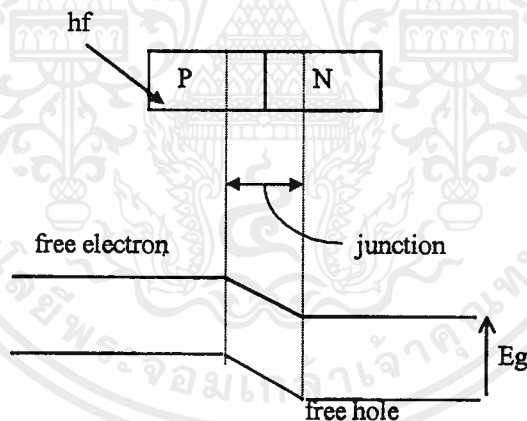
รูปที่ 2.12 แสดงค่า t_r

t_r จะมีบทบาทสำคัญในการจำกัดแบนด์วิดท์หรืออัตราการส่งข้อมูลของตัวรับแสง สำหรับค่ามอดูเลตแบบมอดูเลตที่ 3 เดซิเบล (3-dB Modulation Bandwidth) ของโฟโตไดโอดหาได้จากสมการ

$$f_{3\text{-dB}} = 0.35 / t_r$$

โฟโตไดโอดที่ใช้กันโดยทั่วไปมีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิด ได้แก่

พีเอ็น โฟโตไดโอด (PN PHOTO DIODE)

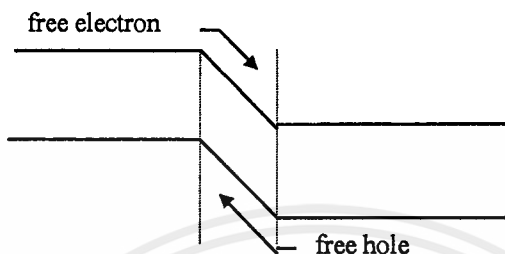


รูปที่ 2.13 โครงสร้างของพี-เอ็นโฟโตไดโอด

พีเอ็นโฟโตไดโอด สร้างโดยนำเอาสารพีกับสารเอ็นมาเชื่อมต่อกัน เนื่องจากในสารทั้งสองชนิดมีระดับสมดุลซ์ของพลังงานไม่เท่ากัน โดยสารพีจะมีระดับสมดุลซ์ต่ำ ส่วนสารเอ็นมีระดับสมดุลซ์สูงเมื่อนำสารทั้งสองชนิดมาต่อกันจะต้องให้ระดับสมดุลซ์ตรงกัน เป็นผลทำให้เกิดความต่างของพลังงาน (Barrier) ในสภาวะปกติแบเรียร์ระหว่างพี กับเอ็นน้อย ทำให้อิเลคตรอนอิสระเคลื่อนที่เข้าหาโฮลอิสระได้ง่าย แต่เมื่อมีริเวอร์สไบอัสจ่ายให้กับมัน จะทำให้แบเรียร์ระหว่างพี กับเอ็นเพิ่มขึ้น ทำให้อิเลคตรอนอิสระและโฮลอิสระไม่สามารถข้ามแบเรียร์ได้ นั่นคือไม่มีกระแสไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของพีเอ็นโฟโต้ไดโอด โดยการทำงานที่อินทรินสิค เมื่อมีแสงตกกระทบสมมติว่ามีโฟตอน 1 ตัว โฟตอนนี้จะถูกดูดเข้าไปในรอยต่อ พลังงานที่เกิดจากโฟตอนนี้จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระ 1 ตัวข้ามรอยต่อของพลังงานจากวาเลนซ์แบนด์ไปยังคอนดักชันแบนด์ ในคอนนี้อิเล็กตรอนจะเป็นอิสระประจุอิสระต่างๆจะถูกทำให้เกิดขึ้น โดยการดูดโฟตอนนี้อิเล็กตรอนอิสระจะเคลื่อนลงมาตามความชันของแถบเวรีร์ ส่วนโฮลอิสระจะเคลื่อนที่ขึ้นตามความชันของ แถบเวรีร์ การเคลื่อนที่ของประจุก็คือการไหลของกระแสตนเอง

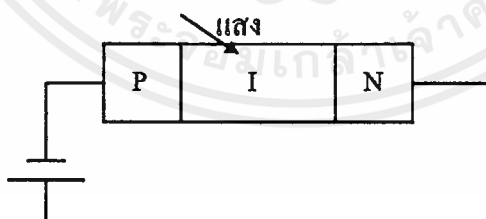


รูปที่ 2.14 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮล

กระแสที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อนี้เรียกว่ากระแสดริฟท์

บริเวณภายนอกรอยต่อเมื่อโฟตอนถูกดูดในพีหรือเอ็น สมมติว่าโฟตอน 1 ตัวถูกดูดทำให้เกิดอิเล็กตรอน กับโฮลอิสระคู่หนึ่ง แต่ ประจุเหล่านี้จะเคลื่อนที่เข้าหาประสาณามไฟฟ้าภายนอกมีค่าต่ำ ประจุเหล่านี้จะกระจัดกระจายไปอย่างช้าและจะ รวมตัวกัน ก่อนไปถึงรอยต่อ การเคลื่อนที่ของประจุเหล่านี้จะทำให้เกิด กระแสไฟฟ้าขึ้นซึ่งกระแสจะไปลดแรงสปีดของโฟโต้ไดโอด ทำให้มีสปีดประสาณมส์ช้า จึงไม่เหมาะกับการส่งแบบความเร็วสูง วิธีแก้ข้อเสียบของพีเอ็น โฟโต้ไดโอดคือใช้พินโฟโต้ไดโอด (PIN-Photo Diode)

พินโฟโต้ไดโอด (PIN - PHOTODIODE)



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของพินโฟโต้ไดโอด

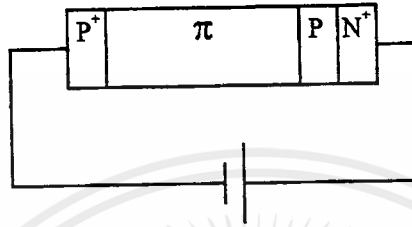
พินโฟโต้ไดโอด จะมีชั้นของสารกึ่งตัวนำอินทรินสิค (INTRINSIC LAYER) กั้นระหว่างสารที่กับสารเอ็น สารกึ่งตัวนำอินทรินสิคไม่มีประจุอิสระ ดังนั้นมันจึงมีความต้านทานสูง ไดโอดโวลเดจจะเกิดขึ้นที่นี่ ทำให้มีสนามไฟฟ้าแรงมากภายในอินทรินสิคเลเยอร์ เนื่องจากอินทรินสิคเลเยอร์กว้างให้โฟตอนถูกดูดในอินทรินสิคเลเยอร์มากกว่าพีและเอ็น จึงเป็นการลดกระแสดริฟท์ขึ้น ทำให้สปีดประสาณมส์ดีกว่าพีเอ็นโฟโต้ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับตัวที่กำหนดคสปีดเรสปอนส์ของทินโฟโต้ไดโอด ได้แก่ ทรานสิทไทม์ (Transit Time) คือเวลาที่ประจุอิสระใช้เดินทางผ่านดีพลิตชันเลเยอร์ที่มีอยู่ในทินโฟโต้ไดโอด

$$\text{Transit Time} = \text{ระยะทาง} / \text{ความเร็ว}$$

อวาลันซ์โฟโต้ไดโอด (Avalanche Photo Diode : APD)



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของ APD

APD เป็นโฟโต้ไดโอดที่มีการขยายภายใน (Internal Gain : M) ซึ่งจะไปเพิ่มเซนสิวิตีได้ดีกว่าที่เอ็นหรือทินโฟโต้ไดโอด การขยายภายในเกิดจากโฟตอนที่ถูกดูดในบริเวณดีพลิตชัน จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระ แรงไฟฟ้าค่าสูงที่รอยต่อระหว่างพีและเอ็นบวกซึ่งเกิดจากการจ่ายไบแอสค่าสูง จะเป็นเหตุให้ประจุเหล่านี้ถูกเร่งความเร็วในการเคลื่อนที่ให้มีพลังงานสูง เมื่อประจุวิ่งไปชนอะตอมอื่นทำให้เกิดอิเล็กตรอนและโฮลคู่ใหม่แบบลูกโซ่ โคซอัครการขยายหาได้จาก

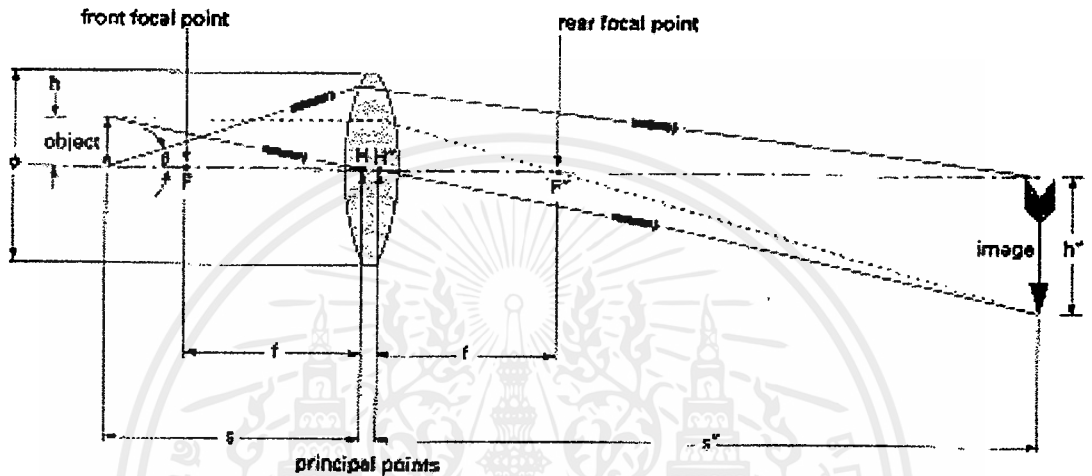
$$M = 1 / [1 - (V_B / V_{BR})^n]$$

- โดย M = อัตรการขยาย
 V_B = ไบแอสกลับ
 V_{BR} = แรงดันเบรคดาวน์
 n = พารามิเตอร์มากกว่า 1

อุปกรณ์ที่กล่าวมานี้เป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาจากทฤษฎีที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ส่วนใหญ่จะเป็นทฤษฎีโฟตอน คือการเปลี่ยนแสงให้เป็นไฟฟ้าและเปลี่ยนไฟฟ้าให้เป็นแสง ในส่วนต่อไปจะทำการศึกษาดังอุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในการมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแสง

อุปกรณ์ทางแสง
เลนส์ (LENSES)

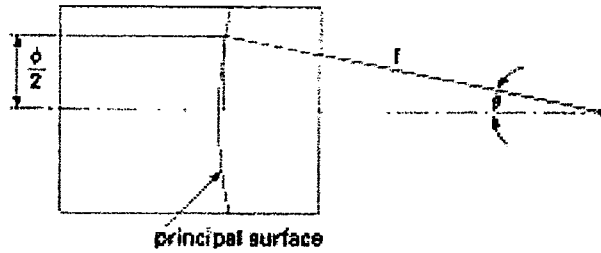
ในปัจจุบันระบบการสื่อสารล้วนแล้วแต่จะใช้เส้นใยแสงแบบซิงเกิล โหมดทั้งนั้น เพื่อการส่งสัญญาณที่มีประสิทธิภาพ การป้อนสัญญาณเข้าสู่เส้นใยแก้ว จำเป็นต้องใช้เลนส์เพื่อบีบลำแสงให้พอดีกับช่องเปิดการรับแสงของเส้นใยแก้วซึ่งจะเกี่ยวข้องกับค่าเอ็นเอชของเส้นใยแก้ว เลนส์สำหรับงานด้านการสื่อสารทางแสงจะมีคุณสมบัติเฉพาะงานออกไป โดยการออกแบบจากเลนส์ที่มีรูปแบบพื้นฐาน



รูปที่ 2.17 เลนส์

- ϕ = เส้นผ่านศูนย์กลางเลนส์
- $m = s'/s = h'/h =$ อัตราขยาย
- ถ้า s' ไม่จำกัด m จะมีค่าไม่จำกัดด้วย
- $\theta = \text{Arcsin}(\phi / 2s)$
- h = ความสูงของวัตถุ
- h' = ความสูงของภาพฉาย
- s = ระยะวัตถุ
- s' = ระยะภาพ
- f = effective focal length (EFL)

ต่อไปจะศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบการสื่อสารใยแก้วนำแสง พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับเส้นใยนำแสงคือค่า ไฟกัสนัมเบอร์ (f-number) หรือ เอฟ - นัมเบอร์ โดยพิจารณาตามรูป



รูปที่ 2.18 แสดงค่า เอฟ - นัมเบอร์

$$F\text{-NUMBER} = f / \Phi$$

ค่า เอฟ - นัมเบอร์ เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าเอฟเฟคทีฟโฟลลันซ์ (EFFECTIVE FOCAL LENGTH) กับเส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์ ในการนำไปใช้งานจะต้องเลือกอัตราส่วนดังกล่าวหรือค่าเอฟ - นัมเบอร์ ที่เหมาะสม เลนส์ที่ใหญ่เกินไปจะไม่เหมาะกับการสื่อสารรวมทั้งราคาแพง หากใช้เลนส์ที่มีขนาดเล็กเกินไป จะทำให้แสงผ่านได้ไม่เพียงพอ

พิจารณาเลนส์ซึ่งมีโพสิทีฟโฟลลันซ์ (POSITIVE FOCAL LENGTH) หรือเลนส์ที่มีจุดโฟกัสอยู่ด้านตรงข้ามกับลำแสงที่เข้ามาแสงที่ผ่านเลนส์ออกมาจะมีลักษณะเป็นรูปกรวย ค่าเอฟ - นัมเบอร์ จะบอกขนาดช่องเปิดหรือหน้าค่ารับแสงหรือค่าวิกฤติที่รับแสงได้ เมื่อพิจารณาในเทอมของค่าเอ็นเอ คือซายน์ของมุมที่สามารถรับแสงได้ ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

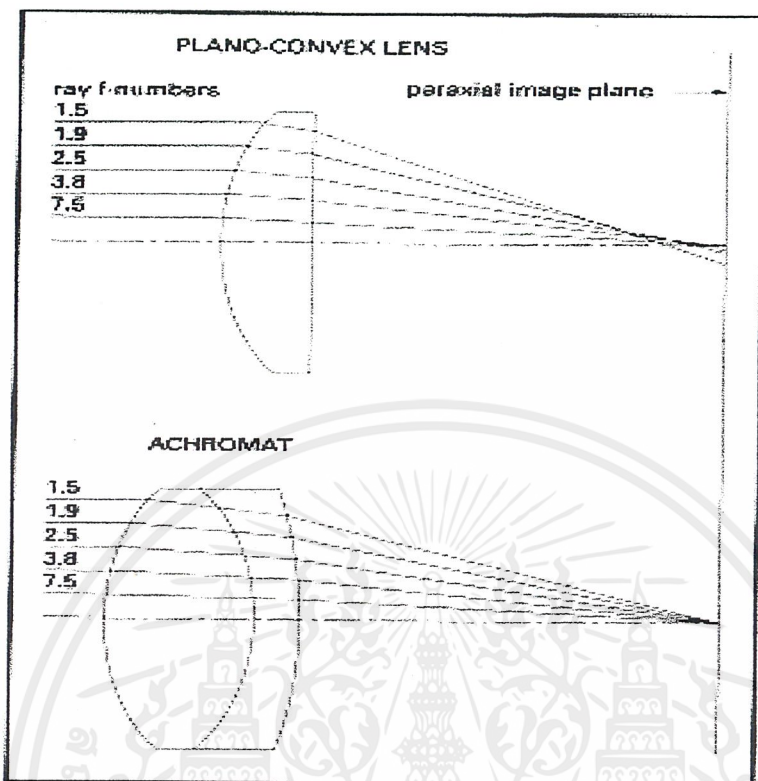
$$N.A. = \sin \theta = \phi / 2f$$

โดย $F\text{-NUMBER} = f / \phi$ จะได้ว่า

$$N.A. = 1/2(F\text{-NUMBER})$$

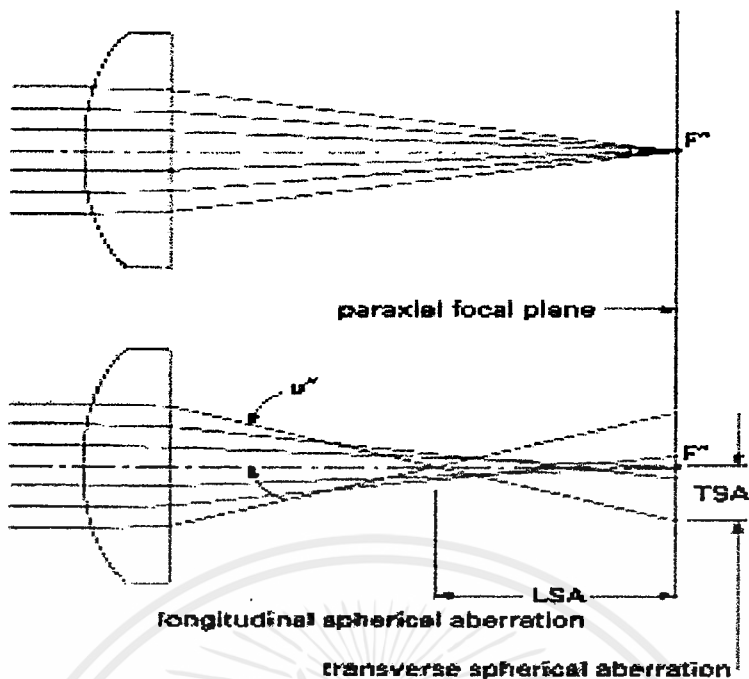
ในทางปฏิบัติเราจำเป็นต้องนำเลนส์มากกว่าหนึ่งอันประกอบเข้าด้วยกัน เพื่อให้ได้ลักษณะของลำแสงที่มีรูปแบบตามต้องการ ซึ่งถ้าพิจารณาถึงลักษณะของแสงต้นกำเนิดแล้วสามารถแบ่งได้สองกรณี คือ

อินฟินิทคอนจูเกตเรโซ (INFINITE CONJUGATE RATIO)



รูปที่ 2.19 รูปแบบของการรับแสงแบบอินฟินิทคอนจูเกตเรโซ

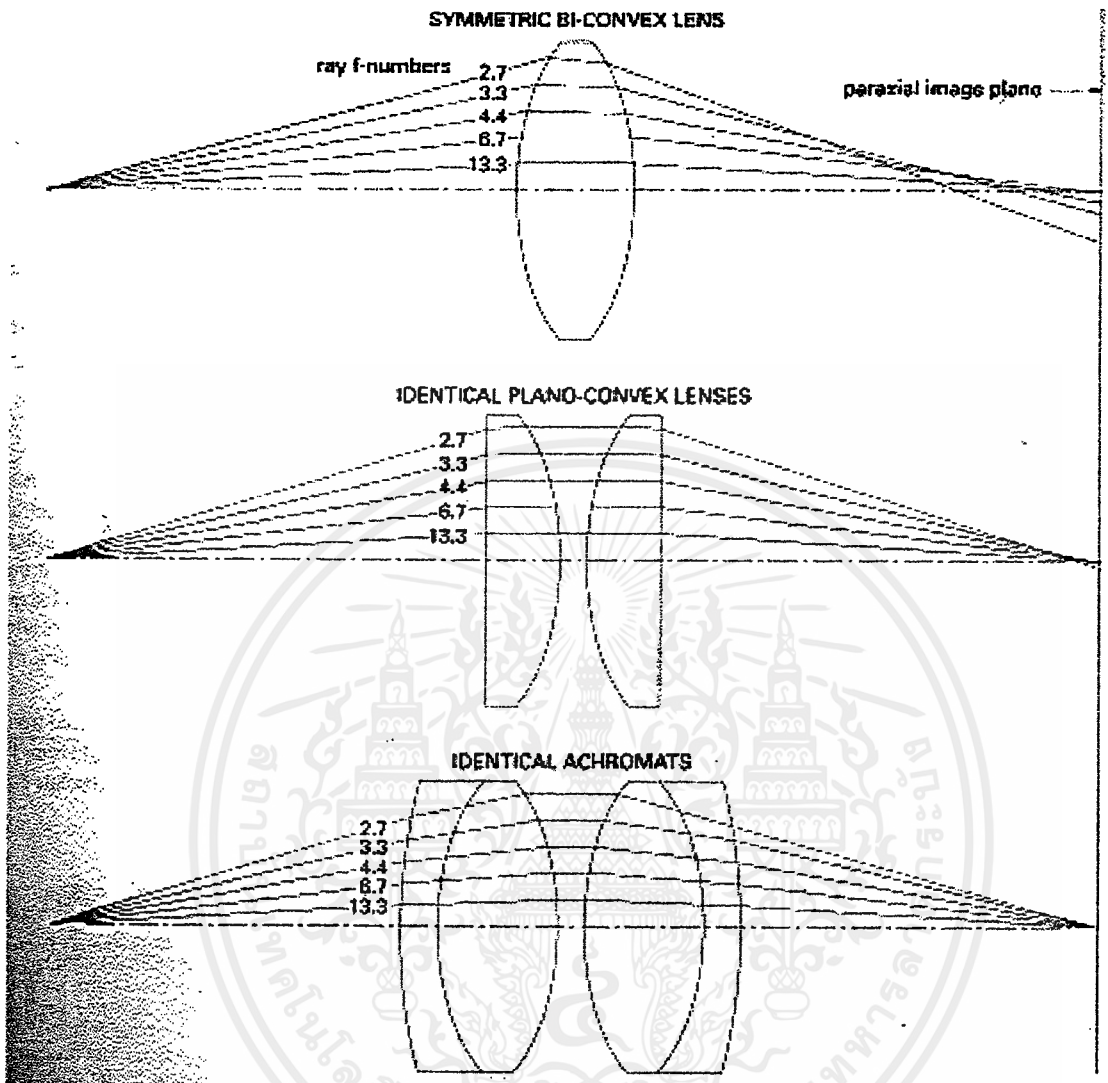
ลำแสงในกรณีนี้ จะเป็นลำแสงที่เกิดขึ้นที่ระยะอนันต์ รูปแบบของลำแสงในแต่ละ เอฟ - นัมเบอร์ เป็นเส้นตรงอยู่ในแนวเดียวกันเป็นระนาบ พิจารณาดูรูปจะเห็นว่าเมื่อใช้เลนส์ชนิด พลาโน - คอนเวกซ์ (PLANO - CONVEX LENS) โดยทดสอบที่ความยาวคลื่น 546.1 นาโนเมตร แสงที่ผ่านเลนส์จะรวมกันที่บริเวณจุดโฟกัส พิจารณาในแต่ละ เอฟ - นัมเบอร์ จะมีจุดโฟกัสคลาดเคลื่อนกันออกไป โดยเอฟ - นัมเบอร์ ที่อยู่ใกล้ขอบเลนส์ (F - NUMBER 1.5) จะผิดพลาดจากจุดโฟกัสมากที่สุด หากพิจารณาในรูปสามมิติที่จุดโฟกัสจะเป็นระจุกกลมๆ ค่าผิดพลาดอันนี้เราเรียกว่า สเฟียริคอล อเบอเรชัน (SPHERICAL ABERRATION)



รูปที่ 2.20 การเกิดสเฟียริคอลลอเบอเรชั่น

ในระบบการสื่อสารใยแก้วนำแสง จุดโฟกัสจะต้องแน่นอนเนื่องจากเส้นใยแสงที่ใช้ในการสื่อสารมีเส้นผ่านศูนย์กลาง core ที่เล็กมากมีผลต่อค่า N.A. โดยตรง การปรับจุดโฟกัสของเลนส์จะใช้เลนส์ อโครเมท (ACHROMAT LENS) ซึ่งประกอบด้วย แก้วที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำแบบบวก (POSITIVE LOW INDEX GLASS) มีสีคล้ายสีหมอก ประกอบอยู่บนแก้วที่มีค่าดัชนีหักเหสูงด้านแบบลบ (NEGATIVE MENISCUS HIGH INDEX) ซึ่งมีลักษณะใส คล้ายกับว่าเป็นการปรับจุดโฟกัสของลำแสง ให้ลำแสงที่ เอฟ - นัมเบอร์ต่างๆ มีจุดโฟกัสเดียวกัน ความผิดพลาดจากจุดโฟกัสมีบ้างซึ่งออกมาในระดับไมโครเมตร ซึ่งดีกว่า พลาโน - คอนเวคเลนส์ ที่วัดออกมาในระดับมิลลิเมตร แต่ถ้าลำแสงที่ตกกระทบมีลำบีมที่แคบหรือค่าเอฟ - นัมเบอร์สูงๆ เช่น 7.5 หรือ 3.8 ก็สามารถใช้ พลาโน - คอนเวคเลนส์ได้ เนื่องจากค่าสเฟียริคอลลอเบอเรชั่นน้อยมากที่ เอฟ - นัมเบอร์สูงๆ

ยูนิตคอนจูเกตเรโซ (UNIT CONJUGATE RATIO)



รูปที่ 2.21 รูปแบบการรับแสงแบบยูนิตคอนจูเกตเรโซ

จากรูปจะเห็นว่าลำแสงที่เป็นแบบยูนิตคอนจูเกตเรโซ จะออกจากจุดกำเนิดจุดหนึ่งในระยะใกล้ การทดสอบที่ความยาวคลื่น 546.1 นาโนเมตร จากรูปแรกใช้เลนส์ไบ - คอนเวกแบบสมมาตร (SYMMETRIC BI-CONVEX LENS) เลนส์ที่ใช้จะเป็นแบบชั้นเดียว สังเกตที่บริเวณจุดโฟกัสในแต่ละเอฟ - นัมเบอร์ จะมีจุดโฟกัสกระจายกันไป ที่เอฟ - นัมเบอร์ ต่ำๆ จะมีจุดโฟกัสสั้นลง (F - NUMBER 2.7)

สเฟริคอล อเบอร์เรน สามารถแก้ไขได้โดยใช้เลนส์แบบพลาโน - คอนเวกซ์ (IDENTICAL PLANO - CONVEX LENS) วางใกล้ๆ กัน การประกอบกันของเลนส์ 2 ชิ้น คล้ายกับจุดโฟกัสของเลนส์แบบไบ - คอนเวกซ์ จากคุณสมบัติของ พลาโน - คอนเวกซ์ ที่รับแสงแบบ อินฟินิตคอนจูเกตเรโซ เมื่อนำมารับแสงแบบ-ยูนิตคอนจูเกตเรโซจะใช้พลาโน - คอนเวกซ์ 2 อัน หันด้านที่รับแสงแบบ อินฟินิตคอนจูเกตเรโซ เข้าหา

กันคล้ายว่าเป็นจุดโฟกัสทั้งสองด้าน แบบนี้จะปรับจุดโฟกัสในแต่ละ เอฟ - นัมเบอร์ให้อยู่ใกล้กันที่สุดแต่ยังคงมี สเฟริคอล อเบอเรชัน อยู่

แบบที่สาม เป็นการปรับปรุงให้ดีขึ้น โดยใช้คุณสมบัติของ อินฟินิทคอนจูเกรตริโ ซ โดยใช้ คู่ของเลนส์แบบอโครเมท (IDENTICAL ACHROMAT LENS) ปรับจุดโฟกัสได้เที่ยงตรงมากขึ้น

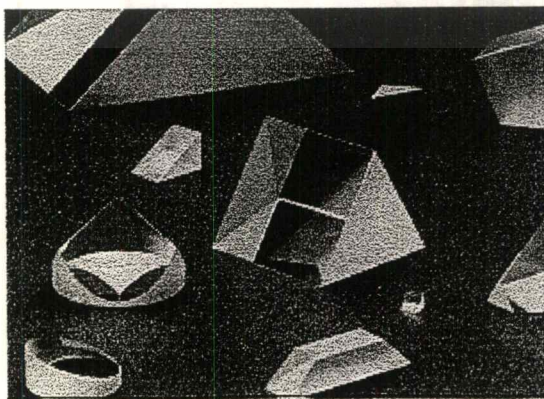
การเลือกเลนส์ไปใช้ในการสื่อสารจำเป็นต้องศึกษารูปแบบของแสงจากแหล่งกำเนิดต่างๆ ว่ามีคุณสมบัติหรือทิศทางเป็นอย่างไร รวมทั้งพิจารณาว่าอุปกรณ์รับแสงที่จุดโฟกัสเป็นอะไร ทั้งนี้ต้องเหมาะกับระบบที่ใช้ การประยุกต์เลนส์แบบต่างๆ ไปประกอบกันเพื่อใช้งานจะพิจารณาพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น เอฟ - นัมเบอร์ เส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์ จุดโฟกัส เป็นต้น

ชิ้นส่วนอุปกรณ์แสงที่ใช้ในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสงนั้นถ้าทำให้มีขนาดเล็กมากเท่าใดจะใช้สะดวกมากขึ้น นอกจากนั้นยังเป็นการสะดวกในการนำไปประกอบในอุปกรณ์ด้วย ดังนั้นเลนส์ที่ใช้ก็เช่นกัน จำเป็นต้องใช้เลนส์ที่มีระยะทางของจุดโฟกัสสั้นที่สุดเท่าที่จะสั้นได้ (มีค่าต่ำกว่าหลายมิลลิเมตร) เลนส์ที่ใช้กับแว่นตาโดยทั่วไปนั้นมีระยะของจุดโฟกัสยาวหลายสิบกิโลเมตร ไม่เหมาะที่จะใช้ในการสื่อสารเส้นใยแสง อนึ่งมีเลนส์ที่มีระยะ โฟกัสสั้นซึ่งใช้ในกล้องจุลทรรศน์แต่สำหรับเลนส์หนึ่งอันนั้น รูปที่มองเห็นจะไม่ชัดเจนจะต้องใช้เลนส์หลายอันมาประกอบกันทำให้ราคาของเลนส์แพงมาก นอกจากนั้นยังมีข้อเสียที่ต้องการความแม่นยำสูงในการปรับวิธีการซ้อนของเลนส์จึงไม่เหมาะที่จะใช้ในการสื่อสารทางแสง เลนส์ที่มีอันเดียวและมีระยะ โฟกัสสั้นหลายมิลลิเมตร และมีความชัดเจนของภาพดีตามความต้องการคือเลนส์แบบแท่ง (ROD LENS) ที่เปลี่ยนดัชนีการหักเหให้มีลักษณะเป็นพาราโบลามากเหมือนอย่างเส้นใยแสงแบบจีไอ

ปริซึม (PRISMS)

ปริซึมเป็นแท่งแก้วสามเหลี่ยมที่มีด้านตรงข้ามกับด้านที่แสงตกกระทบเป็นตัวสะท้อนลำแสง ปริซึมมีคุณสมบัติในการกลับภาพ แต่ในทางสื่อสารทางแสง จะเป็นตัวกระจายหรือแยกลำแสงเข้าสู่อุปกรณ์รับความยาวคลื่นและใช้ในการแยกโพลาไรซ์ของแสง ปริซึมเป็นอุปกรณ์ทางแสงที่สำคัญสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายอย่าง ได้แก่ อุปกรณ์แยกแสงในระบบ WDM หรือ สวิตช์ทางแสง เป็นต้น

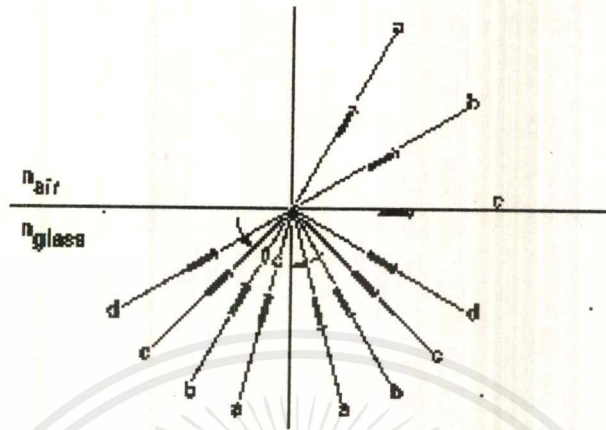
หลักการของปริซึมคือ ควบคุมมุมของแสงที่ตกกระทบไปในทิศทางที่ต้องการ ซึ่งขึ้นอยู่กับมุมที่ตกกระทบ ปริซึมมีลักษณะดังรูป



รูปที่ 2.22 ปริซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอธิบายคุณสมบัติของปริซึมจะใช้หลักการของการสะท้อนภายในที่เรียกว่า โทเทิลอินเทอเนลรีเฟลคชัน (Total Internal Reflection ; TIR) ซึ่งเกี่ยวข้องกับมุมวิกฤติโดยตรง หากลำแสงที่ตกกระทบบนมุมมากกว่ามุมวิกฤติ ลำแสงจะถูกสะท้อนกลับหมด ดังรูป



รูปที่ 2.23 มุมวิกฤติในการรับแสงของปริซึม

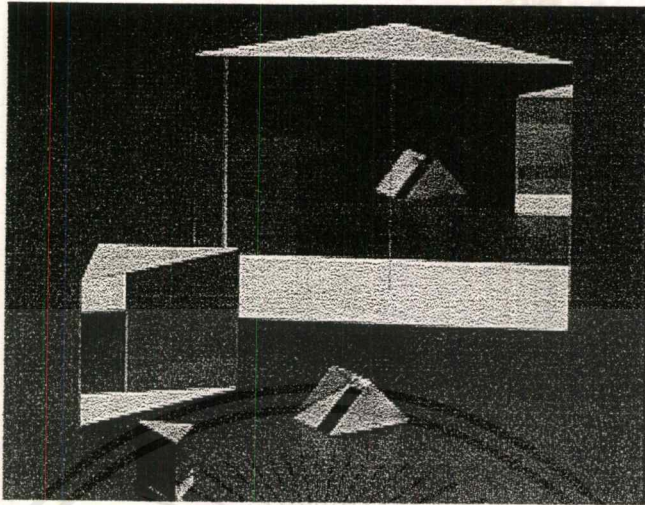
มุมวิกฤติกำหนดโดย

$$\theta_c(\lambda) = \arcsin(1/n\lambda)$$

ค่ามุมวิกฤติขึ้นอยู่กับค่าดัชนีหักเหซึ่งเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น ความยาวคลื่นที่ทำให้ค่าดัชนีหักเหตกลงต่ำกว่ารากที่สองของสอง หรือเท่ากับ 1.414 มุมวิกฤติจะอยู่ที่ 45 องศา ถ้ามุมตกกระทบน้อยกว่ามุมวิกฤติ ค่าของการสะท้อนจะลดลงอย่างรวดเร็ว

ปริซึมสามเหลี่ยม (RIGHT ENGLE PRISMS)

เป็นปริซึมแบบสามเหลี่ยมมุมฉาก ที่มีด้านตรงข้ามมุมฉากเป็นค้ำสะท้อนแสง ดังรูป

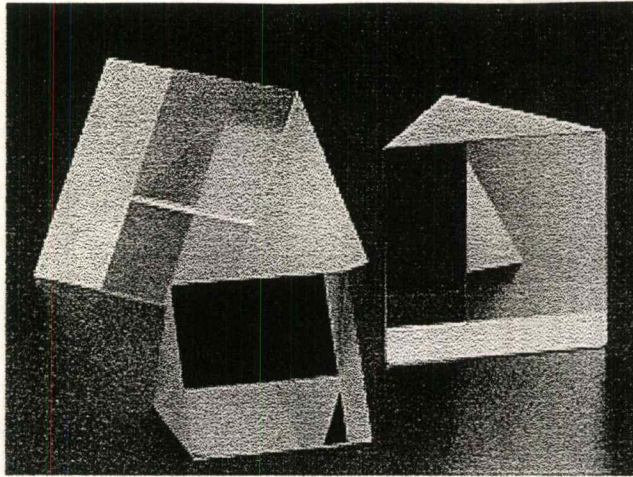


รูปที่ 2.24 ปริซึมแบบสามเหลี่ยม

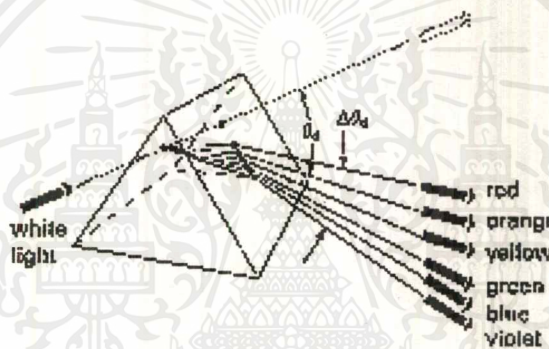
ลำแสงจะตกกระทบบนใดด้านหนึ่งที่ติดกับมุมฉาก เมื่อกระทบผิวหน้าของปริซึมที่เป็นรอยต่อของอากาศกับแก้ว ถ้าลำแสงทำมุมกับรอยต่อมากกว่ามุมวิกฤติลำแสงจะสะท้อนกลับหมด ถ้าลำแสงทำมุมน้อยกว่ามุมวิกฤติจะเกิดการหักเหภายในปริซึม แต่ถ้าลำแสงที่ตกกระทบบนด้านตรงข้ามมุมฉากซึ่งทำมุม 45 องศา เนื่องจากดัชนีหักเหระหว่างแก้วกับอากาศถูกกำหนดให้มุม 45 องศาเป็นมุมวิกฤติ ดังนั้นลำแสงจะสะท้อนกลับทำมุม 45 องศากับด้านตรงข้ามมุมฉากทะลุออกมาอีกด้านหนึ่งของปริซึม แต่จะมีบางส่วนที่ทะลุผ่านรอยต่อนี้ได้ ดังนั้นการกำหนดขนาดและทิศทางของลำแสงจะทำได้ โดยการกำหนดค่าดัชนีหักเหของปริซึมและการฉาบสารด้านตรงข้ามมุมฉาก

EQUILATERAL DISPERSING PRISMS

เป็นปริซึมแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าที่นำไปใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับเครื่องมือวัดทางแสงและอุปกรณ์ทดลองเกี่ยวกับความยาวคลื่นปริซึมชนิดนี้ต่างจากปริซึมสามเหลี่ยมตรงที่ว่ามีความสมบัติในการแยกความยาวคลื่นของลำแสง ลำแสงที่ตกกระทบบนปริซึมจะถูกแยกความยาวคลื่นออกเป็นสเปกตรัมเรียงกัน ดังรูป



รูปที่ 2.25 ปริซึมแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า



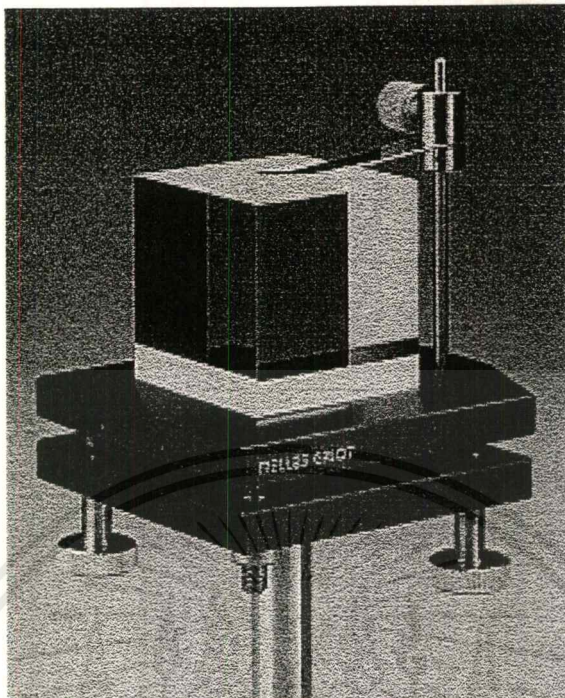
รูปที่ 2.26 คุณสมบัติของปริซึมแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า

รังสีแสงจะถูกหักเหผ่านปริซึมที่มุมต่างกันไป การเบี่ยงเบนขึ้นอยู่กับค่าดัชนีหักเหและความยาวคลื่นมุม $\Delta\theta_d$ เป็นค่าความแตกต่างระหว่างความยาวคลื่นหากเกิดการเบี่ยงเบนมากจะมีการสูญเสียมากขึ้นด้วย

สปลิตเตอร์ (SPLITTERS)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกลำแสงออกเป็นสองทิศทางหรือรวมแสงในสองทิศทางที่ตั้งฉากกันเข้าด้วยกัน สปลิตเตอร์ชิ้นหนึ่งจะเป็นทั้งตัวรวมและตัวแยกแสงขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน อุปกรณ์ชนิดนี้ใช้ในระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น สปลิตเตอร์ที่สำคัญๆ ได้แก่ PLATE BEAMSPLITTERS, CUBE BEAMSPLITTERS, HYBRID CUBE BEAMSPLITTERS เป็นต้น

CUBE BEAMSPLITTERS



รูปที่ 2.27 บีมสปลิตเตอร์แบบสี่เหลี่ยมลูกบาศก์

เป็นสปลิตเตอร์แบบสี่เหลี่ยมมีคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์หลายอย่าง มีความทนทาน แข็งแรง ง่ายต่อการติดตั้ง สปลิตเตอร์ชนิดนี้ประกอบด้วยปริซึมแบบสามเหลี่ยมสองชิ้นวางประกบกัน โดยคุณสมบัติต่างๆ กำหนดโดยการ โทลิต์ด้านตรงข้ามมุมฉากก่อนที่จะประกบกัน ดังนั้นส่วนที่สะท้อนแสงจริงๆ จะถูกห่อหุ้มอยู่ภายในแท่งแก้ว การ โทลิต์จะต้องไม่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับของลำแสงซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดเงา

Cube Beamsplitters มีด้วยกัน 5 ชนิด โดยแบ่งตามลักษณะการใช้งาน ได้แก่ Metal dielectric, Hybrid broadband all - dielectric, Laser non - polarizing all dielectric, Laser line polarizing และ Broadband polarizing แต่ละแบบจะมีจุดเด่นและข้อจำกัดอยู่ ดังนั้นการนำไปใช้งานต้องเลือกให้เหมาะสม Hybrid partial reflection coatings

เป็นบีมสปลิตเตอร์แบบ hybrid การฉาบสารจะผสมกันระหว่างโลหะกับฉนวนเพื่อป้องกันการดูดกลืนแสงเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ (20 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ UV) ลำแสงที่ตกกระทบจะถูกแยกออกเป็นลำแสงส่งผ่าน (Transmission beam) และลำแสงสะท้อน (Reflection beam) ดังนั้นเมื่อเกิดการดูดกลืนแสง 10 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ลำแสงแต่ละด้านเหลือ 45 เปอร์เซ็นต์ ทั้งโพลาไรซ์ S และโพลาไรซ์ P ประโยชน์ของ hybrid coating คือมันไม่ค่อยเปลี่ยนตามมุมที่ตกกระทบเท่าไรนัก ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับลำแสงแบบโคโรมาติก

Broadband Partial Reflection Coatings

บีมสปลิตเตอร์ชนิดนี้ประสิทธิภาพในทุกความยาวคลื่น มีการตอบสนองทั้งสองโพลาริซชันที่ทุกความยาวคลื่น รัศมีโพลาไรเซชันของทั้งสองจะต่างกัน 70 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการนำเอาบีมสปลิตเตอร์นี้ไปใช้งานจะต้องคำนึงถึงโพลาริเซชันด้วย

Laser Line - Non Polarizing Coating

บีมสปลิตเตอร์ในลักษณะนี้ มีการจำกัดโพลาริซชันที่ข่านความยาวคลื่นหนึ่ง โดยข่านความยาวคลื่นอื่นผ่านไปได้

ไฟเบอร์ออปติคัลสปลิตเตอร์

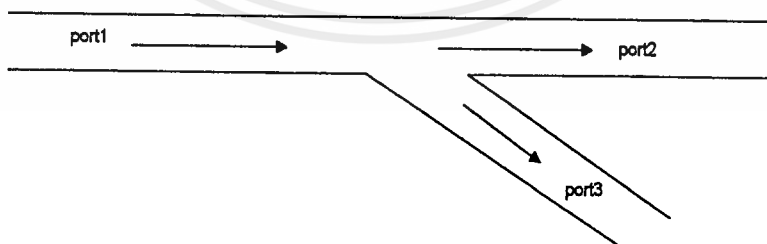
สำหรับโครงการนี้ สปลิตเตอร์ถือว่าเป็นหัวใจหลักอันหนึ่งในการทำการมัลติเพล็กซ์ทางแสง สปลิตเตอร์จะทำหน้าที่สองอย่างด้วยกันคือ

- ทำการรวมแสงจากเส้นใยแสงซึ่งมีความยาวคลื่นแตกต่างกันรวมเข้าด้วยกัน ในการรวมแสงลักษณะนี้ข้อมูลในแต่ละความยาวคลื่นจะไม่มีมารบกวนกัน แสงในแต่ละเส้นจะถูกรวมกันแล้วส่งไปในเส้นใยแสงเพียงเส้นเดียวหรือหลายๆ ทิศทางแล้วแต่เน็ทเวอร์คที่เชื่อมต่ออยู่

- ทำการแยกเส้นทางเดินของแสงที่มีหลายความยาวคลื่น เพื่อทำการตีเทคข้อมูลในแต่ละความยาวคลื่นออกมา

สปลิตเตอร์ถูกอธิบายอย่างกว้างๆ คุณสมบัติของสปลิตเตอร์จะไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นภายในข่านการทำงาน สปลิตเตอร์จะถูกใช้ในการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งข่านความยาวคลื่น ออกแบบขึ้นมาเพื่อทำการสปลิตแสงระหว่างพอร์ทซึ่งเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น จุดประสงค์ของสปลิตเตอร์จะใช้ในการแยกหรือรวมสัญญาณแสงที่ถูกส่งในรูปของความแตกต่างของความยาวคลื่นในระบบ WDM

ที - สปลิตเตอร์ (T - COUPLER)



รูปที่ 2.28 แสดงลักษณะของทีสปลิตเตอร์

ทีสปลิตเตอร์เป็นสปลิตเตอร์ที่มีเอาท์พุท 2 พอร์ท คือ พอร์ท 2 กับ พอร์ท 3 หลังงานที่แยกไปในแต่ละพอร์ทจะไม่เท่ากัน พอร์ท 2 จะมีพลังงานแสงมากกว่าหรือน้อยกว่าพอร์ท 3 ก็ได้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสปลิตเตอร์ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการบอกค่าพลังงานแสงในแต่ละพอร์ทคือ เพาเวอร์ดิวิชัน (POWER DIVISION) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นาไปเซปรีไซเคิลในด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ สปลิตติงเรโซ (SPLITTING RATIO) จะอยู่ในหน่วยของเดซิเบลหรือเปอร์เซ็นต์ เช่น คัปเปิลเลอร์ 80 / 20 SPLIT หมายถึง 80 เปอร์เซ็นต์ไปที่พอร์ท 2 และ 20 เปอร์เซ็นต์ไปที่พอร์ท 3 ถ้าเขียนให้อยู่ในรูปเพาเวอร์เรโซ จะได้ว่า

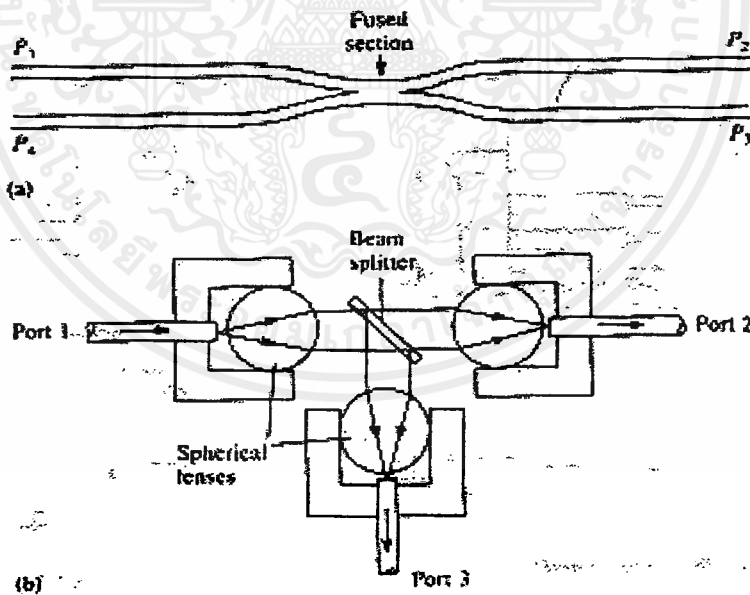
$$P_2 / P_1 = 0.8 = -0.97 \quad \text{เดซิเบล}$$

$$P_3 / P_1 = 0.2 = -6.9 \quad \text{เดซิเบล}$$

พารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับ ที่คัปเปิลเลอร์คือ ไคเรคตีวิตี (DIRECTIVITY) การส่งระหว่างพอร์ทในที่คัปเปิลเลอร์มักจะมีไคเรคตีวิตี ในกรณีที่คัปเปิลเลอร์เป็นแบบ 80 / 20 SPLIT ทางทฤษฎีทางพอร์ท 3 ควรจะมีพลังงานแสงเพียง 0.2 เมื่อเทียบกับพอร์ท 1 ในทางปฏิบัติจะมีพลังงานแสงบางส่วนทางพอร์ท 2 เข้ามาที่พอร์ท 3 ด้วยซึ่งเป็นอัตราส่วน P_3 / P_2 ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้มีค่านี้เรียกว่าไคเรคตีวิตี แต่อัตราส่วน P_2 / P_3 มีค่าน้อยมาก ค่าไคเรคตีวิตี ใช้ในการอธิบายอัตราส่วนพลังงานระหว่างพอร์ทหนึ่งกับพอร์ทอื่นๆ ซึ่งควรจะเป็นศูนย์ ไม่ควรมีเพาเวอร์ที่ออกจากพอร์ท 2 เข้าไปในพอร์ท 3 หรือ ไม่มีพลังงานที่เคลื่อนย้ายระหว่าง 2 พอร์ทที่อยู่ด้านเดียวกัน

ค่าการสูญเสียรวมทั้งหมดอธิบายในรูปของเอคเซสลอส (EXCESS LOSS) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่าง เอาท์พุททั้งหมดค่ออินพุท

ที่คัปเปิลเลอร์ แบ่งกว้างๆ ได้ 2 ชนิด ดังรูป



รูปที่ 2.29 ที่-คัปเปิลเลอร์

ฟิวส์คัปเปิลเลอร์ (FUSED COUPLER)

โครงสร้างของฟิวส์คัปเปิลเลอร์ประกอบด้วย พอร์ทอินพุท 2 พอร์ท และพอร์ทเอาต์พุท 2 พอร์ท ทั้ง 4 พอร์ทเกิดจากการนำเส้นใยแสง 2 เส้นมาทำการเชื่อมเข้าด้วยกัน โดยการหลอมส่วนของแกนของเส้นใยแสงให้ติดกัน ดังรูป 2.29 (a) ขนาดของการคัปปลิงขึ้นอยู่กับระยะของช่องเปิดระหว่างแกนของเส้นใยแสง ถ้าต้องการให้มีการคัปปลิงเป็นจำนวนมากจะต้องเปิดช่องระหว่างแกนของเส้นใยแสงให้กว้างขึ้น การป้อนแสงขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งานในส่วนของกรณีการมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นของแสงนั้น จะทำการป้อนแสงที่มีความยาวคลื่น 2 ความยาวคลื่นเข้าทางด้านเดียวกัน ได้แก่ พอร์ท 1 กับ พอร์ท 4 หรือพอร์ท 2 กับ พอร์ท 3 สมมติว่าป้อนแสง 2 ความยาวคลื่นเข้าทางด้านพอร์ท 1 และพอร์ท 4 ตามลำดับ เมื่อแสงทั้ง 2 ส่วนผ่านจุดที่มีการหลอมแกนเข้าด้วยกันแสงทั้ง 2 ความยาวคลื่นจะถูกรวมกัน ทั้งนี้และทั้งนั้น ข้อมูลที่ซ่อนอยู่ในแต่ละความยาวคลื่นจะไม่มีกรบกวนกัน เมื่อแสงผ่านจุดเชื่อมค่อนี้แล้วจะแยกเข้าสู่พอร์ท 2 และ พอร์ท 3 ซึ่งในแต่ละพอร์ทจะประกอบไปด้วยความยาวคลื่น 2 ความยาวคลื่น เหมือนกับทางด้านอินพุท ในระบบ WDM หากเราต้องการส่งข้อมูลโดยผ่านเส้นใยแสงเพียงเส้นเดียวโดยให้ได้ข้อมูลทั้ง 2 ช่องสัญญาณก็สามารถทำได้ โดยการเลือกพอร์ทใดพอร์ทหนึ่งทางด้านเอาต์พุทเพื่อนำไปเชื่อมต่อกับเส้นใยแสง สำหรับการส่งก็สามารถส่งข้อมูลได้ทั้ง 2 ช่องสัญญาณครบถ้วน

ในส่วนของกรณีเทคโนโลยีที่ซ่อนอยู่ในแสงทั้ง 2 ช่องสัญญาณ จำเป็นต้องทำการแบ่งพลังงานแสงในเส้นใยแสงออกเป็น 2 ส่วนในส่วนนี้เราสามารถที่จะนำหลักการของคัปเปิลเลอร์มาใช้ได้ โดยสมมติว่าคลื่นแสงที่ถูกส่งมาจากด้านส่งเข้าทางพอร์ท 1 โดยปล่อยพอร์ท 4 ไว้ เมื่อแสงผ่านจุดเชื่อมต่อของแกนจะถูกแยกออกเป็น 2 ทิศทางเข้าสู่พอร์ท 2 และพอร์ท 3 ในแต่ละพอร์ทยังคงประกอบด้วย 2 ความยาวคลื่น ในการแยกความยาวคลื่นเพื่อทำการดีเทคสัญญาณนั้น จะใช้ออปติคอลลิตเตอร์ทำการฟิลเตอร์ความยาวคลื่นในแต่ละความยาวคลื่นออกจากกันก่อนเข้าดีเทคเตอร์แต่ละตัว

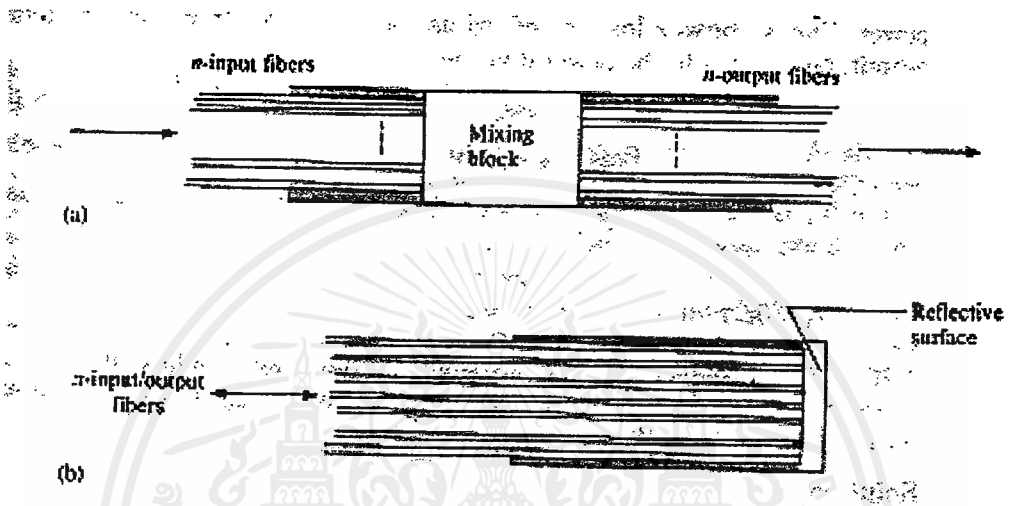
ในส่วนของกรณีการมัลติเพล็กซ์นั้น หากพิจารณาพลังงานแสงในแต่ละพอร์ทจะพบว่า ถ้าพิจารณาจากรูปแบบของคัปเปิลเลอร์ ค่าพาวเวอร์คิวชัน หรือสเปกตรัมเชิงเรขาคณิตขึ้นอยู่กับพลังงานแสงที่พอร์ทอินพุททั้งสอง และปริมาณการคัปปลิง ถ้ากำหนดให้พลังงานที่เข้าทางพอร์ท 1 และ พอร์ท 4 มีขนาดเท่ากัน และให้อัตราส่วนระหว่าง $P_2/P_1 = P_3/P_4$ หรือ อัตราส่วนระหว่าง $P_3/P_1 = P_2/P_4$ แล้วพลังงานแสงที่พอร์ท 2 และพอร์ท 3 จะมีปริมาณเท่ากัน หากไม่พิจารณาถึงพลังงานที่สูญเสียใดๆ หรือไม่มีค่าไคเรคตีวิตี้ จะพบว่า พลังงานในแต่ละพอร์ททั้งทางด้านอินพุทและเอาต์พุทมีปริมาณเท่ากัน แต่ในความเป็นจริงจะมีพลังงานส่วนหนึ่งที่สูญเสียไป ไม่ว่าจะเป็นค่าไคเรคตีวิตี้ ค่าการสูญเสียในการคัปปลิง รวมทั้งการสูญเสียในการเปลี่ยนแปลงเส้นทางเดินของแสงซึ่งจากที่ได้ศึกษาในส่วนของโหมดการเดินทางของแสงในเส้นใยแสงจะพบว่า ตรงจุดที่มีการเชื่อมต่อแกนของเส้นใยแสงเข้าด้วยกันจะทำให้เกิดการ โหมดและเฟสของคลื่นแสง

ในส่วนของกรณีการแยกแสงในชุดมัลติเพล็กซ์ พลังงานแสงจะถูกแยกเป็นสองส่วน เมื่อไม่คิดถึงการสูญเสียแล้วพลังงานแสงจะเป็นครึ่งหนึ่งของอินพุท ดังนั้นหากอินพุทแสงมีพลังงานแสงค่าจะทำให้มีความยากในการที่จะดีเทคสัญญาณออกจากคลื่นแสง

เอกแพนค์บีมสปลิตเตอร์ (EXPANDED BEAM SPLITTER)

โครงสร้างของคัปเปิลเลอร์ชนิดนี้ประกอบด้วยเลนส์และบีมสปลิตเตอร์ทำการรวมและแยกลำแสงไปในทิศทางที่ต้องการ ดังรูป 2.29 (b) จากคุณสมบัติของเลนส์กลม จะทำการหักเหลำแสงจากแหล่งกำเนิดแสงให้อยู่ในระนาบเพื่อทำมุมกับบีมสปลิตเตอร์ให้ได้มุมหักเหของลำแสงไปในทิศทางที่ต้องการ

สตาร์คัปเปิลเลอร์ (STAR COUPLER)



รูปที่ 2.30 สตาร์คัปเปิลเลอร์

โครงสร้างพื้นฐานของสตาร์คัปเปิลเลอร์ จะประกอบด้วยพอร์ทอินพุตและพอร์ทเอาต์พุตเป็นจำนวนมาก ในส่วนของการส่งสัญญาณแสงในแต่ละอินพุตจะถูกป้อนเข้าไปในบล็อกรวมแสงทั้งหมดจากนั้นแสงจะถูกคัปปลิงออกทางเอาต์พุต ในแต่ละเส้นใยแสงทางเอาต์พุตจะประกอบด้วยความยาวคลื่นทุกความยาวคลื่นที่ป้อนเข้าไปทางอินพุต พลังงานแสงที่ถูกแจกจ่ายไปในเส้นใยแสงในแต่ละเส้นขึ้นอยู่กับจำนวนของเส้นใยแสงทางด้านเอาต์พุต สำหรับคัปเปิลเลอร์ขนาด $n \times n$ ซึ่งมีเส้นใยแสงทางด้านอินพุต n เส้น และเส้นใยแสงทางด้านเอาต์พุต n เส้น พลังงานแสงในแต่ละเส้นทางด้านเอาต์พุตจะเท่ากับ $1/n$ ของพลังงานแสงทางด้านอินพุต ใน 1 เส้น

$$P_o = P_{in}/n$$

P_o เป็นพลังงานแสงในเส้นใยแสงทางด้านเอาต์พุต 1 เส้น ระดับเพนเวอร์ดิชันในหน่วยเดซิเบลของสตาร์คัปเปิลเลอร์จะเท่ากับ

$$PD_{st} = -10 \times \text{Log} (1/n)$$

ถ้ามองโดยรวมแล้วถ้าไม่คิดค่าการสูญเสียพลังงานรวมทางด้านเอาท์ทั้งหมดอาจจะเท่ากับพลังงานทางด้านอินพุตที่ป้อนเข้าไป ในความเป็นจริงจะมีการสูญเสียภายในตัวคัปเปิลเลอร์เอง ซึ่งเรียกว่า แอคเซสเพาเวอร์ ลอส ซึ่งหาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{LOSS}_{EX} &= P_o / P_{in} \\ &= -10 \text{ Log } P_o / P_{in} \end{aligned}$$

โดย P_o เป็นพลังงานทั้งหมดในเส้นใยแสงทางด้านเอาท์พุท

ในการคัปปลิงแสงให้เข้าสู่เส้นใยแสงแต่ละเส้นทางทางด้านเอาท์พุท ในความเป็นจริงจะมีการสะท้อนกลับเข้าสู่เส้นใยแสงทางด้านอินพุตได้ที่เรียกว่าครอสทอล์ค (CROSSTALK) ในการสื่อสารจะกำหนดคิในรูปของเดซิเบล

คัปเปิลเลอร์สามารถที่จะแยกย่อยไปได้อีกหลายชนิดขึ้นอยู่กับการใช้งาน สำหรับงานที่ใช้ในการศึกษาการทำงานและการสูญเสียต่างๆ นอกจากจะใช้ที่คัปเปิลเลอร์แล้วยังจะคัปเปิลเลอร์อีกชนิดหนึ่งได้แก่ ไคเรคชันนอลคัปเปิลเลอร์ ซึ่งออกแบบมาจากพิวส์คัปเปิลเลอร์โดยมีพอร์ทเช่นเดียวกัน พารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาสำหรับไคเรคชันนอลคัปเปิลเลอร์ประกอบด้วย

1. การสูญเสียในการส่งผ่าน (THROUGHPUT LOSS) เป็นค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นที่พอร์ท 2 เมื่อเทียบกับพอร์ท 1

$$\text{LOSS}_{\text{THROUGH}} = P_2 / P_1$$

2. การสูญเสียในการคัปปลิง (COUPLING LOSS) เป็นค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นที่พอร์ท 3 เมื่อเทียบกับ พอร์ท 1

$$\text{LOSS}_{\text{COUPLING}} = P_3 / P_1$$

3. การสูญเสียแบบไคเรคชันนอล (DIRECTIONAL LOSS) เป็นการสูญเสียที่เกิดขึ้นที่พอร์ท 4 เมื่อเทียบกับพอร์ท 1

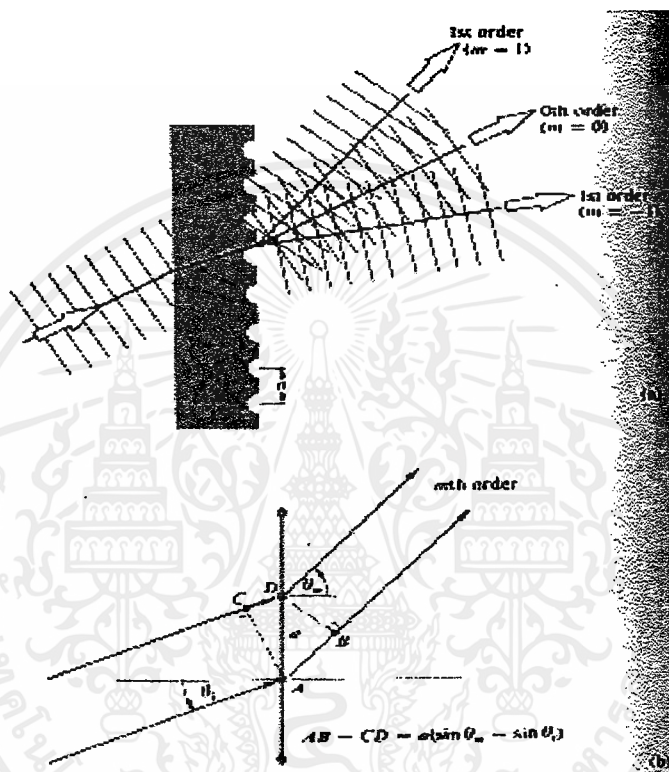
$$\text{LOSS}_{\text{DIRECT}} = P_4 / P_1$$

4. การสูญเสียรวม (EXCESS LOSS) เป็นการสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นทางด้านเอาท์พุทเมื่อเทียบกับพอร์ท 1

$$\text{LOSS}'_{\text{EXCESS}} = (P_2 + P_3) / P_1$$

เกรตติ้งเลี้ยวเบน (Diffraction Grating)

เกรตติ้งเลี้ยวเบนหรือดิฟเฟรคชันเกรตติ้งเป็นอุปกรณ์ในการแยกความยาวคลื่น โดยอาศัยคุณสมบัติการเลี้ยวเบนของคลื่นที่ผ่านสลิต (slit) เกรตติ้งประกอบด้วยจำนวนของสลิตหลายช่องที่มีระยะห่างระหว่างช่อง (วัดที่จุดกึ่งกลางช่อง) เท่ากัน เมื่อพิจารณาการเลี้ยวเบนของคลื่นที่ผ่านสลิต จะมีลักษณะดังรูป



รูปที่ 2.31 เกรตติ้งเลี้ยวเบน

จากรูป จะเห็นว่าปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของคลื่นที่ผ่านช่องสลิตจะเกิดโหมดในออเดอร์ต่างๆ สำหรับโหมดของคลื่นที่ผ่านสลิตแล้วไม่มีการเลี้ยวเบน เรียกว่า โหมดอันดับศูนย์ (zero-order mode; $m=0$) สำหรับการเลี้ยวเบนของคลื่นสามารถคำนวณได้จาก

$$d \sin \theta_m = m \lambda$$

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

d = ระยะระหว่างช่องสลิตมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

θ_m = มุมของการเลี้ยวเบนของคลื่นจากแนวตั้งฉาก

สำหรับเกรตติ้งเลี้ยวเบน ร่องหรือช่องสำหรับให้คลื่นเกิดการเลี้ยวเบนจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคาบ ขนาดของคลื่นที่ผ่านเกรตติ้ง บางครั้งเราเรียกว่า ทรานมิชชันเกรตติ้ง คลื่นแสงที่ผ่านช่องของท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานมิสชันเกรตติ้งจะเกิดการเลี้ยวเบนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่า d และขนาดของความยาวคลื่นที่ตกกระทบ โดยจะแปรผันตามความยาวคลื่นและแปรผกผันกับค่า d ความสัมพันธ์ระหว่างค่า d กับ λ หาได้จาก

$$d (\sin\theta_m - \sin\theta_i) = m\lambda$$

ถ้าลำแสงที่ตกกระทบตั้งฉากกับเกรตติ้งจะได้มุม $\theta_i = 0$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$d \sin\theta_m = m\lambda$$

$$\sin\theta_m = \frac{m\lambda}{d}$$

มุม θ_m ในมุมที่เบนไปจากแนวตั้งฉากของเกรตติ้ง พลังงานส่วนมากจะตกอยู่ที่โหมดอันดับต่ำๆ เมื่อพิจารณาที่โหมด $m = 0$ จะได้ว่า

$$\sin\theta_m = 0$$

$$\theta_m = 0 \text{ องศา}$$

นั่นคือว่าที่โหมดลำดับศูนย์คลื่นจะไม่เกิดการเลี้ยวเบนทุกความยาวคลื่นที่ใช้

ระบบการสื่อสารเส้นใยแสง

ระบบการสื่อสารเส้นใยแสงนั้น ต่างกับระบบการสื่อสารไฟฟ้าโดยที่ใช้สายเคเบิลเส้นใยแสงเป็นตัวกลางในการส่งและที่ปลายทั้งสองด้านจะมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้าให้เป็นแสงและอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแสงให้เป็นไฟฟ้า

ระบบมัลติเพล็กซ์

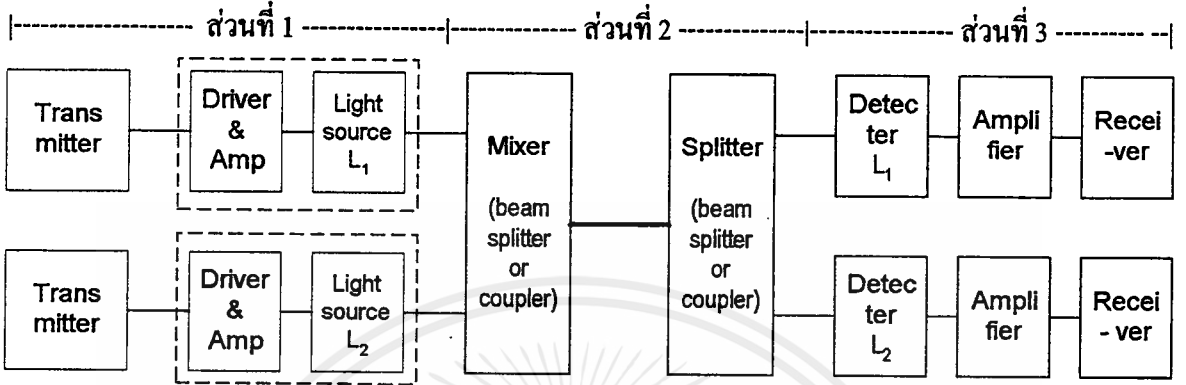
จากแนวความคิดที่ว่า ถ้าสายส่งสามารถส่งข่าวสารได้มากเท่าใดจะเป็นการประหยัด ในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสงก็เช่นเดียวกัน มีการทำมัลติเพล็กซ์ ชนิดต่างๆ เหมือนกับระบบการสื่อสารที่ใช้สายโลหะ การทำมัลติเพล็กซ์นั้นแบ่งออกเป็นพวกใหญ่ๆ ได้เป็น 4 พวกคือ สเปซดิวิชันมัลติเพล็กซ์ (SPACE DIVISION MULTIPLEX), ฟริควเอนซีดิวิชันมัลติเพล็กซ์ (FREQUENCY DIVISION MULTIPLEX), ไทม์ดิวิชันมัลติเพล็กซ์ (TIME DIVISION MULTIPLEX) และ เวฟเล็งธ์ดิวิชันมัลติเพล็กซ์ (WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEX)

สเปซดิวิชันมัลติเพล็กซ์ หมายถึงในสายเคเบิลเส้นหนึ่งมีเส้นใยแสงจำนวนมาก เป็นวิธีที่ทำให้ส่งได้เป็นจำนวนมากต่อสายเคเบิลหนึ่งเส้น ส่วนฟริควเอนซีดิวิชันมัลติเพล็กซ์ และ ไทม์ดิวิชันมัลติเพล็กซ์ เป็นวิธีที่ใช้กันอยู่ในระบบอนาลอก และแบบดิจิทัลในสายโลหะ สำหรับระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสง สัญญาณจำนวนมากที่จะถูกส่งไปนั้นจะถูกทำเป็นมัลติเพล็กซ์ในขั้นตอนของสัญญาณไฟฟ้า

วิธีสุดท้ายคือ เวฟเล็งธ์ดิวิชันมัลติเพล็กซ์ เป็นวิธีที่ส่งแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันจำนวนมากไปในเส้นใยแสงเส้นหนึ่ง สำหรับวิธีนี้โดยการประกอบผสมชุดมัลติเพล็กซ์แสงและชุดดีมัลติเพล็กซ์แสง ส่งได้ทั้งระบบคู่เพล็กซ์และระบบซิมเพล็กซ์ ระยะทางของการส่งหรือระยะห่างของรีพีทเตอร์ถูกกำหนดโดยอินเสิร์ทชันลอส (INSERTION LOSS) ของชุดมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ การลดราคาลงโดยการลดจำนวนเส้นของเส้นใยแสงและอื่นๆ แล้วจึงกำหนด การใช้ที่เหมาะสมของเวฟเล็งธ์ดิวิชันมัลติเพล็กซ์ อนึ่งข้อดีก็คือ

สัญญาณไฟฟ้าที่ส่งไปกับความยาวคลื่นแต่ละอัน ไม่ว่าจะเป็นอนาลอกหรือดิจิทัล สามารถเปลี่ยนได้ง่าย ซึ่งเป็นความยืดหยุ่นของการสร้างระบบ

รูปแบบของระบบมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น มีโครงสร้าง ดังรูป

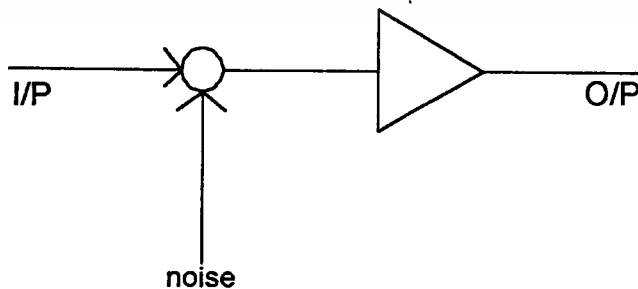


รูปที่ 2.32 ระบบมัลติเพล็กซ์โดยการแบ่งย่านความยาวคลื่น

มอดูเลชัน

ดิจิทัลมอดูเลชัน

การสื่อสารในปัจจุบัน ขบวนการทางดิจิทัลถูกนำมาใช้เกือบทุกด้านเนื่องจากมีข้อดีกว่าระบบอนาลอกเกือบทุกด้าน โดยเฉพาะการสร้างภูมิคุ้มกันสัญญาณรบกวนได้ดีกว่า รวมทั้งระบบสามารถสร้างสัญญาณเดิมกลับมาได้โดยตัวทวนสัญญาณ การส่งสัญญาณในระบบดิจิทัลการหาค่าความผิดพลาดจะอธิบายในรูปของ บิตเออร์เรท (Bit Error Rate ; BER) เช่น BER = 10⁻⁸ จะพิจารณาว่าดี แต่ถ้า BER = 10⁻³ จะพิจารณาว่าระบบนั้นไม่ดี ในเทอมของ เออร์เรท หากได้จากอัตราส่วนของของจำนวนบิตที่ผิดพลาดต่อจำนวนบิตทั้งหมด หรืออัตราส่วนของบิตที่ผิดพลาดต่อจำนวนบิตที่ถูกส่งในเวลาหนึ่ง ระบบดิจิทัลที่ถูกทำให้เกิดความผิดพลาดเนื่องจากขบวนการพัลส์ ที่ส่งถูกรบกวนโดย ไวท์ เกาส์เซียน น้อยส์ ดังรูป



รูปที่ 2.33 การรบกวนของสัญญาณรบกวนแบบไวท์เกาส์เซียน

การเข้ารหัสของข้อมูลก่อนทำการส่ง เพื่อเหตุผลดังนี้

1. เพื่อเพิ่มความจุข้อมูลข่าวสารของระบบ
2. เพื่อลดการตรวจสอบความผิดพลาดและเพิ่มความถูกต้อง
3. ลดปัญหาในการส่ง

ความจุของช่องสัญญาณส่งผ่านข้อมูล (Channel Capacity)

มีอุปสรรคหลายอย่างที่ทำให้สัญญาณผิดเพี้ยนหรือถูกทำลายไป ปัญหาที่มีอยู่เมื่อข้อบกพร่องต่างๆ เกิดขึ้นแล้วก็จะไปจำกัดอัตราข้อมูลในการสื่อสาร อัตราที่ข้อมูลสามารถส่งผ่านไปได้นบนเส้นทางการสื่อสารที่กำหนดให้หรือช่องทางเดินสัญญาณ ภายใต้สภาวะที่กำหนดจะเรียกว่า ความจุของช่องสัญญาณ

เริ่มต้น เรามาลองพิจารณาในกรณีที่มีช่องสัญญาณ ไม่ถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวนในสภาวะเช่นนี้ การจำกัดของอัตราข้อมูลจะขึ้นอยู่กับแบนด์วิดท์ของสัญญาณ สูตรของการจำกัดจากสมมติฐานของ Nyquist กำหนดว่า ถ้าอัตราของการส่งผ่านสัญญาณเท่ากับ $2W$ แล้วแบนด์วิดท์ที่เพียงพอสำหรับการส่งผ่านข้อมูลจะต้องมีค่ามากกว่า W ในทางกลับกันก็จะเป็นจริงด้วยคือ ถ้ากำหนดให้ย่านความถี่ของสัญญาณ (แบนด์วิดท์) เท่ากับ W อัตราสัญญาณข้อมูลสูงสุดที่สัญญาณสามารถนำไปคือ $2W$ ข้อจำกัดอันนี้เกิดขึ้นเพราะอิทธิพลของอินเตอร์ซิมโบล์ อินเตอร์เฟอเรนซ์ ซึ่งเกิดขึ้นจากความผิดเพี้ยนเนื่องจากความล่าช้า

กล่าวถึงอัตราสัญญาณ ถ้าสัญญาณถูกส่งไปแบบไบนารีแล้ว อัตราข้อมูลที่สามารถจะใช้ได้กับสัญญาณที่มีแบนด์วิดท์ W เฮิร์ต ก็คือ $2W$ บิตต่อวินาที ตัวอย่างเช่นถ้าเราสนใจใช้ช่องทางเดินสัญญาณเสียงในการส่งผ่านข้อมูลดิจิทัล โดยสมมติให้สัญญาณมีแบนด์วิดท์ 3100 เฮิร์ต แล้วจะได้ว่าความจุของช่องสัญญาณ C จะมีค่าเท่ากับ $2W$ เท่ากับ 6200 บิตต่อวินาที อย่างไรก็ตามสัญญาณที่ใช้ส่งข้อมูลอาจมีมากกว่า 2 ระดับ นั่นก็คือว่า สัญญาณแต่ละตัวสามารถแทนข้อมูลได้มากกว่า 1 บิต ตัวอย่างเช่น ถ้ามีระดับโวลเตจอยู่ 4 ระดับ แทนสัญญาณ แต่ละสัญญาณสามารถแทนข้อมูลได้ 2 บิต โดยการใช้สัญญาณหลายระดับสูตรของ Nyquist จะกลายเป็น

$$C = 2W \log_2 M$$

โดยที่ M คือจำนวนของระดับสัญญาณดิจิทัลที่ใช้ เช่น ในกรณีที่ $M = 8$ C ก็จะมีค่าเท่ากับ 18,600 บิตต่อวินาที

ถ้ากำหนดแบนด์วิดท์มาให้ อัตราข้อมูลสามารถที่จะเพิ่มได้โดยการเพิ่มจำนวนของระดับสัญญาณอย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราข้อมูลดังกล่าว อาจจะก่อให้เกิดภาวะแก่ตัวรับข้อมูลได้ เพราะตัวรับอาจทำงานหนักขึ้นในการแยกแยะสัญญาณแต่ละระดับ แล้วเปลี่ยนให้เป็นบิตข้อมูลและอาจมีความผิดพลาดจากสัญญาณรบกวนจึงทำให้อัตราการส่งถูกจำกัดลง ในสภาวะที่สัญญาณมีอัตราข้อมูลสูงๆ จะเป็นสภาวะที่ข้อมูลอ่อนแอสัญญาณรบกวนสามารถเข้ามาสร้างความเสียหายทำลายข้อมูลได้ง่าย สำหรับในสภาวะที่มีสัญญาณรบกวน เราจะต้องเพิ่มความแรงของสัญญาณให้มากกว่าปกติเพื่อที่จะได้ไม่ถูกทำลาย ตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับเรื่องนี้คือ อัตราส่วนช่องสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal-to-noise ratio) ซึ่งคืออัตราส่วนของกำลังงานของสัญญาณต่อกำลังงานของสัญญาณรบกวน และมักจะแสดงอัตราส่วนดังกล่าวในหน่วยเดซิเบล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(S/N)_{dB} = 10 \log \text{กำลังงานของสัญญาณ} / \text{กำลังงานของสัญญาณรบกวน}$$

อัตราส่วนนี้แสดงให้เห็นถึงจำนวนที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณที่มากกว่าระดับของสัญญาณรบกวน ถ้าอัตราส่วนของ S/N มีค่าสูงๆ หมายความว่าคุณภาพของสัญญาณก็จะสูงและจำนวนเครื่องทวนสัญญาณในระหว่างคั่นทางและปลายทางก็จะมีจำนวนจำเป็นที่จะต้องใช้น้อยลง

อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีความสำคัญมากต่อการส่งผ่านข้อมูลดิจิทัลช่วยให้เราสามารถหาขอบเขตของอัตราการส่งข้อมูลได้ ผลจากทฤษฎีข่าวสารจะได้ว่า ความจุของช่องทางเดินสัญญาณสูงสุดมีค่าเท่ากับ

$$C = W \log_2 (1 + S/N)$$

โดยที่ W คือ แบนด์วิธของช่องทางเดินสัญญาณมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ ยกตัวอย่างช่องทางเดินสัญญาณเสียงที่ใช้ส่งผ่านข้อมูลโดยอาศัยโมเด็ม มีแบนด์วิธเท่ากับ 3100 เฮิรตซ์ และอัตราความแรงสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสำหรับสายคือ 30 dB หรือเป็นอัตราส่วน 1000:1 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} C &= 3100 \log_2 (1 + 1000) \\ &= 30,894 \text{ บิตต่อวินาที} \end{aligned}$$

ค่าที่ได้มานี้เป็นค่าสูงสุดที่ได้จากทฤษฎี อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ ความจุดังกล่าวจะมีค่าต่ำกว่านี้ก็เนื่องมาจากสูตรที่ใช้คำนวณดังกล่าวเป็นสูตรที่สมมติว่าสัญญาณรบกวนเป็นสัญญาณรบกวนสีขาวหรือสัญญาณรบกวนจากคลื่นความร้อน และก็ไม่รวมสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์กับการผิดเพี้ยนเนื่องจากความล่าช้าเข้าไปด้วย ในระดับของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั้น เราสามารถที่จะเพิ่มอัตราข้อมูลได้โดยการเพิ่มความแรงของสัญญาณหรือไม่ก็เพิ่มแบนด์วิธ แต่อย่างไรก็ตามในขณะที่ความแรงของสัญญาณเพิ่มขึ้น ก็อาจทำให้เกิดสภาวะความไม่เชิงเส้นขึ้นมาได้ในระบบ ในขณะที่เดียวกันก็จะทำให้สัญญาณรบกวนจากการเกิดอินเตอร์มอดูเลชันเพิ่มขึ้นด้วย

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับ S/N ซึ่งจะทำให้เราสะดวกในการกำหนดค่าอัตราข้อมูลและอัตราความผิดพลาดตัวแปรนั้นก็คืออัตราส่วนกำลังงานของสัญญาณ 1 บิตต่อกำลังงานของสัญญาณรบกวนในแบนด์วิธ E_b/N_0 เมื่อพิจารณาสัญญาณอนาล็อกหรือดิจิทัลก็ได้ที่นำข้อมูลดิจิทัลไปนารีส่งผ่านไปด้วยอัตราแน่นอน R บิต เพราะ 1 วัตต์ = 1 จูลต่อวินาที กำลังงานของสัญญาณในหนึ่งบิตของสัญญาณที่กำหนดให้เท่ากับ $R_b = ST_b$ โดยที่ S คือกำลังงานของสัญญาณและ T_b คือเวลาที่ใช้ในการส่งบิต 1 บิต อัตราข้อมูลก็จะมีค่าเท่ากับ $R = 1/T_b$ ดังนั้น

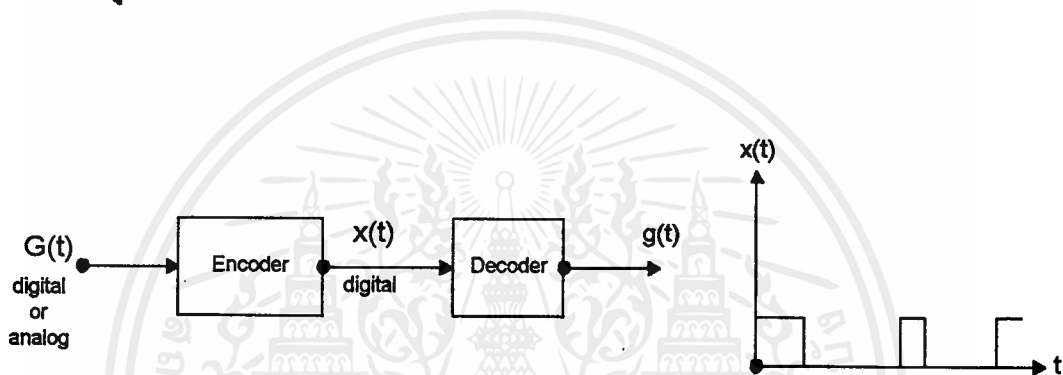
$$E_b/N_0 = (S/R)/N_0 = S/KTR$$

หรือแปลงให้เป็นหน่วยเดซิเบลจะได้ว่า

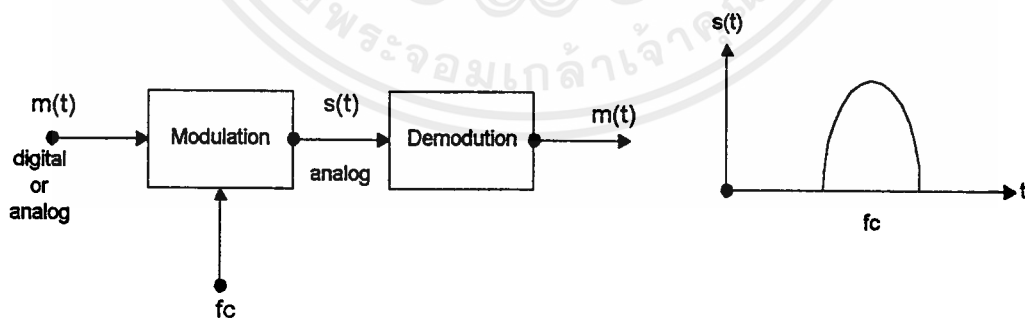
$$E_b/N_0 = 10 \log S - 10 \log R + 228.6 \text{ dBW} - 10 \log T$$

อัตราส่วนของ E_b/N_0 เป็นอัตราส่วนที่สำคัญ เพราะอัตราความผิดพลาดของบิตสำหรับข้อมูลดิจิทัลนั้นนิยามกำหนดเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนนี้ เมื่อ E_b/N_0 ถูกกำหนดมาให้มีค่าคงที่ และต้องการที่จะส่งให้มีอัตราความผิดพลาดน้อยตามค่าที่กำหนด ก็สามารถที่จะทำได้ โดยการพิจารณาเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากสมการข้างบนนี้

การเข้ารหัสข้อมูล



รูปที่ 2.34 การเข้ารหัสสัญญาณดิจิทัล



รูปที่ 2.35 รูปแบบการมอดูเลตสัญญาณข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเข้ารหัสและการมอดูเลชัน อาจมีต้นกำเนิดข้อมูลเป็นอนาลอกหรือดิจิทัลก็ได้ และสำหรับเทคนิคในการเข้ารหัสแบบดิจิทัลแล้วรูปแบบของสัญญาณ $x(t)$ จะมีรูปแบบที่หลากหลาย ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับทางเลือกเทคนิควิธีการเข้ารหัสได้เหมาะสมได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการส่งผ่านข้อมูลเข้าไปในตัวกลางนั้นๆ ตัวอย่างการเลือกการเข้ารหัสบางครั้ง เราก็อาจเลือกเพื่อให้สอดคล้องกับแบนด์วิดธ์ หรือเพื่อทำให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด

ในกรณีของสัญญาณอนาลอก คุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญประการหนึ่งของสัญญาณก็คือการมีค่าความถี่ที่คงที่ต่อเนื่อง จึงเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นสัญญาณนำพาข้อมูล และความถี่ของสัญญาณตัวนำพาใดๆ จะถูกเลือกให้เหมาะสมกับตัวกลางที่จะใช้ส่งผ่าน โดยการนำพาข้อมูลอาศัยวิธีการ มอดูเลชัน ซึ่งถือว่าเป็นขบวนการของการเข้ารหัสข้อมูล ไปบนสัญญาณตัวนำพาที่มีความถี่ f_c เทคนิคการมอดูเลชันทั้งหมดจะอยู่ภายใต้ขอบเขตของการทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่เป็นคุณสมบัติเบื้องต้นของสัญญาณซึ่งก็ได้แก่

ขนาด (Amplitude)

ความถี่ (Frequency)

เฟส (Phase)

ในรูป สัญญาณอินพุต $m(t)$ จะมีรูปแบบเป็นดิจิทัลหรืออนาลอกก็ได้โดยเราจะเรียกมันว่า สัญญาณมอดูเลตติ้ง หรือเบสแบนด์ ผลของการมอดูเลตข้อมูลกับสัญญาณตัวนำพาจะได้สัญญาณ $s(t)$ ที่เรียกว่า สัญญาณที่มอดูเลตแล้ว ซึ่งมีแบนด์วิดธ์ที่จำกัด และมีแบนด์ที่สัมพันธ์กับ f_c โดยมี f_c เป็นตำแหน่งศูนย์กลางของแบนด์

การจัดสัญญาณนั้นมี 4 วิธี ตามลักษณะข้อมูลและสัญญาณ ซึ่งข้อพิจารณาในการเลือกใช้วิธีการจัดส่งสัญญาณทั้ง 4 วิธีมีดังต่อไปนี้

- ข้อมูลดิจิทัล, สัญญาณดิจิทัล : โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ที่ใช้ในการเข้ารหัสข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณดิจิทัลจะไม่ยุ่งยากซับซ้อน และมีราคาถูกกว่าอุปกรณ์ที่ใช้มอดูเลตข้อมูลจากดิจิทัลไปเป็นสัญญาณอนาลอก
- ข้อมูลอนาลอก, สัญญาณดิจิทัล : การแปลงข้อมูลอนาลอกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล ได้มีการนำมาใช้ในการส่งผ่านดิจิทัลแบบใหม่กับอุปกรณ์สวิตซ์
- ข้อมูลดิจิทัล, สัญญาณอนาลอก: สำหรับตัวกลางการส่งผ่านบางตัว เช่น ไฟเบอร์ออปติกและตัวกลางแบบไร้สาย จะยอมให้สัญญาณอนาลอกเคลื่อนที่ไปได้เพียงอย่างเดียว
- ข้อมูลอนาลอก, สัญญาณอนาลอก : ข้อมูลอนาลอกในรูปแบบทางไฟฟ้า สามารถส่งผ่านในลักษณะของสัญญาณเบสแบนด์ได้ง่ายและถูก ตัวอย่างอันหนึ่งก็ได้แก่การส่งผ่านเสียงไปในสายโทรศัพท์ ประโยชน์โดยทั่วไปอันหนึ่งของการมอดูเลชันก็คือ การเลื่อนแบนด์วิดธ์ของสัญญาณเบสแบนด์ไปยังอีกส่วนหนึ่งหรืออีกตำแหน่งหนึ่งของสเปกตรัม ด้วยวิธีการดังกล่าวนี้ สัญญาณหลายๆ ตัว โดยที่แต่ละตัวอยู่ในสเปกตรัมที่แตกต่างกัน สามารถใช้ตัวกลางในการส่งผ่านร่วมกันได้ ซึ่งวิธีการนี้เรียกว่า การมัลติเพล็กซ์ทางความถี่

1. ข้อมูล ดิจิตอล, สัญญาณดิจิทัล สัญญาณ เบสแบนด์เป็นสัญญาณที่ได้จากการเข้ารหัสข้อมูลโดยตรง โดยที่ยังไม่มีการมอดูเลชันใดๆ ซึ่งในบางโอกาสสำหรับสัญญาณดิจิทัลตามปกติแล้วโดยทั่วไปเราก็สามารถส่งสัญญาณเบสแบนด์ไปได้โดยไม่ต้องมีการมอดูเลตเช่นสัญญาณโทรศัพท์เป็นต้น ช่องทางเดินของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณการส่งผ่านจะเป็นตัวกำหนดรูปแบบของสัญญาณที่ใช้ในการส่งผ่าน การส่งผ่านแบบเบสแบนด์บ็อกครั้งจะต้องมีการเปลี่ยนรูปแบบของสัญญาณที่ตัวส่งเพื่อให้สัญญาณที่ส่งไปถึงตัวรับได้ และตัวรับสามารถกู้สัญญาณเดิมกลับคืนมาได้ถูกต้อง รูปแบบของสัญญาณดังกล่าวนี้อาจจะกำหนดด้วยรูปร่างหรือรหัส ที่ยังคงรักษาคุณลักษณะเบสแบนด์ของสัญญาณดิจิทัลเอาไว้ได้ เทคนิคที่จะได้กล่าวถึงในที่นี้จะนำไปใช้กับระบบสายเคเบิลทั้งแบบโลหะและเส้นใยนำแสงที่ใช้การส่งผ่านแบบเบสแบนด์

คุณสมบัติต่างๆ ที่สำคัญในการส่งผ่านแบบเบสแบนด์ที่ใช้รูปร่างหรือรหัสของสัญญาณมีดังต่อไปนี้

- ข่าวสารทางเวลาที่เหมาะสม (Adequate timing information)

เทคนิครหัสเบสแบนด์ที่ดี จะต้องทำให้จำนวนการเปลี่ยนแปลงสถานะของข้อมูลมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวงจรสัญญาณเวลาให้ดีขึ้น ทั้งค่าของบิตข้อมูลและสัญลักษณ์ในการซิงค์ (Synchronization)

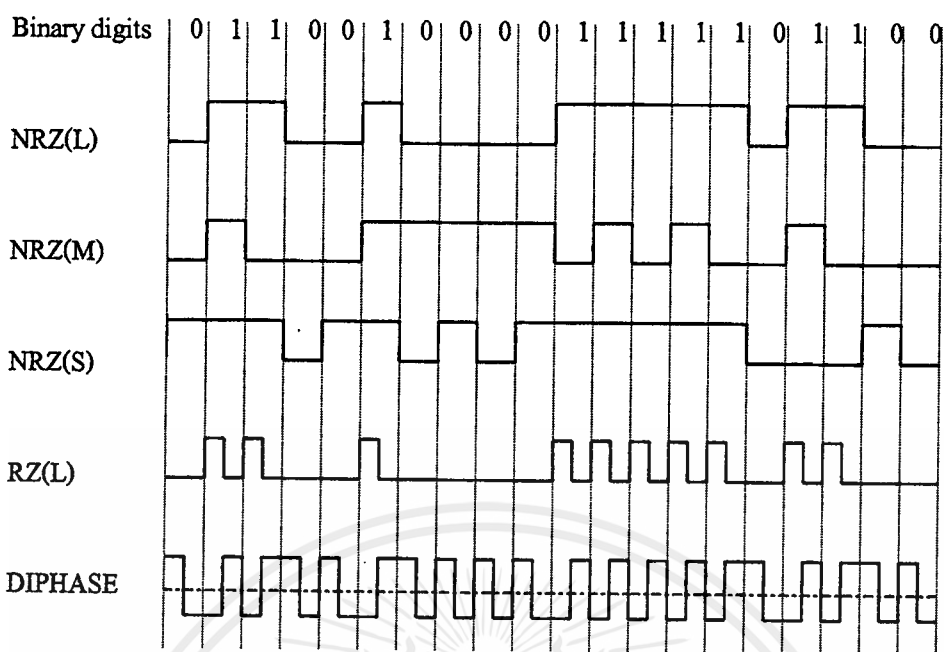
- การตรวจสอบความผิดพลาด และแก้ไขให้ถูกต้อง (Error detection / correction) รหัสที่พิจารณาค่าต่อไปนี้จะมีความสามารถในการตรวจสอบความผิดพลาดอยู่ภายใน ถ้าเรากำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างกลางระดับสัญญาณ ถ้าคุณสมบัติที่กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลง ไปก็จะเป็นการเตือนให้รู้ว่ามี การผิดพลาดเกิดขึ้นแม้ว่าการแก้ไขความผิดพลาดจะไม่สามารถทำได้จากคุณสมบัติเบสแบนด์นี้ก็ตาม

- การลดแบนด์วิดธ์ (Reduced bandwidth) แบนด์ของสัญญาณดิจิทัลจะถูกลดลงได้โดยการใช้โครงสร้างตัวกรองสัญญาณที่ละเอียดแน่นอน กับ การส่งผ่านแบบหลายระดับ หรือเทคนิคการเข้ารหัสบางแบบอาจจะไม่ได้รับความนิยมเพราะเมื่อเข้ารหัสไปแล้วอาจทำให้ S/N ลดลงหรือจำนวนการเกิดการสอดแทรกระหว่างสัญญาณ (Intersymbol interference) มีจำนวนมากขึ้น

- รูปร่างของสเปกตรัม (spectrum shaping) รูปร่างของสเปกตรัมข้อมูลสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยโครงสร้างของการสแกมบิลิ่ง (scrambling) หรือการกรองซึ่งโครงสร้างเหล่านี้จะถูกเลือกให้เหมาะสมระหว่างสัญญาณกับคุณสมบัติของช่องสัญญาณส่งผ่าน หรือกับการควบคุมการแทรกสอดระหว่างช่องทางเดินสัญญาณที่แตกต่างกัน

ชนิดของไบนารี

การเข้ารหัสข้อมูลไบนารีสอดคล้องโดยตรงกับสัญญาณไบนารีที่ใช้ในการส่งผ่าน เงื่อนไขสัญญาณดังกล่าวนี้ทำขึ้นเพื่อให้คุณสมบัติของคลื่นที่เหลื่อมเหมาะสมโดยตรงกับการส่งผ่านบนสายเคเบิล สำหรับในที่นี้จะกล่าวถึงประโยชน์โดยทั่วไปของการส่งผ่านแบบไบนารี รวมทั้งแสดงรูปคลื่น, คุณสมบัติ และโครงสร้างแผนภาพของตัวเข้ารหัสและถอดรหัส



รูปที่ 2.36 รูปแบบของการเข้ารหัสสัญญาณแบบต่างๆ

Nonreturn-to-Zero

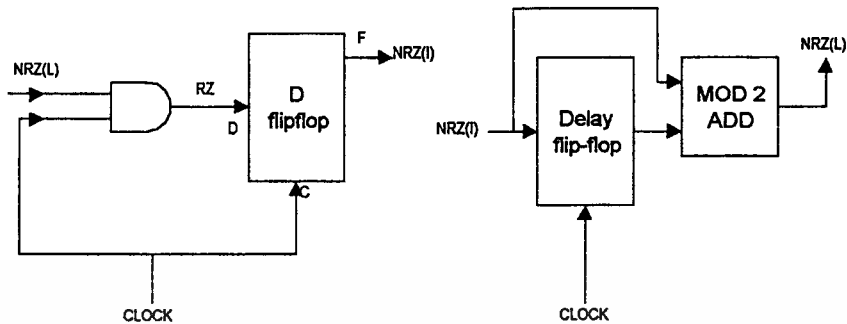
สำหรับ NRZ ระดับของสัญญาณจะถูกรักษาให้คงที่อยู่ที่ 1 ใน 2 ระดับ ของโวลเตจระหว่าง ช่วงเวลา บิท T ถ้าโวลเตจทั้งสองกำหนดให้เป็น 0 และ V โวลต์ แล้วรูปคลื่น NRZ จะเรียกว่าเป็น ขั้วเดียว (unipolar) เพราะว่ามันมีขั้วศักย์ไฟฟ้าเพียงขั้วเดียว สัญญาณนี้มีองค์ประกอบ DC ที่มีค่าไม่เป็นศูนย์คือเป็นครึ่งหนึ่งของ ศักย์ไฟฟ้าบวก สัญญาณ NRZ แบบมีขั้ว ใช้ขั้วสองขั้วคือศักย์ +, - ซึ่งทำให้องค์ประกอบ DC มีค่าเป็นศูนย์

รูปแบบต่างๆ ของ NRZ อธิบายดังในรูป ตัวอย่างเช่น NRZ(L) ระดับศักย์ไฟฟ้าของสัญญาณจะเป็นตัวแสดงค่าของบิท การกำหนดของบิท 0 กับ 1 ขึ้นอยู่กับระดับศักย์ไฟฟ้าสามารถกำหนดได้อย่างอิสระ สำหรับ NRZ(L)

แต่ตามแบบแผนโดยทั่วไปจะกำหนดให้ค่า 1 มีค่าระดับไฟฟ้าสูงๆ และค่า 0 มีค่าระดับระดับศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ รหัส NRZ(L) เป็นรูปแบบของ NRZ ในการส่งผ่านที่รู้จักกันมากที่สุดเพราะระบบรับและส่งทำได้ง่าย ตัวเข้ารหัส/ถอดรหัส ประกอบด้วยตัวขับและตัวรับอย่างง่ายซึ่งคุณสมบัติมาตรฐาน ได้ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐานการเชื่อมต่อระดับ 1

รูปแบบของ NRZ(M) จะใช้การเปลี่ยนระดับสัญญาณแทนค่ามาร์ค (mark) ซึ่งมีค่าเท่ากับลอจิก "1" ส่วนค่าลอจิก "0" จะแทนได้ด้วย การไม่เปลี่ยนระดับของสัญญาณ สำหรับ NRZ(S) ก็จะมีลักษณะทำนองเดียวกันกับ NRZ(M) เพียงแต่จะกลับกันคือ ลอจิก "0" จะแทนด้วยการเปลี่ยนระดับของสัญญาณรูปแบบของ NRZ (M,S) ที่กล่าวมาแล้วคือสับเซตของ NRZ(I) ซึ่งเรียกว่า "condition NRZ" ซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงระดับมาเป็นตัวกำหนดชนิดของลอจิกหรือค่าไบนารี รูปที่ 2.37 แสดงตัวเข้ารหัสและตัวถอดรหัสของลอจิก NRZ(I) ข้อ

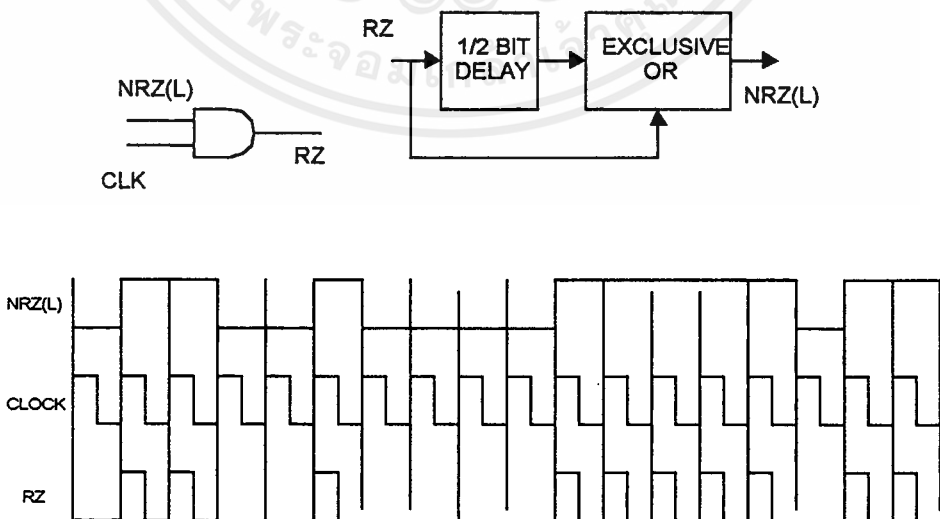
ได้เปรียบของ NRZ(I) ก็คือ มันมีภูมิคุ้มกันเนื่องจากการสลับขั้วเพราะว่าข้อมูลถูกเข้ารหัสด้วยการมีหรือไม่มี การเปลี่ยนแปลงแทนการมีหรือไม่มีพัลส์ ดังอธิบายในรูป



รูปที่ 2.37 การเข้ารหัสของ NRZ

Return-to-Zero (RZ)

โดยการเข้ารหัส Return-to-Zero (RZ) การแสดงระดับสัญญาณค่าบิตจะกระทำเพียงครึ่งช่วงแรกของ ช่วงเวลาบิตหลังจากครึ่งหนึ่งของบิตผ่านไป สัญญาณจะเปลี่ยนกลับไปยังระดับสัญญาณอ้างอิง (zero) เป็น เวลาครึ่งหนึ่งของช่วงความยาวบิตตามรูป 2.38 ค่าศูนย์จะถูกแสดงด้วยการ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยที่สัญญาณ จะยังคงอยู่ที่ระดับอ้างอิงซึ่งมันจะมีประโยชน์ในเรื่องของการเปลี่ยนแปลง (transition) และทำให้สัญญาณเวลา ในการกู้สัญญาณคืนดีขึ้นรูปคลื่นของ RZ สำหรับค่าบิต 1 และ 0 แสดงไว้ดังในรูปที่ 2.38 เปรียบเทียบกับรูปแบบของรหัสตัวอื่นจะสังเกตเห็นว่า ค่าบิต 0 ก็คือค่าของสัญญาณที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งทำให้เกิดปัญหา เรื่องศักยภาพของวงจรเวลาในการกู้สัญญาณซึ่งเขาอาจจะกำจัดปัญหาดังกล่าวได้ โดยการทำ precoding



รูปที่ 2.38 การเข้ารหัส RZ

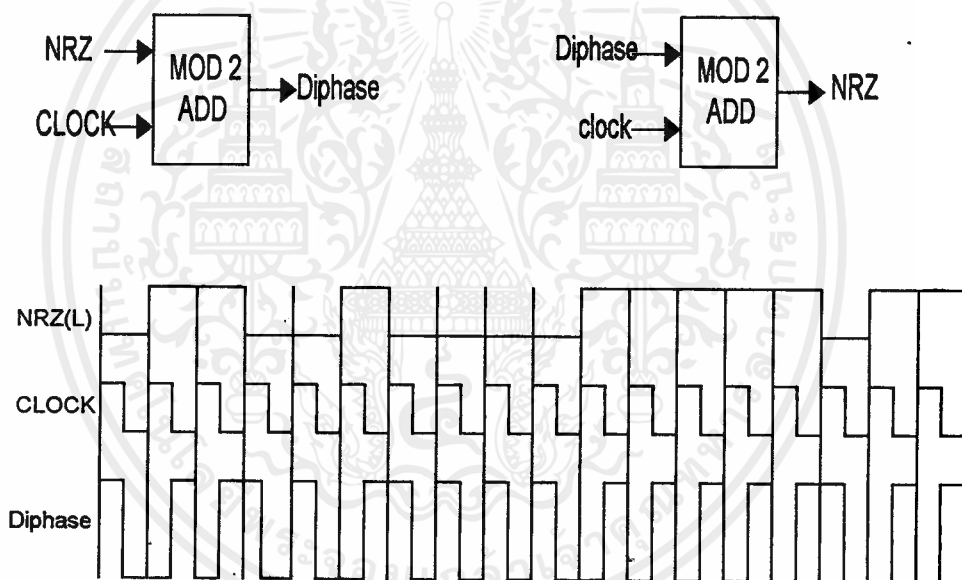
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเข้ารหัส, รูปคลื่น และตัวถอดรหัสแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 รหัส RZ จะถูกสร้างโดยการแอนด์ NRZ(L) กับ สัญญาณเวลาที่ทำหน้าที่เป็นอัตราบิตของระบบ ตัวถอดรหัสจะถอดรหัสได้โดยการนำสัญญาณ RZ ไป 1 บิต และนำเอาสัญญาณ RZ ที่นำเวลากับสัญญาณ RZ ที่ไม่ได้นำเวลามาทำการ เอกคลูซีฟออร์กัน โดเฟส (Diphase)

โดเฟสบางครั้งอาจเรียกว่า ไบเฟส (biphase)-สปลิตเฟส (split-phase) และ แมนเชสเตอร์ (Manchester) นั้นเป็นวิธีการเข้ารหัสชนิดสองระดับดังนี้คือ

$$f_1(t) = \begin{cases} V & 0 < t < T/2 \\ -V & T/2 < t < T \end{cases}$$

$$f_2(t) = -f_1(t)$$



รูปที่ 2.39 การเข้ารหัสโดเฟส

รหัสโดเฟสนี้สามารถสร้างได้จากการนำเอา NRZ(L) เอกคลูซีฟออร์ กับสัญญาณนาฬิกา ดังในรูป 2.39 ถ้าสมมติว่า 1 ถูกส่งผ่านไปได้โดยใช้ +V และ 0 ถูกส่งไปโดยใช้ -V จากรูปคลื่นของโดเฟสแสดงให้เห็นชัดว่าจำนวนของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณจะเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้การสร้างสัญญาณควบคุมจังหวะเวลาแบบ self timing เพื่อนำมาทำการกู้สัญญาณดีขึ้นซึ่งเป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญของโดเฟส การกู้สัญญาณกระทำได้โดยวิธีการเช่นเดียวกับการเข้ารหัส

โคเฟสใช้กับสัญญาณ NRZ(I) หรือที่รู้จักกันในนาม โคเฟสแบบมีเงื่อนไข (conditioned diphas) จะมีทั้งคุณสมบัติของ NRZ(I) และโคเฟสกล่าวคือจะมีภูมิคุ้มกันต่อการกลับขั้ว และเพิ่มจำนวนของการเปลี่ยนแปลงสถานะ ดังแสดงในรูป 2.39

2. ข้อมูลดิจิทัล, สัญญาณอนาลอก

สำหรับในหัวข้อนี้จะเป็นการพิจารณาการส่งผ่านข้อมูลดิจิทัลโดยการใช้สัญญาณอนาลอกกรณีที่เป็นที่คุ้นเคยกันมากที่สุดในการแปลงสัญญาณในลักษณะดังกล่าวก็คือการส่งผ่านข้อมูลดิจิทัลผ่านไปในโครงข่ายของโทรศัพท์ โดยที่โครงข่ายของโทรศัพท์ถูกออกแบบเพื่อรับ, ตัดต่อและส่งผ่านสัญญาณอนาลอกในย่านความถี่เสียงคือประมาณ 300 ถึง 3400 Hz ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวไม่เหมาะสมที่จะส่งผ่านสัญญาณดิจิทัลจึงถูกต้องเข้ากับโครงข่ายโดยผ่านโมเด็ม ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนข้อมูลดิจิทัลให้เป็นสัญญาณอนาลอกและในทางกลับกัน ก็เปลี่ยนสัญญาณอนาลอกกลับมาเป็นข้อมูลดิจิทัลในทางด้านรับ

สำหรับในโครงข่ายโทรศัพท์แล้วโมเด็มจะถูกใช้เพื่อสร้างสัญญาณในย่านความถี่เสียง และเทคนิคในการทำงานของเครื่องนี้สามารถนำไปผลิตสัญญาณที่ความถี่สูงๆ ได้

เทคนิคการเข้ารหัส

จากการที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการมอดูเลชัน เป็นขบวนการที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์อันใดอันหนึ่งของสัญญาณคลื่นพาห์ พารามิเตอร์ของคลื่นพาห์นั้นคือ แอมพลิจูด, ความถี่ และเฟส มีเทคนิคการมอดูเลชัน 3 แบบสำหรับที่จะเปลี่ยนข้อมูลดิจิทัลให้เป็นสัญญาณอนาลอกมีอธิบายไว้ในรูป 3.39

Amplitude-shift keying (ASK)

Frequency-shift keying (FSK)

Phase-shift keying (PSK)

ทุกๆ กรณีที่กล่าวมานี้ สัญญาณที่ได้จะอยู่ในแบบตัวครีที่มีความถี่คลื่นพาห์เป็นความถี่ศูนย์กลาง ในเทคนิคแบบ ASK ค่าไบนารีสองค่าจะแทนด้วยค่าแอมพลิจูดที่แตกต่างกันสองค่าของความถี่คลื่นพาห์ เช่น ไบนารี 1 แทนด้วย แอมพลิจูดคงที่ของคลื่นพาห์ส่วน ไบนารี 0 แทนด้วยคลื่นพาห์ที่ขาดหายไป ผลของสัญญาณจะเป็นดังนี้ คือ

$$S(t) = A \cos(2\pi f_c t + \theta_c) \quad \text{ไบนารี 1} \quad \text{หรือ}$$

$$S(t) = 0 \quad \text{ไบนารี 0}$$

โดยที่สัญญาณคลื่นพาห์ก็คือ $A \cos(2\pi f_c t + \theta_c)$ สำหรับบนสาย Voice-grade สามารถใช้ส่งข้อมูลได้สูงสุดเพียง 1200bps

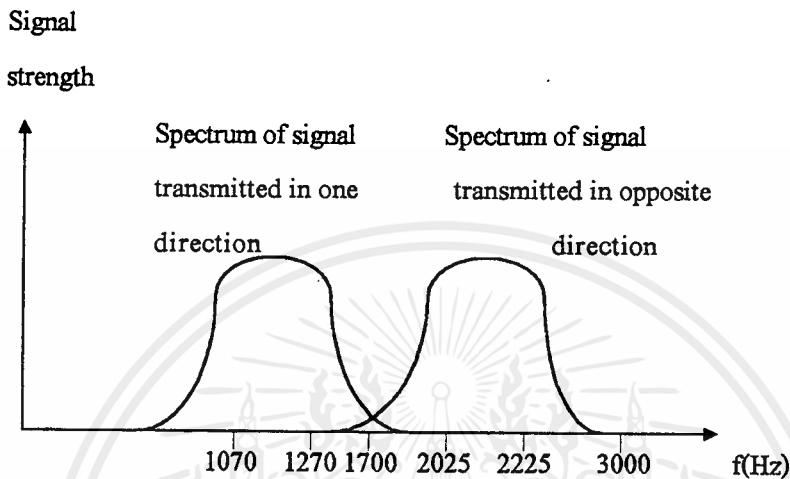
เทคนิคของ ASK ถูกนำไปใช้ในการส่งผ่านข้อมูลดิจิทัลไปบนสายนำแสง สำหรับตัวส่งที่เป็น LED สมการของ ASK ก็ยังคงนำไปใช้ได้ กล่าวคือ สัญญาณตัวหนึ่งแทนด้วยพัลส์แสงในขณะที่อีกสัญญาณหนึ่งแทนด้วยการไม่มีแสง แต่สำหรับตัวส่งที่เป็นเลเซอร์แล้วตามปกติจะต้องมีกระแสไบอัสคงที่อยู่ที่ค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นสาเหตุให้อุปกรณ์เลเซอร์เปล่งแสงได้ที่ระดับค่า ดังนั้นแสงที่ระดับค่านี้ที่จะแทนสัญญาณตัวหนึ่งในขณะที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S(t) = A \cos (2\pi f_1 t + \theta_c) \quad \text{ไบนารี 1}$$

$$S(t) = A \cos (2\pi f_2 t + \theta_c) \quad \text{ไบนารี 0}$$

โดยที่ f_1 และ f_2 เป็นตัวอย่างของความถี่ที่แตกมาจากความถี่คลื่นพาห์ f_c โดยมีจำนวนเท่ากันแต่ตรงกันข้ามกัน รูปที่ 2.40 แสดงตัวอย่างการใช้ FSK ในขบวนการของ full-duplex บนสาย voice-grade



รูปที่ 2.40 ขบวนการพูลดูเพล็กซ์บนสายโทรศัพท์

ในรูปรายละเอียดของระบบโมเดมอนุกรม 108 ของระบบเบล กล่าวได้ว่าสาย voice-grade จะผ่านความถี่เสียงได้ประมาณในช่วง 300 ถึง 3400 Hz และด้วยวิธีการแบบพูลดูเพล็กซ์ สัญญาณจะถูกส่งผ่านในทั้งสองทิศทางได้ในเวลาเดียวกัน เพื่อการส่งผ่านแบบพูลดูเพล็กซ์ทำงานได้แบบดีวิคค์จะถูกแบ่งออกจากกันที่ตำแหน่งความถี่ 1700 Hz ในทิศทางที่หนึ่งความถี่ที่ใช้แทนไบนารี 1 และ 0 จะมีความถี่ศูนย์กลางอยู่ที่ 1170 Hz โดยมีการเลื่อนความถี่ขึ้นและลงไป 100 Hz ผลของการสลับไปมาระหว่างสองความถี่เหล่านั้นคือ 1070 กับ 1270 Hz จะก่อให้เกิดเป็นสเปกตรัมของความถี่แสดงด้วยพื้นที่ทางด้านซ้ายของรูปที่ 3.9 ในทำนองเดียวกัน ในทิศทางที่สองโมเดมใช้ความถี่ 2125 Hz เป็นความถี่ศูนย์กลาง และแทนไบนารี 0 หรือ 1 ด้วยการเลื่อนความถี่ขึ้นหรือลงจากความถี่ศูนย์กลาง (2025, 2225) ซึ่งสัญญาณดังกล่าวนี้แสดงด้วยพื้นที่ทางด้านซ้ายมือของรูปที่ 3.9 จะสังเกตเห็นว่ามีส่วนที่เหลื่อมทับกันอยู่เล็กน้อยซึ่งทำให้เกิดการแทรกสอดขึ้นเล็กน้อย

FSK จะอยู่ภายใต้อิทธิพลของความผิดพลาดน้อยกว่า ASK บนสาย voice-grade มันสามารถส่งข้อมูลได้สูงถึง 1200 บิตต่อวินาที

สำหรับ PSK เฟสของสัญญาณคลื่นพาห์จะถูกเปลี่ยนแปลงเพื่อแทนข้อมูล ในรูป 3.8 เป็นตัวอย่างของระบบ 2 เฟส ในระบบนี้ ไบนารี "0" จะแทนด้วยการส่งสัญญาณเฟสเดียวกับสัญญาณที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้ ส่วนค่าไบนารี "1" จะแทนด้วยการส่งสัญญาณที่มีเฟสตรงกันข้ามกับสัญญาณที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้อันเป็นที่รู้จักในนาม DPSK เพราะว่าเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปจะเป็นตัวอ้างอิงสำหรับบิตที่จะส่งต่อไปแทนที่จะใช้สัญญาณอ้างอิงที่คงที่ ผลของสัญญาณก็มีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S(t) = \begin{cases} A \cos (2\pi f_c t + \pi) & \text{ไบนารี 1} \\ A \cos (2\pi f_c t) & \text{ไบนารี 0} \end{cases}$$

โดยเฟสที่วัดจะเทียบกับช่วงของบิตก่อนหน้า

ประสิทธิภาพของการใช้แบนวิดธ์จะมีค่ามาก ถ้าอนุภาคของแต่ละสัญญาณสามารถใช้แทนจำนวนบิตหลายๆ บิต ตัวอย่างเช่น แทนที่เฟสที่เลื่อนไป 180 องศา เหมือน PSK ที่กล่าวมาแล้วการเข้ารหัสรู้จักในนาม (quadrature phase-shift keying) PSK จะทำการเลื่อนเฟสไปเพียง 90 องศา ดังนั้นในหนึ่งรอบจะแทนข้อมูลได้ 4 สถานะดังนี้คือ

$$S(t) = \begin{cases} A \cos (2\pi f_c t + 45) & 11 \\ A \cos (2\pi f_c t + 135) & 10 \\ A \cos (2\pi f_c t + 225) & 00 \\ A \cos (2\pi f_c t + 315) & 01 \end{cases}$$

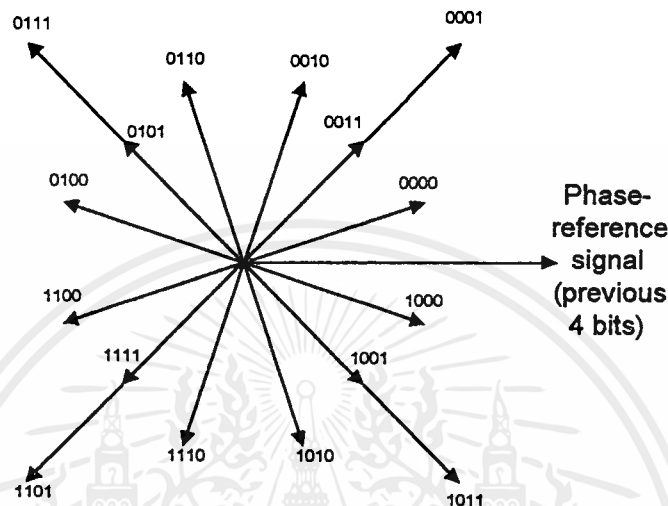
จะเห็นได้ว่าสัญญาณแต่ละตัวจะแทนจำนวนข้อมูลได้ 2 บิต แทนที่จะเป็น 1 บิต

โครงสร้างอันนี้สามารถขยายออกไปได้อีก เช่นการส่งบิตเป็น 3 เท่า โดยใช้ความแตกต่างของเฟสทั้งหมด 8 เฟส ไม่เพียงแต่เท่านั้นเรายังสามารถเพิ่มจำนวนข้อมูลได้ โดยการกำหนดให้แต่ละมุมให้มีแอมพลิจูดมากกว่า 1 ค่า เช่น โมเดมมาตรฐาน 9600 บิตต่อวินาที ใช้การเปลี่ยนมุม 12 มุม และ 4 ใน 12 มุมนี้ยังจะมีค่าแอมพลิจูดได้ 2 ค่า

จากตัวอย่างที่ได้กล่าวมาแสดงให้เห็นถึงแนวความคิดเรื่องอัตราข้อมูล R (บิตต่อวินาที) และอัตราการมอดูเลชัน D (บอด) ถ้าเราสมมติให้โครงสร้างดังกล่าวนี้ถูกนำไปใช้กับ NRZ-L อินพุท อัตราข้อมูลก็จะมีค่า $R = 1 / t_b$ เมื่อ t_b คือความกว้างของ NRZ-L แต่ละบิต อย่างไรก็ตาม สัญญาณที่ถอดรหัสได้ $I = 4$ บิต ต่ออนุภาคสัญญาณหนึ่งๆ ซึ่งจะต้องใช้อนุภาคของสัญญาณที่แตกต่างกันทั้งหมด 16 แบบ ($L = 16$) อัตราการมอดูเลชันก็จะมีค่าเท่ากับ $R/4$ เพราะว่าการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณจะมีค่าเท่ากับข้อมูล 4 บิต ดังนั้นถ้าความเร็วของสัญญาณในสายเท่ากับ 2400 บอด อัตราข้อมูลก็จะเท่ากับ 9600 บิตต่อวินาที ด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวมานี้ สาย voice-grade จึงสามารถที่จะส่งข้อมูลได้ในอัตราที่สูงกว่านี้ โดยใช้รูปแบบของการมอดูเลชันที่ซับซ้อนขึ้นโดยทั่วไปแล้ว

$$D = R/I = R/\log_2 L$$

- โดยที่ D = อัตราการมอดูเลชันมีหน่วยเป็น บอด หรือ จำนวนสัญญาณที่เกิดขึ้นใน 1 วินาที
 R = อัตราข้อมูล, บิตต่อวินาที
 L = จำนวนขององค์ประกอบของสัญญาณที่แตกต่างกัน
 I = จำนวนของบิตต่อสัญญาณหนึ่งๆ



รูปที่ 2.41 การมอดูเลชันแบบ PSK

ดังตัวอย่างเราจะเห็นได้ว่าอัตราการมอดูเลตสูงสุดสำหรับสัญญาณ RZ จะเท่ากับ $2t_B$ ซึ่ง D ของ RZ จะมีค่ามากกว่า D ของ NRZ

การปฏิบัติ Performance

ในการมองโครงสร้างการมอดูเลตสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณอนาลอกชนิดต่างๆ ในทางปฏิบัติ ตัวแปรแรกที่เราจะต้องสนใจก็คือ แบนด์วิดธ์ของสัญญาณที่จะมอดูเลตซึ่งแบนด์วิดธ์นี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง รวมทั้งการกำหนดการใช้แบนด์วิดธ์กับการใช้เทคนิคการกรองเพื่อสร้างสัญญาณในย่านการส่งผ่าน ได้มีผู้วิเคราะห์ไว้ว่า

แบนด์วิดธ์ของการส่งผ่าน B_T ของ ASK มีรูปแบบดังนี้

$$B_T = (1+r)R$$

โดยที่ R ก็คืออัตราการส่งข้อมูลและ r นั้นเป็นค่าที่สัมพันธ์เกี่ยวกับเทคนิคโดยที่สัญญาณจะถูกกรองเพื่อสร้างแบนด์วิดธ์สำหรับส่งผ่านปกติแล้ว $0 < r < 1$ ซึ่งแบนด์วิดธ์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราข้อมูล สูตรที่กล่าวมาแล้วสามารถใช้กับ PSK ได้ด้วย

สำหรับ FSK สามารถกำหนดแบนด์วิดธ์ได้ดังนี้

$$B_T = 2\Delta F + (1+r)R$$

โดยที่ $\Delta F = f_2 - f_c = f_c - f_1$ ก็คือความถี่ที่ขจัดเซสสำหรับการมอดูเลต จากความถี่คลื่นพาห้ซึ่งเมื่อความถี่สูงขึ้น เทอม ΔF ก็จะมีค่าสำคัญมาก ตัวอย่างมาตรฐานของสัญญาณ FSK ตัวหนึ่งที่ใช้บนโครงข่ายหลายจุดของสายโคแอกเซียลโดยใช้ $\Delta F = 1.25$ เมกะเฮิร์ต, $f_c = 5$ เมกะเฮิร์ต และ $R = 1$ เมกะบิตต่อวินาที ในกรณีนี้จะได้ $B_T = 2\Delta F = 2.5$ เมกะเฮิร์ต

โดยการใช้สัญญาณในรูปแบบหลายระดับจะทำให้ประสิทธิภาพของแบนด์วิดธ์ดีขึ้น โดยทั่วไป

$$B_T = ((1+r)/l)R = ((1+r)/\log_2 L)R$$

โดยที่ l ก็คือ จำนวนบิตที่เข้ารหัสต่อสัญญาณ 1 สัญญาณ และ L ก็คือจำนวนทั้งหมดของสัญญาณที่แตกต่างกัน

3. ข้อมูลอนาลอก, สัญญาณอนาลอก

การมอดูเลชันเป็นขบวนการที่ถูกสร้างขึ้นมา เพื่อใช้ในการรวมสัญญาณอินพุตเข้ากับความถี่คลื่นพาห้ f_c เพื่อให้ได้สัญญาณเอาท์พุทออกมา ซึ่งมีความถี่ศูนย์กลางของแบนด์วิดธ์อยู่ที่ f_c สำหรับข้อมูลดิจิทัล สาเหตุที่ทำให้เกิดการมอดูเลชันจะเห็นได้ว่า ตัวกลางที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณในปัจจุบันส่วนใหญ่จะเหมาะสำหรับส่งผ่านสัญญาณอนาลอก ดังนั้นเราจึงต้องมีการแปลงข้อมูลดิจิทัลให้เป็นอนาลอกเพื่อส่งเข้าไปในตัวกลางดังกล่าว สำหรับสัญญาณเสียงที่ถูกส่งผ่านเข้าไปบนสายโทรศัพท์ด้วยสเปคตรัมคั่นแบบ หรือที่เรียกว่า base band transmission) นั้นมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึง 2 ประการคือ

- ในการนำข้อมูลผ่านตัวกลางแบบไร้สายจะต้องอาศัยสัญญาณที่มีความถี่สูงๆ เพราะจะทำให้สายอากาศมีขนาดเล็กๆ ซึ่งถ้าจะส่งสัญญาณเบสแบนด์จะต้องใช้สายอากาศที่ยาวมาก

- การมอดูเลชันจะยอมให้มีการมัลติเพล็กซ์กัน ได้ทางความถี่

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเทคนิคของหลักการมอดูเลชันที่ใช้มัลเป็นอนาลอก อันได้แก่ การมอดูเลชันทางแอมพลิจูด (AM), การมอดูเลชันทางความถี่ (FM), และการมอดูเลชันทางเฟส (PM)

Amplitude Modulation

การมอดูเลชันทางแอมพลิจูดเป็นการมอดูเลชันแบบที่ง่ายที่สุด ดังแสดงได้ในรูป ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ สามารถแสดงขบวนการได้ดังต่อไปนี้

$$S(t) = [1 + n_x x(t)] \cos 2\pi f_c t$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $\cos 2\pi f_c t$ คือ สัญญาณคลื่นพาห์ และ $x(t)$ เป็นสัญญาณอินพุท (ข้อมูลที่ถูกลำพาลี) โดยในสมการนั้นได้ทำการนอร์มอลไลซ์แอมพลิจูดของสัญญาณให้เป็น 1 หน่วย ค่าพารามิเตอร์ n_m เรียกกันว่า ดัชนีการมอดูเลต (MODULATION INDEX)

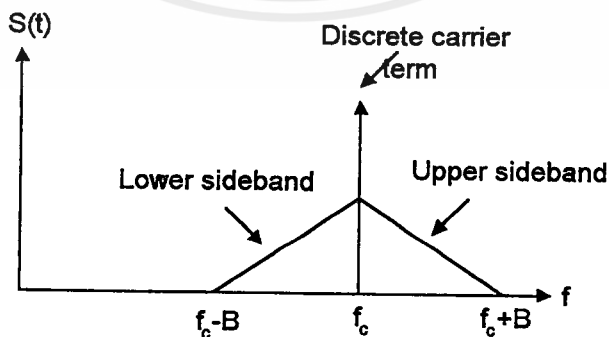
ดัชนีการมอดูเลต คือ อัตราส่วนของแอมพลิจูดสัญญาณอินพุทต่อสัญญาณคลื่นพาห์ เขียนสัญญาณอินพุทอยู่ในรูป $m(t) = n_m x(t)$ สมมติให้ $x(t)$ คือสัญญาณที่มีมอดแบบแอมพลิจูด $\cos 2\pi f_m t$ จะได้

$$S(t) = [1 + n_m \cos 2\pi f_m t] \cos 2\pi f_c t$$

โดยเอกลักษณ์ทางตรีโกณมิติ เราสามารถกระจายเทอมทางขวาของสมการได้ดังนี้

$$S(t) = \cos 2\pi f_c t + (n_m / 2) \cos 2\pi (f_c - f_m) t + (n_m / 2) \cos 2\pi (f_c + f_m) t$$

ผลลัพธ์ของสัญญาณที่ได้ก็จะมอดประกอบความถี่ของสัญญาณคลื่นพาห์ดั้งเดิมรวมอยู่ด้วยคู่ของความถี่ของสัญญาณจำนวน f_m เวิ้รต์จากคลื่นพาห์



รูปที่ 2.42 รูปแบบการส่งแบบเอเอ็ม

จากสมการที่กล่าวมาแล้วและรูป 2.42 เราจะเห็นว่าระบบเอเอ็มจะเกี่ยวข้องกับการคูณระหว่าง สัญญาณอินพุตกับสัญญาณคลื่นพาห์ โดยเอนเวลโลบของสัญญาณผลลัพธ์ก็คือ $[1 + m_x(t)]$ และทราบเท่าที่ $m_x < 1$ อยู่ เอนเวลโลบของสัญญาณก็คือส่วนที่สามารถสร้างเป็นสัญญาณต้นแบบได้ใหม่ ถ้า $m_x > 1$ เอนเวลโลบ จะพาดผ่านแกนเวลาทำให้ข่าวสารสูญหาย ซึ่งในการมอดูเลชันของสัญญาณ เอเอ็มจะทำให้เราได้รับความรู้ หลายอย่าง ซึ่งสเปคตรัมเอเอ็ม แสดงดังรูป 3.20 โดยที่สเปคตรัมจะประกอบไปด้วยสัญญาณคลื่นพาห์ดั้งเดิม บวกกับสเปคตรัมของสัญญาณอินพุต ส่วนของสเปคตรัมสำหรับ $|f| > |f_c|$ เรียกว่า ไซด์แบนด์ด้านสูง (Upper sideband) และส่วนที่ $|f| < |f_c|$ เรียกว่า ไซด์แบนด์ด้านต่ำ (Lower sideband) ซึ่งทั้งสอง ไซด์แบนด์ ก็คือ แบบจำลองสเปคตรัมดั้งเดิม $M(f)$ ดังตัวอย่าง พิจารณาสัญญาณเสียงให้มีแบนด์วิดธ์ตั้งแต่ 300 ถึง 3 กิโล เฮิร์ต ซึ่งใช้ในการมอดูเลชันกับสัญญาณคลื่นพาห์ 60 กิโลเฮิร์ต

ผลลัพธ์ของสัญญาณจะประกอบด้วย Upper sideband 60.3 ถึง 63.3 KHz, Lower sideband 57 ถึง 59.7 KHz และคลื่นพาห์ 60 KHz ซึ่งมีความสัมพันธ์ที่สำคัญอันหนึ่งคือ

$$P_t = P_c (1 + m_x^2/a)$$

โดยที่ P_t ก็คือ กำลังงานที่ส่งผ่านทั้งหมดใน $S(t)$ และ P_c ก็คือ กำลังงานในการส่งผ่านของคลื่นพาห์ ซึ่งเห็นได้ว่าเราควรจะทำให้ m_x มีค่ามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อที่ว่ากำลังของสัญญาณทั้งหมดจะได้ถูกนำไปใช้ในการขนส่งข่าวสาร แต่อย่างไรก็ตาม m_x ยังคงต้องน้อยกว่า 1 อยู่เสมอ

ซึ่งจะเห็นได้ว่า $s(t)$ ประกอบด้วยส่วนประกอบที่ไม่มีความจำเป็นอยู่ เพราะว่า sideband แต่ละข้างจะ ประกอบไปด้วยสเปคตรัมที่สมบูรณ์ของ $m(t)$ อยู่แล้วทั้งคู่ ชนิดของ AM ที่นิยมใช้กันมากก็คือ Single sideband (SSB) ประโยชน์ของมันก็คือว่าเราจะส่งเพียง sideband เดียวไป และกำจัดอีก sideband หนึ่งกับคลื่นพาห์ทิ้งไป ประโยชน์ของหลักการทำวิธีนี้คือ

- เพียงครึ่งหนึ่งของแบนด์วิดธ์เท่านั้นที่ต้องใช้ นั่นคือ $B_t = B$ โดยที่ B คือแบนด์วิดธ์ของสัญญาณต้นแบบ สำหรับ DSBTS, $B_t = 2B$

- ใช้กำลังส่งน้อยลง เนื่องจากว่าไม่ต้องใช้กำลังงานที่ใช้ในการส่งคลื่นพาห์ หรือ sideband อื่น การมอดูเลชันชนิดหนึ่งคือ double sideband suppressed carrier (DSBSC) ซึ่งจะกรองเอาความถี่คลื่นพาห์ออกไป และส่ง sideband ทั้งสองออกไป ซึ่งวิธีการนี้จะประหยัดพลังงานแต่จะใช้แบนด์วิดธ์เท่ากับ DSBTC

ประโยชน์ของการตัดคลื่นพาห์ออกไปก็คือว่า เราจะสามารถใช้คลื่นพาห์เพื่อจุดประสงค์ในการทำการเชิงซีดี ตัวอย่างเช่น สมมติว่า สัญญาณอนาลอกดั้งเดิมเป็นการเข้ารหัสข้อมูลดิจิทัลในรูปคลื่น ASK ตัวรับ จำเป็นที่จะต้องทราบถึงจุดเริ่มต้นของเวลาในแต่ละบิตเพื่อที่จะแปลงข้อมูลได้ถูกต้อง โดยที่คลื่นพาห์ที่คงที่จะ กำหนดกาลทางเวลาซึ่งจะกำหนดเวลาที่บิตมาถึง วิธีที่ประณีประนอมก็คือ Vestigial sideband (VSB) ซึ่งจะ ใช้หนึ่ง sideband กับคลื่นพาห์ที่ลดกำลังงานลงมาแล้ว

สัญญาณแสงและสัญญาณรบกวน

สัญญาณแสงที่ปล่อยออกมานั้นในระหว่างที่มันเดินทางในเส้นใยแสงมันจะลดขนาดลงและรูปร่างของคลื่นจะเกิดการเพี้ยนไป (DISTORTION) นอกจากนั้นภายหลังจากเปลี่ยนแสงให้เป็น ไฟฟ้าแล้วยังได้รับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากชิ้นส่วนของวงจรไฟฟ้าอีกด้วย ดังนั้นเมื่อการเพี้ยนของสัญญาณแสงนี้และผลของสัญญาณรบกวนมากเกินไปจะทำให้ข่าวสารเสียไป ผลก็คือทำให้ไม่สามารถให้คุณภาพของการส่งตามต้องการซึ่งเป็นเงื่อนไขหลักที่สำคัญมากในการออกแบบระบบการส่ง ดังนั้นความสัมพันธ์ของสัญญาณที่จะต้องส่งออกไปกับสาเหตุที่ทำให้การส่งเลวลง จึงเป็นสาเหตุที่สำคัญที่จะกำหนดประสิทธิภาพของระบบ จึงจำเป็นต้องนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสิ่งทั้งสองเป็นอย่างดี และนำมาพิจารณาในการออกแบบระบบ

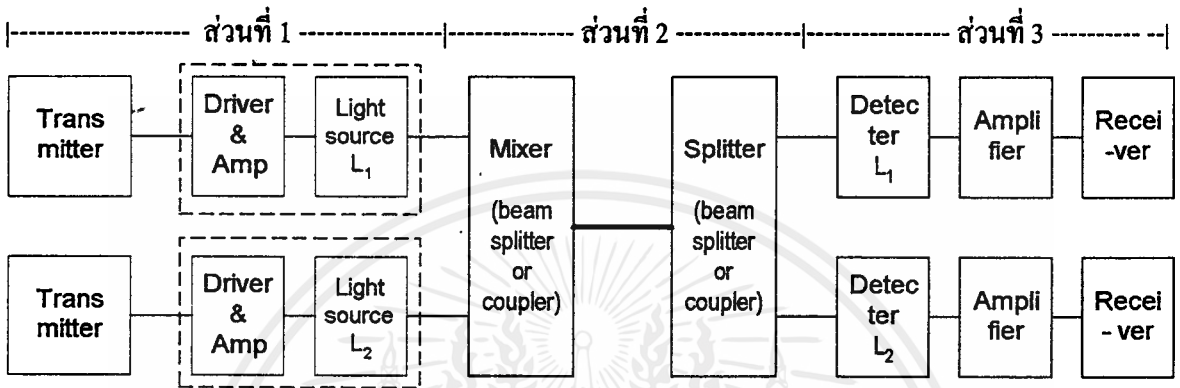
สาเหตุสำคัญๆ ที่ทำให้คุณภาพการส่งเลวลงในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสง ได้แก่ สัญญาณรบกวน แบ่งออกเป็นสัญญาณรบกวนจากแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งมีอยู่ในตัวของสัญญาณไฟฟ้าที่มาป้อนให้แก่อุปกรณ์กำเนิดแสง, สัญญาณรบกวนจากกระแสคาร์ค (DARK CURRENT NOISE) เป็นสัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากการไหลของกระแสคาร์ค ในอุปกรณ์รับแสงในกรณีไม่มีสัญญาณแสงเข้ามา, ชอรัทน้อยส์ ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเวลาของสัญญาณที่เข้ามา และเทอร์มอลน้อยส์



บทที่ 3

การคำนวณและการสร้าง

การออกแบบระบบการมัลติเพล็กซ์โดยการแบ่งย่านความยาวคลื่นนั้น จะกำหนดแหล่งกำเนิดแสงที่จะใช้สำหรับการมัลติเพล็กซ์ อุปกรณ์การรวมสัญญาณแสง อุปกรณ์ในการแยกสัญญาณแสง และอุปกรณ์ในการตีเทคสัญญาณข้อมูล บล็อกไดอะแกรมของระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น แสดงดังรูป

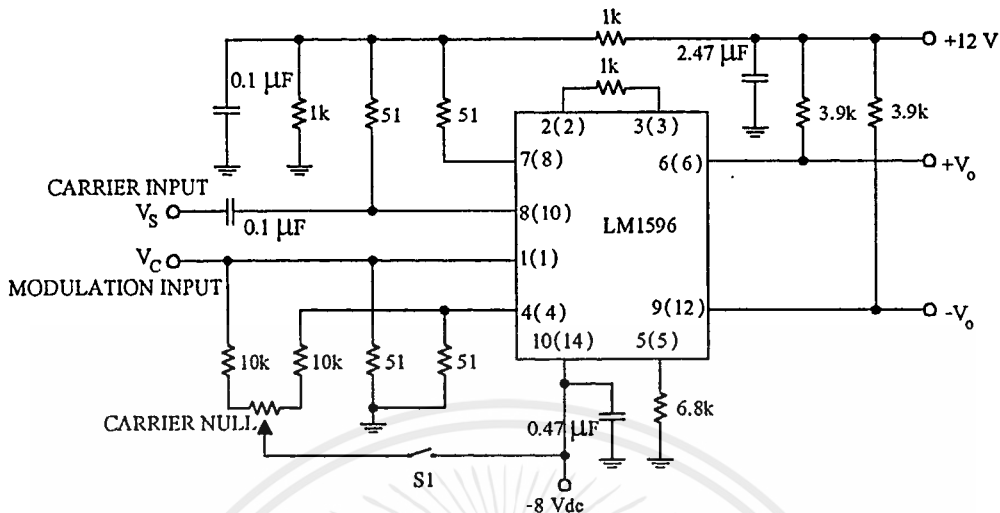


รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบการสื่อสารทางแสงโดยวิธี WDM

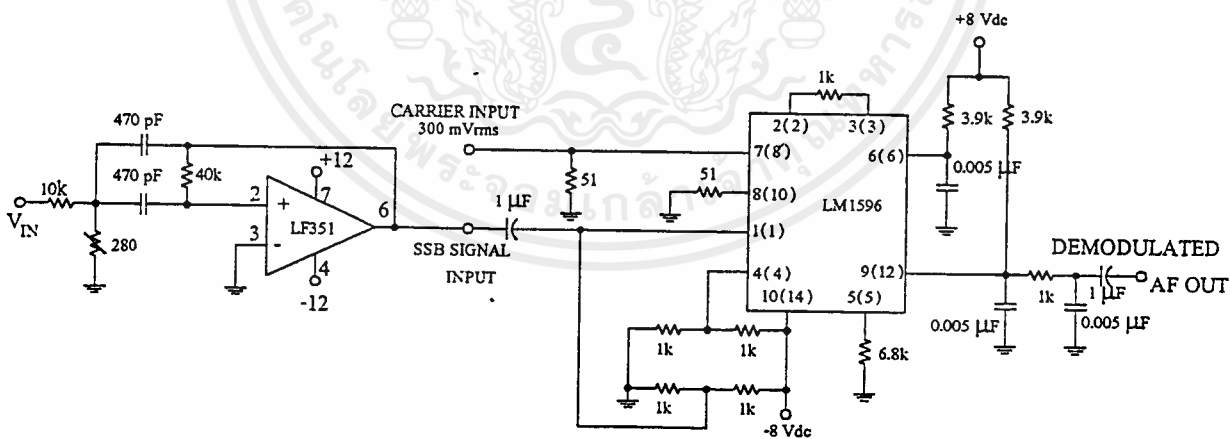
จากรูปที่ 3.1 เป็นระบบการมัลติเพล็กซ์โดยการแบ่งย่านความยาวคลื่นแบบพื้นฐาน ในส่วนที่ 1 และ ส่วนที่ 3 เป็นรูปแบบเดียวกันกับระบบการสื่อสารทางแสงโดยทั่วไป สำหรับบล็อกของแหล่งกำเนิดแสงจะ กำหนดความยาวคลื่นที่ 670 นาโนเมตร (สีแดง) และ 785 นาโนเมตร (แสงใกล้อินฟราเรด) ในส่วนของชุดมัลติเพล็กซ์ และดีมัลติเพล็กซ์ เป็นส่วนที่เชื่อมต่อกับระบบการส่ง โดยมีรายละเอียดในการออกแบบและการคำนวณ ดังนี้

ในส่วนของเครื่องส่งหรือทรานสมิตเตอร์จะเป็นส่วนทำการฟอร์แมตสัญญาณในรูปแบบต่างๆ ให้ ความเหมาะสมกับแหล่งกำเนิดแสงหรือระบบการส่ง จากที่ได้ศึกษาทฤษฎีสามารถที่จะสร้างรูปแบบของ สัญญาณได้หลายวิธี ข้อมูลที่รับเข้ามามีทั้งข้อมูลอนาลอกและข้อมูลดิจิทัล สำหรับอินพุตที่เป็นอนาลอกก็ สามารถที่จะทำการมัลติเพล็กซ์สัญญาณอนาลอกได้โดยตรง (ถ้ามีอินพุตหลายช่องสัญญาณ) ซึ่งใช้ได้ทั้ง ระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความถี่และการมัลติเพล็กซ์ทางเวลา สำหรับโครงงานนี้จะเน้นในส่วนของ การส่งเป็น สำคัญ ส่วนขบวนการจัดการเกี่ยวกับสัญญาณจะได้ทำการพัฒนาในครั้งต่อไป

จากทฤษฎีที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของเลเซอร์ไดโอด จะพบว่าต่างกับแอลอีดี คือไม่สามารถ ทำงานในสภาวะที่อินพุตคงสภาวะเป็นศูนย์กลางๆ ได้ระดับหากเป็นสัญญาณอนาลอกแบบนั้นจึงไม่มีปัญหา สำหรับเลเซอร์ไดโอด สำหรับสัญญาณดิจิทัล เช่นจากคอมพิวเตอร์ จำเป็นต้องทำการเข้ารหัสหรือมอดูเลต ก่อนเพื่อลดองค์ประกอบทางดิจิทัลให้น้อยลงและเป็นการลดความผิดพลาดให้น้อยลง การเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัล ให้เป็นสัญญาณอนาลอก



รูปที่ 3.2 วงจรมอดูเลเตอร์



รูปที่ 3.3 วงจรดีมอดูเลเตอร์

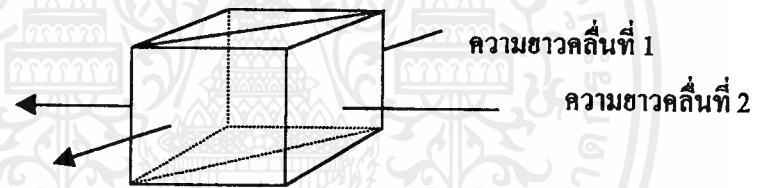
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งกำเนิดแสง

เลเซอร์โคโอดจะต้องใช้ 2 ตัวและมี 2 ความยาวคลื่น ในการทดลองนี้จะใช้ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตรและ 785 นาโนเมตร กำลังของเลเซอร์โคโอดประมาณ 1 มิลลิวัตต์ ซึ่งในทางทฤษฎีสามารถยิงลำแสงไปได้ไกลหลายร้อยเมตร แต่ในทางปฏิบัติแล้วในอากาศจะมีฝุ่นละอองจำนวนมากทำให้แสงที่ยิงออกไปนั้น เกิดการหักเหและแตกกระจายออกไป ทำให้ระยะทางสั้นลง การส่งแสงในทางการสื่อสารจริงจึงจำเป็นต้องส่งในเส้นใยแสง

นอกจากนี้กำลังส่งของแสงทั้งสองความยาวคลื่น ในทางทฤษฎีไม่จำเป็นต้องให้เท่ากัน แสงก็สามารถที่จะรวมกันได้ แต่ในทางปฏิบัติแล้ว จะต้องคำนึงถึงในส่วนของดีเทคเตอร์ด้วย หากสัญญาณแสงช่องหนึ่งมาก อีกช่องหนึ่งน้อย จะทำให้การแยกความยาวคลื่นแสงยากมากขึ้น เนื่องจาก แสงที่มีความยาวคลื่นที่มีกำลังส่งมากกว่า จะไปกดหรือรบกวนแสงอีกความยาวคลื่นหนึ่ง หากดีเทคเตอร์ไม่มีประสิทธิภาพพอ หรือมีสเปคตรัมที่กว้างจะมีส่วนของการตอบสนองที่ซ้อนกัน แทนที่จะทำการดีเทคความยาวคลื่นของตัวเองที่มีกำลังน้อย ก็จะไปดีเทคความยาวคลื่นที่มีกำลังส่งมากกว่า

การมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแสง



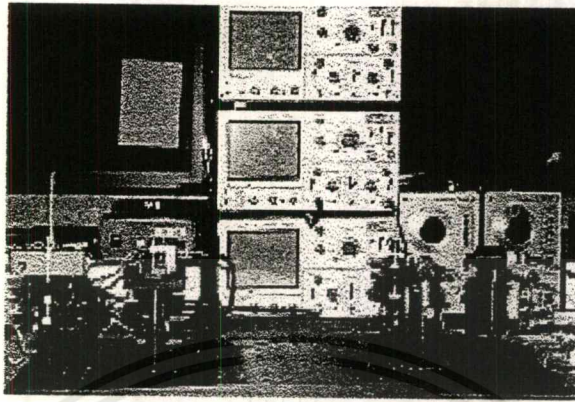
รูปที่ 3.4 การมัลติเพล็กซ์โดยใช้บีมสปลิตเตอร์

จากรูปที่ 3.2 เป็นพื้นฐานในการมัลติเพล็กซ์แสง 2 ความยาวคลื่น โดยบีมสปลิตเตอร์สำหรับการรวมแสงจะมีคุณสมบัติในการส่งผ่านและหักเหลำแสงที่เหมาะสม โดยทั่วไปจะใช้บีมสปลิตเตอร์แบบส่งผ่าน 50 เปอร์เซ็นต์ และหักเห 50 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น เมื่อแหล่งกำเนิดแสงในแต่ละความยาวคลื่นมีขนาดเท่ากับ 1 มิลลิวัตต์ พลังงานแสงที่ถูกส่งออกจะมีค่าเท่ากับ

$$P_o = P_1 + P_2$$

| | | |
|-------|-------|--|
| เมื่อ | P_1 | เป็นพลังงานแสงที่ส่งออกของแหล่งกำเนิดแสงตัวที่ 1 |
| | P_2 | เป็นพลังงานแสงที่ส่งออกของแหล่งกำเนิดแสงตัวที่ 2 |

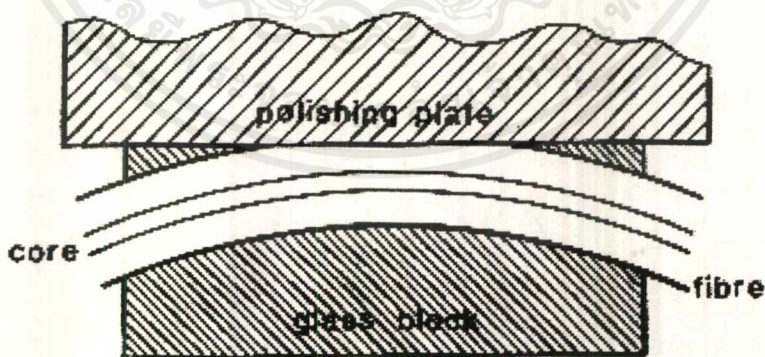
พิจารณาจากรูป 3.4 จะเห็นว่า ลำแสงที่ถูกรวมเข้าด้วยกันนั้นถูกส่งออกไปทั้ง 2 ทิศทางที่มีขนาดเท่ากันแต่องค์ประกอบของลำแสงในแต่ละความยาวคลื่นจะตรงกันข้าม โดยในแต่ละทิศทางประกอบไปด้วยลำแสงหักเห 50 เปอร์เซ็นต์ และลำแสงส่งผ่าน 50 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.5 การมัลติเพล็กซ์โดยใช้บีมสปลิตเตอร์

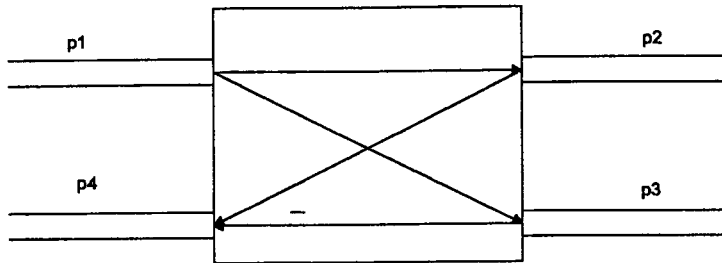
ลำแสงที่ทำการมัลติเพล็กซ์แล้วนั้นจะเป็นลำแสงแบบขนาน (COLLIMATE) ดังนั้นจะต้องใช้เลนส์บีมลำแสงก่อนป้อนเข้าเส้นใยนำแสง

การมัลติเพล็กซ์อีกวิธีหนึ่งคือการใช้คัปเปิลอร์ ซึ่งเป็นการมัลติเพล็กซ์แสงในเส้นใยนำแสงโดยตรง ระบบการสื่อสารในปัจจุบันจะใช้สตาร์คัปเปิลอร์ โดยกระบวนการผลิตได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 วิธีที่นิยมใช้จะเป็นแบบพีวชัน สำหรับคัปเปิลอร์ที่ใช้สำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการ อาจจะใช้เส้นใยแสงแบบพลาสติกทำเป็นโคเรชันนอลคัปเปิลอร์



รูปที่ 3.6 การทำคัปเปิลอร์จากเส้นใยแสง

การมัลติเพล็กซ์แสง โดยการใช้โคเรชันนอลคัปเปิลเลอร์ จะใช้หลักการเดียวกับการใช้มิมสปลิทเตอร์ ในส่วนของการรวมแสง โดยทำการป้อนลำแสงในแต่ละความยาวคลื่นเข้าทางพอร์ท 1 และพอร์ท 2 และเอาที่ พุทออกที่พอร์ท 3 การสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสงที่แสดงการเกิดสัญญาณรบกวนเหล่านี้แสดง ดังรูป



รูปที่ 3.7 พอร์ทของโคเรชันนอลคัปเปิลเลอร์

การหาค่าการสูญเสียของการคัปปลิ่ง ได้จากการประมาณค่า โดยให้ปริมาณแสงที่เข้าทางด้านพอร์ท 1 และ พอร์ท 2 มีขนาดเท่ากัน ตรงรอยต่อระหว่างเส้นใยแสงมีความสมมาตรกัน ดังนั้นสามารถคำนวณค่าการสูญเสียได้จาก

$$\text{ค่าการสูญเสียของการคัปปลิ่ง} = 10 \log_{10} P_3 / (P_1 + P_2)$$

กรณีที่แหล่งกำเนิดแสงมีขนาดเท่ากับ 1 มิลลิวัตต์ การคัปปลิ่งในแต่ละความยาวคลื่นจะแบ่งกันระหว่างพอร์ท 3 และพอร์ท 4 แต่พอร์ท 4 เป็นพอร์ทที่ไม่ใช้งานจึงเป็นการสูญเสียไม่สามารถแก้ไขได้ ดังนั้นจะได้พลังงานที่พอร์ท 3 เป็นครึ่งหนึ่งของอินพุตทั้งหมด

$$\begin{aligned} P_3 &= (P_1 + P_2) / 2 \\ \text{COUPLING LOSS} &= 10 \log_{10} (1/2) \\ &= -3 \text{ dB} \end{aligned}$$

คิมัลติเพล็กซ์ทางแสง

อ้างอิงทฤษฎีของเกรตติงส่งผ่าน (Transmission Grating) โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า d กับ λ จะได้ว่า

$$d (\sin\theta_m - \sin\theta_i) = m\lambda$$

ในการพิจารณาปรากฏการณ์เลี้ยวเบนของลำแสง จะกำหนดให้ลำแสงที่ตกกระทบตั้งฉากกับเกรตติง ดังนั้น

$$d \sin\theta_m = m\lambda$$

เป็นสถานะที่คลื่นไม่เกิดปรากฏการณ์เลี้ยวเบน ในทุกความยาวคลื่น ในสถานะเช่นนี้ไม่สามารถที่จะนำไปใช้ในระบบ WDM ได้ ระดับพลังงานรองลงมาจะปรากฏอยู่ที่โหนด อันดับหนึ่ง ($m = 1$) ดังนั้น จะได้ว่า

$$\sin\theta_m = \frac{\lambda}{d}$$

$$\theta_m = \sin^{-1} \frac{\lambda}{d}$$

ในระบบ WDM ประกอบด้วย ความยาวคลื่นมากกว่า 2 ความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน ดังนั้น เมื่อพิจารณาลำแสงที่ผ่านเกรตติงใน โหนดอันดับที่หนึ่งจะเกิดสเปกตรัมของความยาวคลื่นเรียงจากค่าน้อยไปหามาก เพื่อง่ายต่อการพิจารณาจะใช้เพียง 2 ความยาวคลื่นเท่านั้น

พิจารณาที่ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร เมื่อคำนวณหาค่าของมุมเลี้ยวเบน จะได้ว่า

$$\sin\theta_{m1} = \frac{\lambda}{d}$$

$$= \frac{670 \times 10^{-9}}{d}$$

กำหนดเกรตติงมีความถี่หรือความละเอียดเท่ากับ 600 เส้นต่อมิลลิเมตร จะได้ว่า

$$\sin\theta_{m1} = \frac{670 \times 10^{-9}}{\frac{1}{f}}$$

$$= 670 \times 10^9 \times \frac{600}{10^{-3}}$$

$$= 0.402$$

$$\theta_{m1} = \sin^{-1} 0.402$$

$$= 23.7 \text{ องศา}$$

พิจารณาความยาวคลื่นที่ 785 นาโนเมตร

$$\sin\theta_{m2} = 785 \times 10^9 \times \frac{600}{10^{-3}}$$

$$\theta_{m2} = 28.099$$

$$\theta_{m1} - \theta_{m2} = 4.3992 \text{ องศา}$$

จะเห็นว่าที่ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร และ 785 นาโนเมตร ความแตกต่างของมุมเลี้ยวเบนน้อยมาก ประมาณ 4 องศา ถ้ากำหนดค่าความละเอียดของเกรตติงไว้ที่ 1200 เส้นต่อมิลลิเมตร โดยใช้ความยาวคลื่น 2 ตัว เดิม จะได้ว่า

ที่ $\lambda = 670$ นาโนเมตร

$$\theta_{m1} = \sin^{-1} 670 \times 10^9 \times \frac{1200}{10^{-3}}$$

$$= \sin^{-1} 0.804$$

$$= 53.51$$

ที่ $\lambda = 785$ นาโนเมตร

$$\theta_{m2} = \sin^{-1} 785 \times 10^9 \times \frac{1200}{10^{-3}}$$

$$= \sin^{-1} 0.942$$

$$= 70.39 \text{ องศา}$$

$$\theta_{m1} - \theta_{m2} = 16.88 \text{ องศา}$$

พิจารณาในการคำนวณเกรตติงแต่ละอัน จะเห็นว่า ค่าความแตกต่างของมุมที่เกิดการเลี้ยวเบนจะไม่เป็นเชิงเส้นกับค่า d ที่เพิ่มขึ้น แต่อัตราการเลี้ยวเบนจะมากกว่าการเพิ่มค่า d

ถ้าพิจารณาที่ความละเอียดของเกรตติงที่มีขนาด 1,300 เส้นต่อมิลลิเมตร จะได้ว่า

$$\theta_{m1} = \sin^{-1} 670 \times 10^9 \times \frac{1300}{10^{-3}}$$

$$= 60.575 \text{ องศา}$$

$$\theta_{m2} = \sin^{-1} 785 \times 10^9 \times \frac{1300}{10^{-3}}$$

$$= \text{หาค่าไม่ได้}$$

เมื่อกำหนดให้ค่าความละเอียดของเกรตติงที่ 1,300 เส้นต่อมิลลิเมตร จะเห็นว่ามุมเลี้ยวเบนของความยาวคลื่น 785 นาโนเมตร จะหาค่าไม่ได้ แต่ที่ 670 นาโนเมตร จะหาค่าได้ เมื่อพิจารณาในรูปของค่า d จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 d &= \frac{1}{f} \\
 &= \frac{1}{1300} \\
 &= 769 \times 10^{-6} \text{ มม.} \\
 &= 769 \text{ นาโนเมตร}
 \end{aligned}$$

เนื่องจากค่า d ที่ใช้มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่น 785 นาโนเมตร คลื่นจึงไม่สามารถผ่านออกไปได้ แต่ที่ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร ซึ่งเล็กกว่าค่า d ดังนั้น จึงเป็นเพียงคลื่นเดือวที่ผ่านออกไปได้และเกิดการเลี้ยวเบน

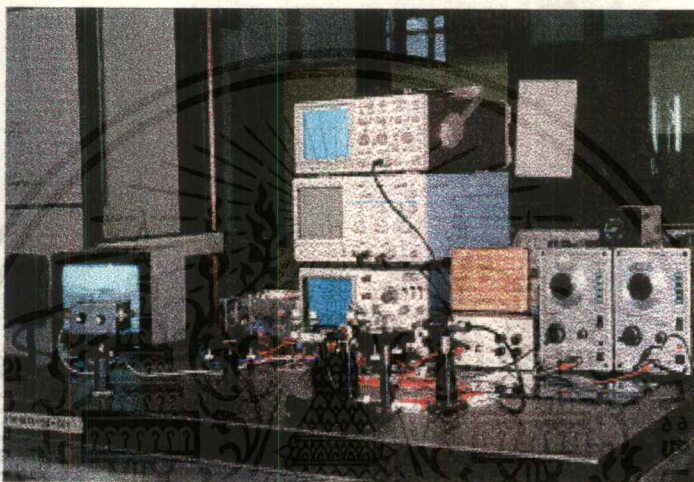


บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

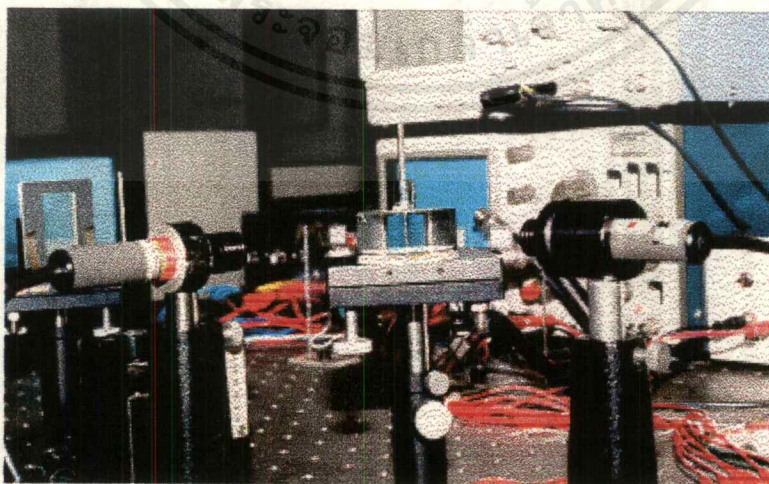
ตอนที่ 1 ชุดทดลองที่ใช้ในระบบ WDM

อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบ WDM จะมีช่วงการตอบสนองต่อแบนด์วิดท์ที่ครอบคลุมทั้งสองความยาวคลื่นเพื่อทำการศึกษาในส่วนของ การสูญเสียรวมทั้ง cross talk ได้อย่างถูกต้อง ในระบบจะใช้แสงเลเซอร์ไดโอด ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร และความยาวคลื่น 785 นาโนเมตร มีกำลังการส่งประมาณ 1 มิลลิวัตต์ ชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1



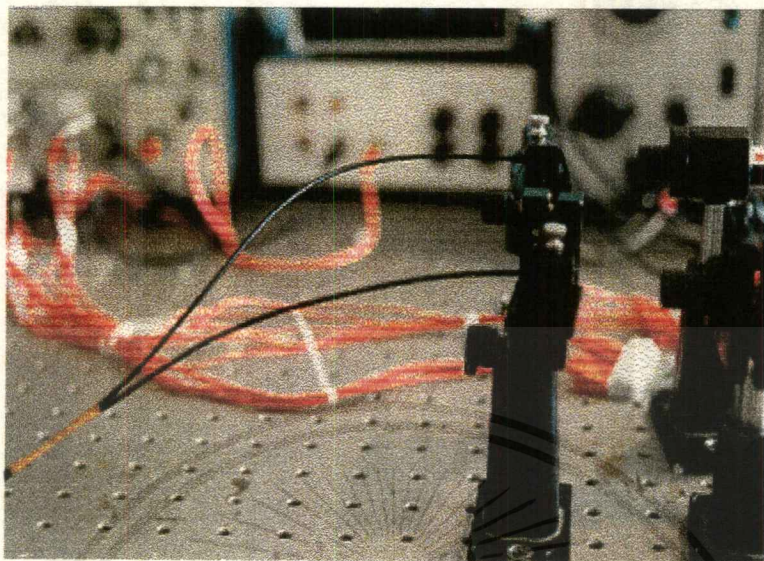
รูปที่ 4.1 ชุดทดลองระบบ WDM

ตอนที่ 2 การสูญเสียแสงในการมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแสง



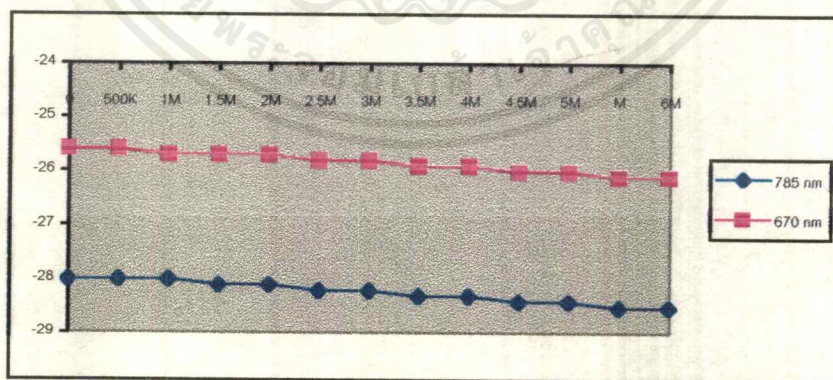
รูปที่ 4.2 การมัลติเพล็กซ์แสง 2 ความยาวคลื่น โดยใช้ปริซึมสปลิตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 การมัลติเพล็กซ์แสง 2 ความยาวคลื่น โดยใช้คัปเปิลเลอร์

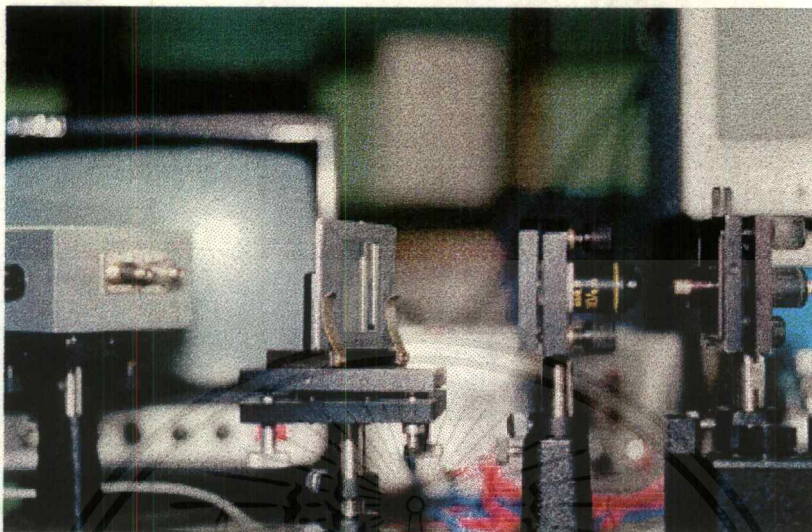
จากรูปที่ 4.2 ลำแสง 2 ความยาวคลื่นตกกระทบบีมสปลิตเตอร์แบบ 50 - 50 ในแนวระนาบที่ตั้งฉากกัน เกิดการอินเตอร์เฟอเรนซ์กันระหว่างทรานสมิซชันบีมและรีเฟลคชันบีมของลำแสงทั้งสองความยาวคลื่น การสูญเสียหากไม่คิดการสูญเสียที่จุดการหักเหที่ลำแสงของบีมสปลิตเตอร์จะเป็นครึ่งหนึ่งของอินพุตทั้งหมด เช่นเดียวกับรูปที่ 4.3 การสูญเสียจะเกิดที่พอร์ทที่ไม่ใช้งาน การหาระดับพลังงานที่ปลายทางจะทำการป้อนแสงที่ต้นทางที่ละความยาวคลื่น ได้ผลการทดลองตามรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การสูญเสียในการมัลติเพล็กซ์แสง

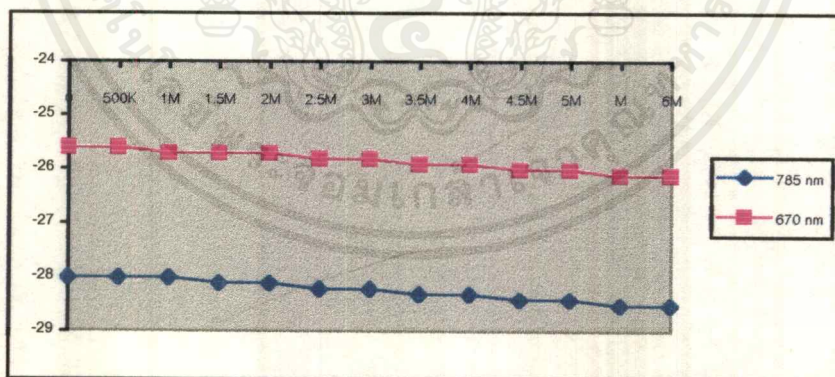
ตอนที่ 3 การสูญเสียในการคิมัลติเพล็กซ์แสง

วิธีการแยกความยาวคลื่นแสงโดยใช้เกรตติง จะอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของลำแสงเมื่อผ่านเกรตติง ซึ่งมุมการเลี้ยวเบนจะแปรผันตามความถี่ของเกรตติงและความยาวคลื่นที่ใช้



รูปที่ 4.5 การใช้เกรตติงในการคิมัลติเพล็กซ์แสง

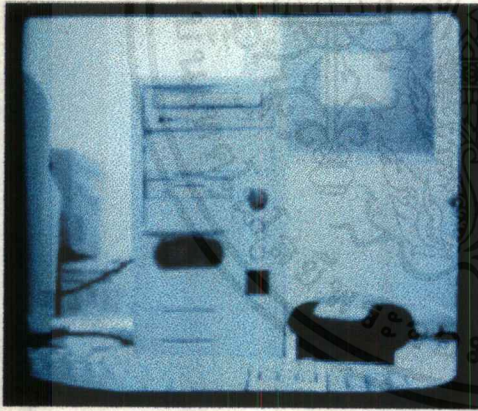
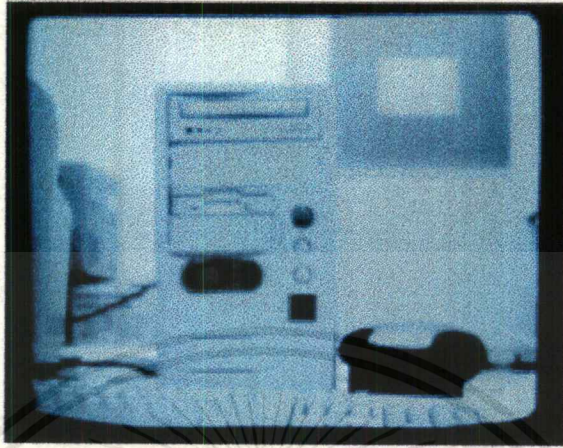
การทดลองได้ใช้เกรตติงที่มีความละเอียด 600 เส้นต่อมิลลิเมตร เปรียบเทียบผลของการสูญเสียระหว่างความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร และ 785 นาโนเมตร ได้ผลตามกราฟรูปที่ 4.6



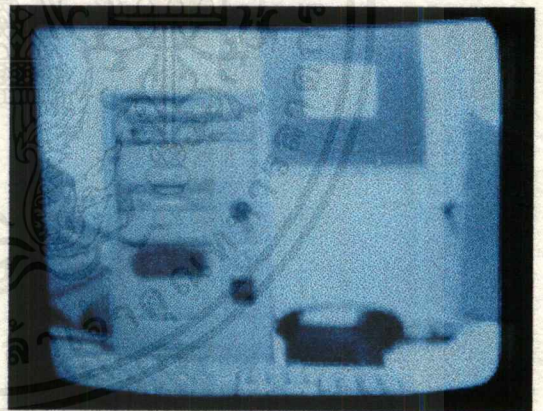
รูปที่ 4.6 การสูญเสียในส่วนของเกรตติง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองจากการใช้บีมสเปคโตรในการมัลติเพล็กซ์แสงและใช้เกรตติ้งความถี่ 600 เส้นต่อมิลลิเมตร ได้ผลการทดลองตามรูปที่ 4.7



ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร



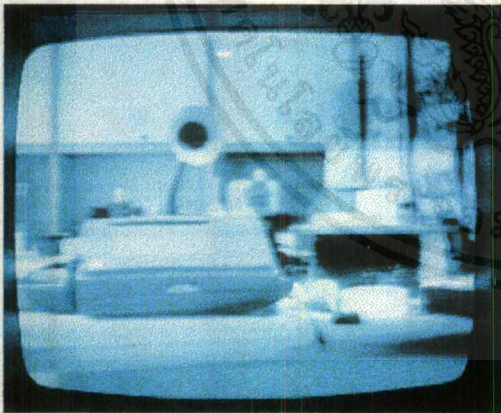
ความยาวคลื่น 785 นาโนเมตร

รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบสัญญาณภาพที่รับได้เมื่อผ่านการตีมัลติเพล็กซ์

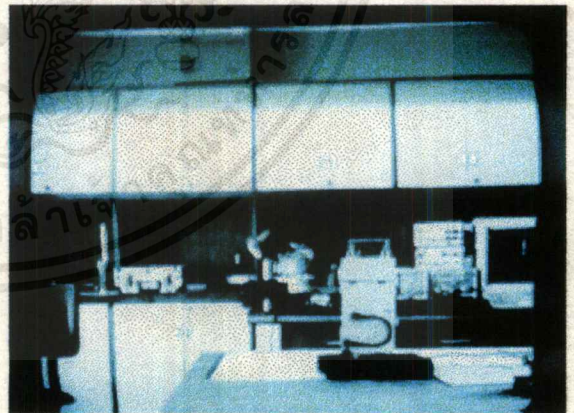
ผลของการใช้คัปเพลอร์ในการมัลติเพล็กซ์แสงและใช้เกรตติงความละเอียด 600 เส้นต่อมิลลิเมตรได้
ผลการทดลองตามรูปที่ 4.8



INPUT



ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร



ความยาวคลื่น 785 นาโนเมตร

รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบสัญญาณที่รับได้เมื่อผ่านการคิมัลติเพล็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์การทดลอง

พิจารณาจากผลการทดลองเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับทฤษฎีจะเห็นว่าผลที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน การสูญเสียจากการปรับความถี่ของตรงที่ไม่สมดุลจะทำให้ผลการทดลองมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ทั้งนี้จะต้องรักษาให้อยู่ในระดับที่ยอมรับจุดหนึ่ง ในกรณีที่จะศึกษาถึงรูปแบบการทำงานของระบบ WDM จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่สามารถมองเห็นรูปแบบการทำงานในส่วนต่างๆ ได้ชัดเจน ง่ายที่จะเข้าใจและพัฒนาปรับเปลี่ยนให้มีการเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดีขึ้น

ในการวิเคราะห์ที่ส่วนต่างๆ ของระบบเทียบกับระบบการสื่อสารที่ใช้จริงในปัจจุบัน จะเห็นว่า มีการเปลี่ยนแปลงในส่วนต่างๆ เนื่องจากต้องการความถี่ตรงสูงและระบบที่ยืดหยุ่น สามารถรองรับความเจริญเติบโตของเน็ตเวิร์คได้ทันที สัญญาณข่าวสารข้อมูลที่มีความจุไม่มาก จะไม่มีความจำเป็นต่อระบบ WDM หากนำระบบนี้ไปใช้จะเป็นการสิ้นเปลืองโดยใช่เหตุ การสื่อสารในแถบยุโรปและอเมริกามีการสื่อสารกันมากทั้งในระบบธุรกิจ การศึกษาและบุคคลทั่วไปมีความหนาแน่นในเส้นทางการสื่อสารเกินกว่าระบบธรรมดาจะรับได้ ระบบ WDM จึงถูกนำมาใช้ สำหรับประเทศไทย ทรานซิปหรือเส้นทางการสื่อสารยังไม่หนาแน่นจนถึงขนาดต้องนำระบบใหม่ๆ เช่น WDM มาใช้งาน นอกจากจะใช้ในวงจรศึกษาเท่านั้น

สำหรับในส่วนของการมัลติเพล็กซ์ทางแสงนั้นในระบบการสื่อสารที่ใช้กันอยู่มีอยู่หลายแบบหลายวิธี ขึ้นอยู่กับกราฟิกและลักษณะของระบบที่นำไปใช้ โดยทั่วไปจะใช้สแตร์คัปเปิลอร์โดยมีขนาดต่างๆ เพื่อสามารถเลือกนำไปใช้ให้เหมาะสมกับงาน สแตร์คัปเปิลอร์จะมีกรรมวิธีการทำแบบพิวส์

ตัวกลางสำหรับการส่งจะมีความแตกต่างกันตามลักษณะของระบบที่นำไปใช้ สำหรับในระบบแลนหรือเครือข่ายคอมพิวเตอร์ที่มีขนาดจำกัดหรือระบบมีขนาดเล็กเพียงพอที่จะใช้เส้นใยนำแสงแบบมัลติโหมด สำหรับการสื่อสารที่มีขนาดใหญ่จะใช้เส้นใยแบบซิงเกิล โหมดเป็นส่วนใหญ่

สำหรับในส่วนของระบบการมัลติเพล็กซ์หรือการฟิลเตอร์ความยาวคลื่นแสงใน ยังคงจะใช้ในรูปแบบของเกรตติงอยู่ แต่มีการออกแบบให้มีการประกอบและติดตั้งได้ง่าย

ในระบบการสื่อสารจะใช้อุปกรณ์ฟิลเตอร์ที่มีขนาดเล็กและง่ายต่อการติดตั้ง ได้แก่ ฟิลเตอร์ ใยนำแสง (optic fiber filter) ซึ่งใช้หลักการเรโซแนนซ์ต่อความยาวคลื่นที่ต้องการ โดยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ ค่าดัชนีหักเหของแสงในเส้นใยนำแสงให้มีการส่งผ่านเฉพาะความยาวคลื่นที่ต้องการ

ในปัจจุบันถึงแม้ว่าช่องสัญญาณในการสื่อสารในประเทศยังเพียงพอที่จะรองรับข่ายสื่อสารที่มีอยู่ได้ แต่หากระบบไม่มีความยืดหยุ่นพอที่จะขยายระบบออกไปได้ นั้นหมายถึง การลงทุนที่สิ้นเปลืองเนื่องจากการขยายตัวของข่ายการสื่อสารในอนาคตจะต้องติดตั้งระบบเพิ่มเกือบทั้งหมด แต่สำหรับ WDM นั้นนอกจากจะมีความจุของข้อมูลที่สูงแล้ว ยังมีความยืดหยุ่นสูงสามารถรองรับระบบที่เพิ่มเข้ามาได้ทันที โดยมีการเพิ่มอุปกรณ์บางส่วนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ในอนาคตของข่ายการสื่อสาร โดยเส้นใยนำแสงจะมีบทบาทเพิ่มมากขึ้นทั้งทางด้านธุรกิจ ภาคเอกชน รัฐบาล การศึกษา รวมทั้งท้องถิ่นที่อยู่ห่างไกล ระบบออปติคัลโซมจะถูกนำมาใช้ในอนาคตอย่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แน่นอน จากการเพิ่มขึ้นของข่ายการสื่อสารระบบ WDM จึงเป็นระบบที่จะมารองรับการขยายตัวของ
สื่อสารในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WDM

Wavelength Division Multiplexing Transmission System

FEATURES

- Wavelength stabilized
- Externally modulated transmitter
- Expandable capacity : 20G / 40G

SPECIFICATIONS

| | | |
|------------------------------|---------------------|--------------------|
| Capacity | 20G (8 channels) | |
| | 40G (16 channels) | |
| Transmission Distance | 600Km | |
| Wavelength accuracy | ±5pm | |
| Wavelength | 8 channels | 16 channels |
| 1545.32 | - | Channel 1 |
| 1546.12 | - | Channel 2 |
| 1546.92 | - | Channel 3 |
| 1547.72 | - | Channel 4 |
| 1548.51 | - | Channel 5 |
| 1549.32 | Channel 1 | Channel 6 |
| 1550.12 | Channel 2 | Channel 7 |
| 1550.92 | Channel 3 | Channel 8 |
| 1551.72 | Channel 4 | Channel 9 |
| 1552.52 | Channel 5 | Channel 10 |
| 1553.33 | Channel 6 | Channel 11 |
| 1554.13 | Channel 7 | Channel 12 |
| 1554.94 | Channel 8 | Channel 13 |
| 1555.75 | - | Channel 14 |
| 1556.55 | - | Channel 15 |
| 1557.36 | - | Channel 16 |

* Design and specifications are subject to change without notice.

Distributed by:

SAMSUNG

ELECTRONICS

SAMSUNG ELECTRONICS CO.,LTD.

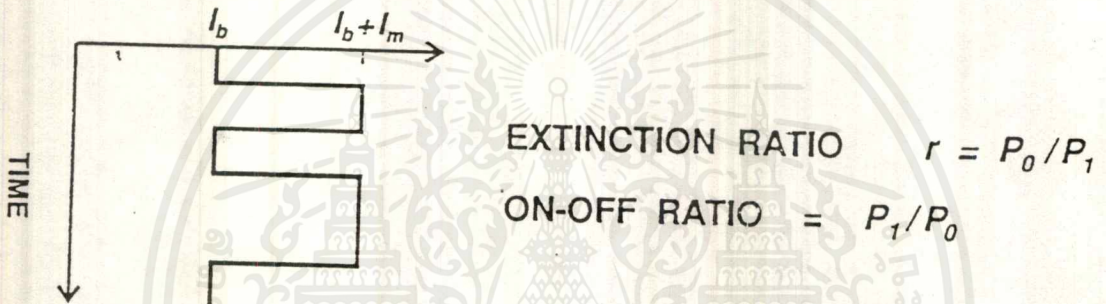
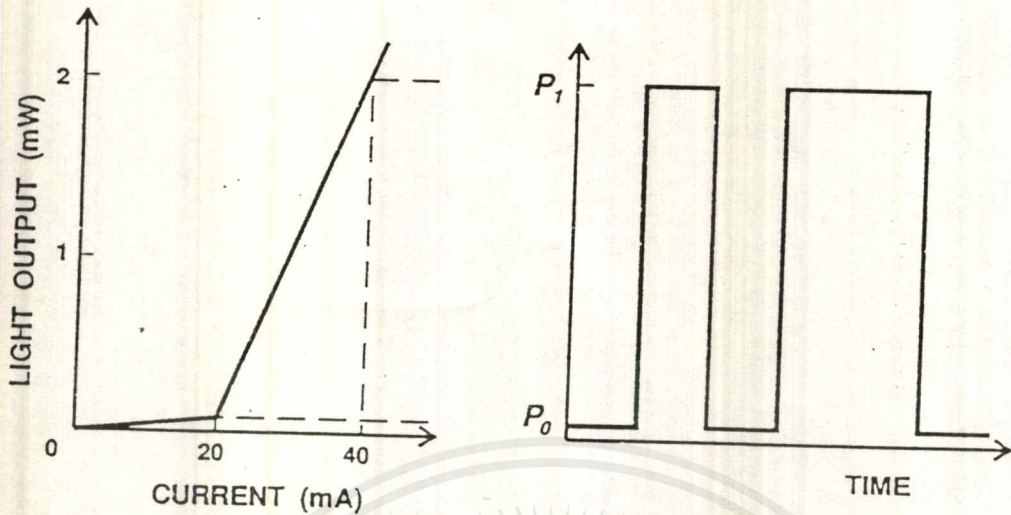
7th Fl. Samsung Main Bldg. 250, 2-Ka, Taepyeong-Ro,
Chung-ku, Seoul, Korea 100-742

Tel: +82-2-726-3851-5 Fax: +82-2-726-3809 / 753-3037

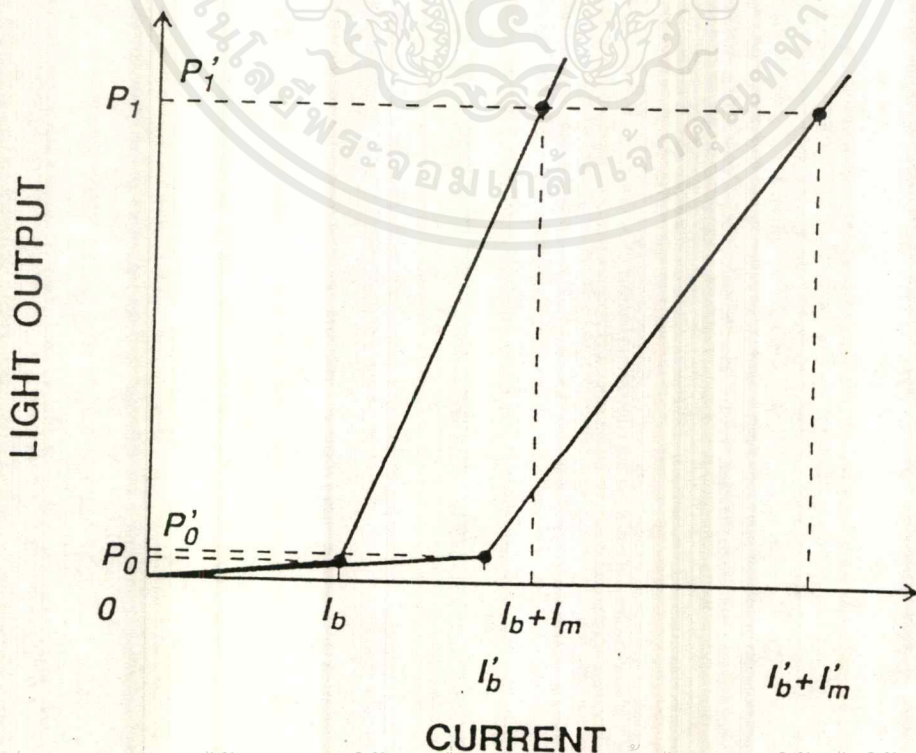
Internet Homepage : <http://samsungelectronics.com>

สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LASER DRIVER

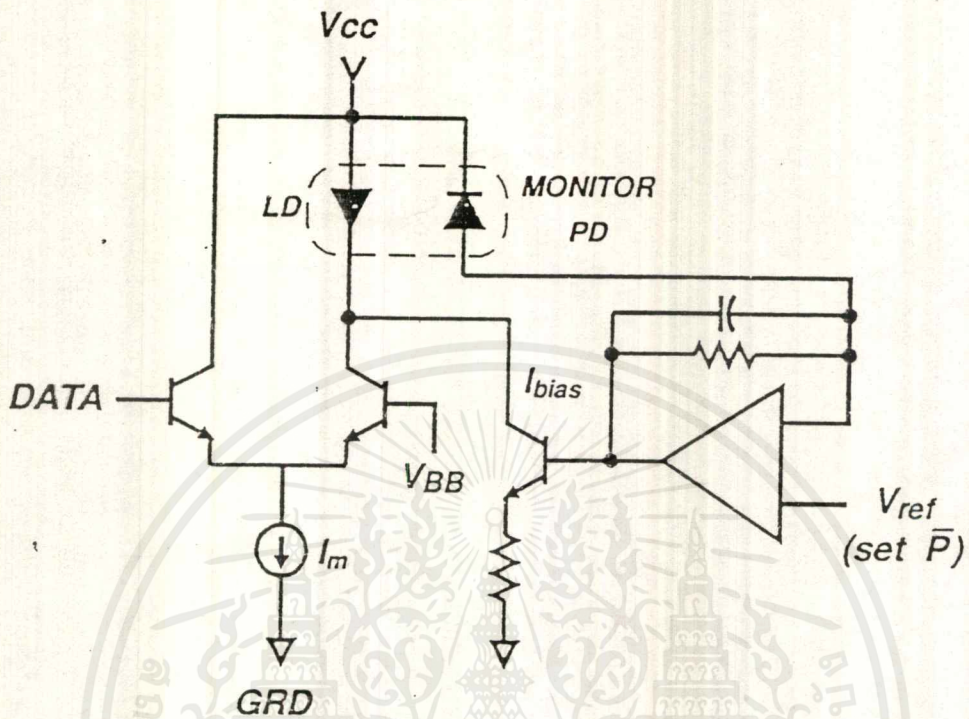


EFFECT OF TEMPERATURE OR AGING

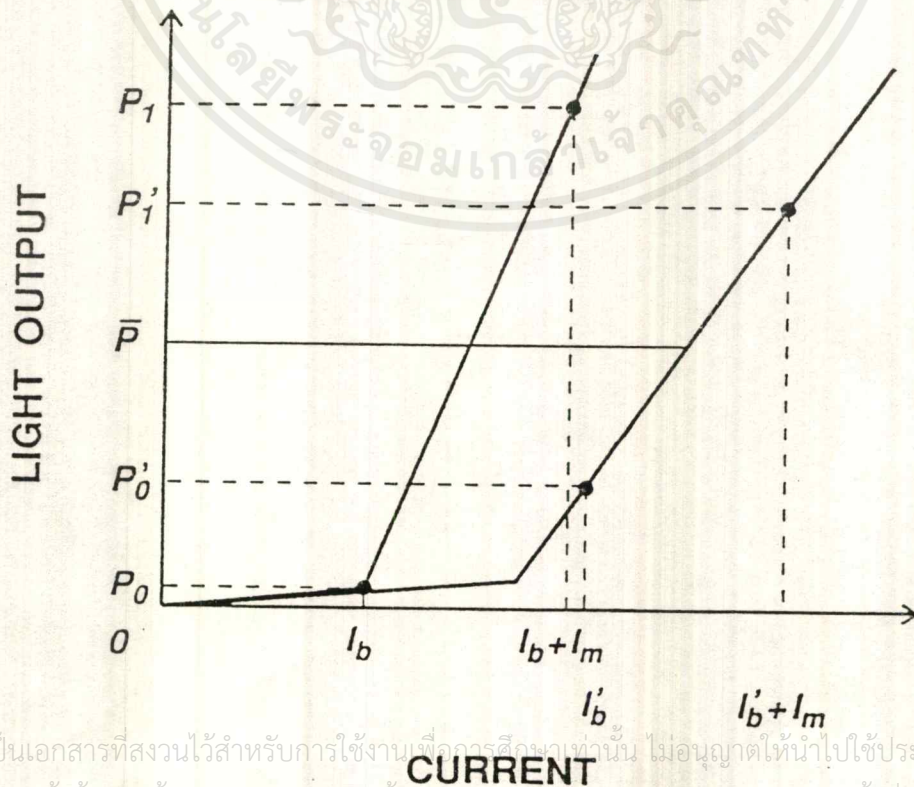


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AVERAGE POWER CONTROL (APC)

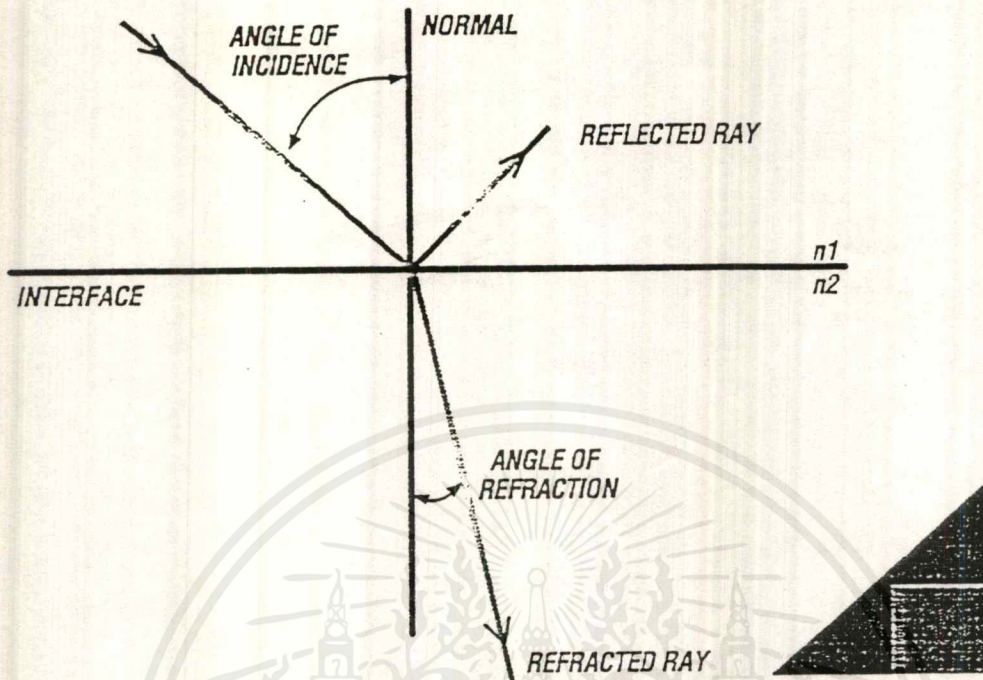


EXTINCTION RATIO DEGRADATION DUE TO APC



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reflection and Refraction



Index of Refraction

| MATERIAL | INDEX (n) | LIGHT VELOCITY (km/s) |
|--------------|-----------|-----------------------|
| VACUUM | 1.0 | 300,000 |
| AIR | 1.0003 | 300,000 |
| WATER | 1.33 | 225,000 |
| FUSED QUARTZ | 1.46 | 205,000 |
| GLASS | 1.5 | 200,000 |

n = Index of refraction

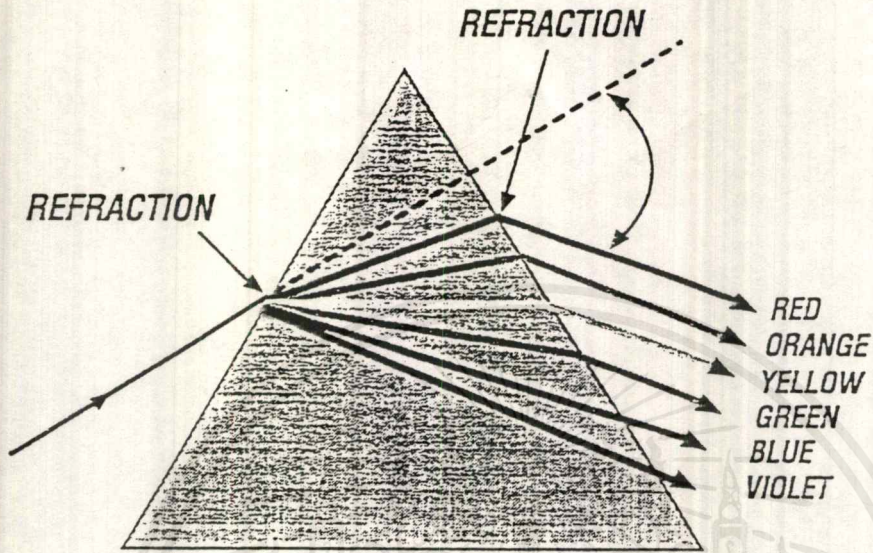
C = Velocity of light in free space

V = Velocity of light in a specific medium

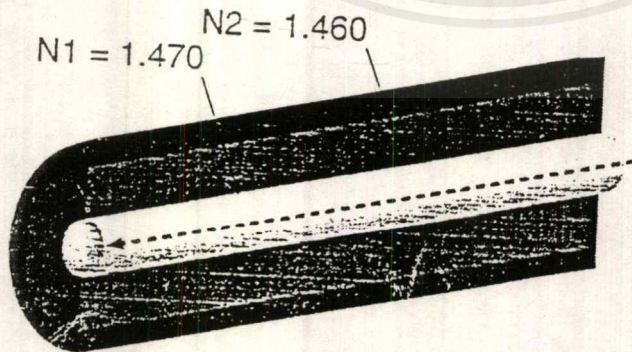
$$n = \frac{C}{V}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reflection and Refraction

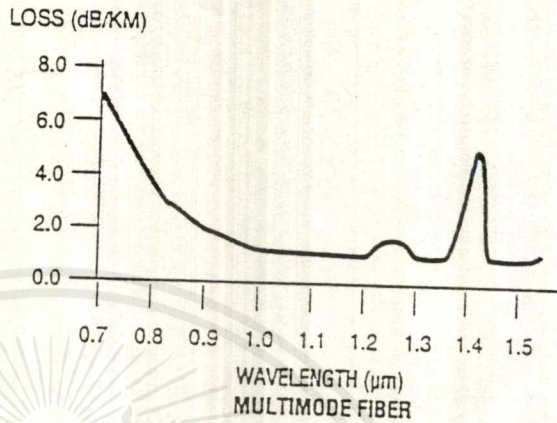
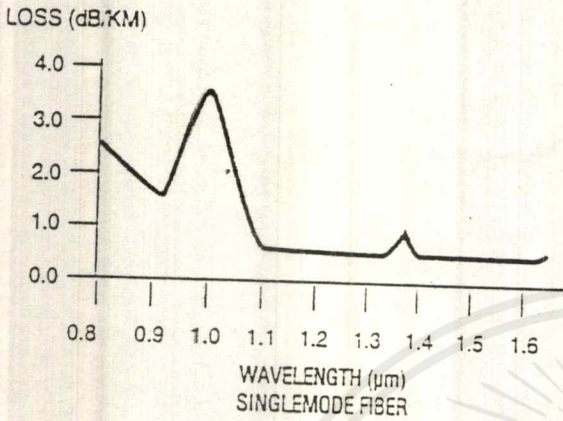


What Is The Index of Refraction?

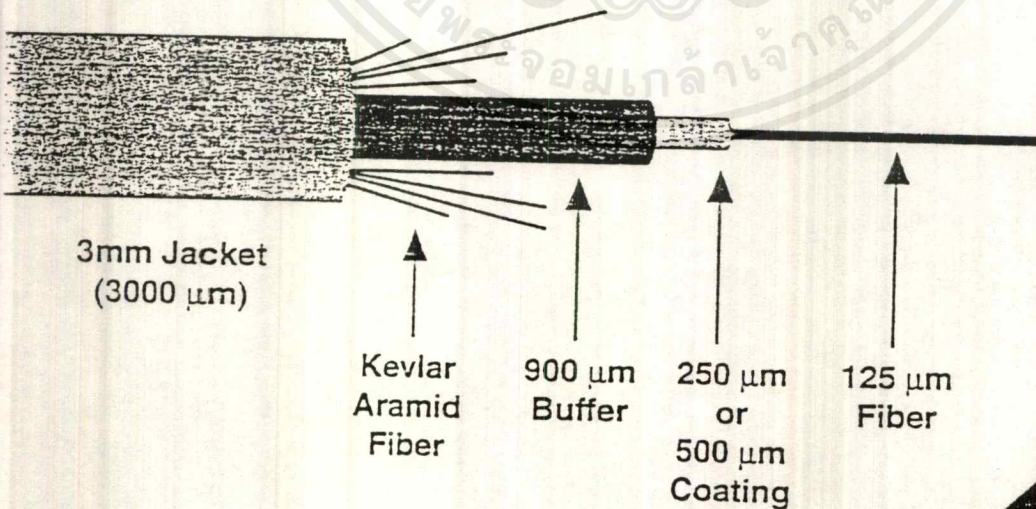


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

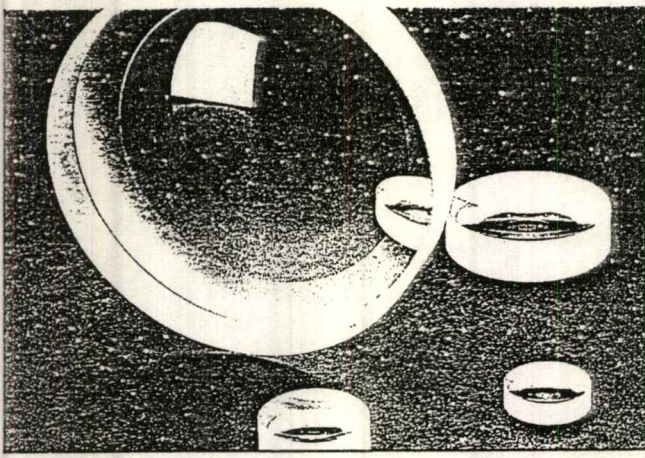
Wavelength vs. Attenuation



3mm Cable



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



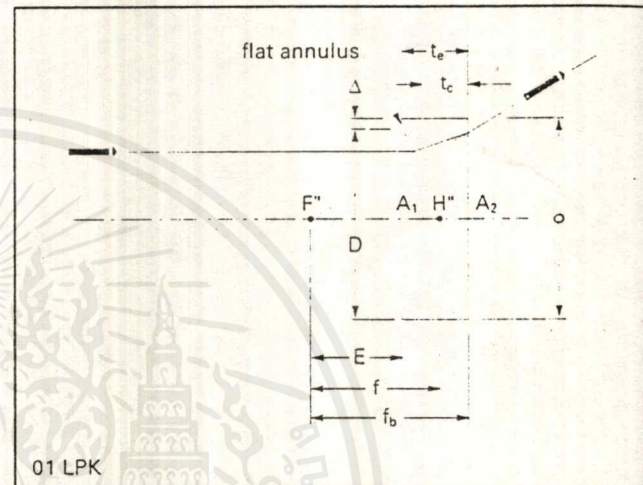
Plano-Concave Glass Lenses

This lens type has a negative focal length, diverges collimated incident light, and forms only virtual images which are seen through the lens. It is often used to expand light beams or to increase focal lengths in existing systems.

The plano-concave lens offers very nearly minimum spherical aberration at negative-infinite or near-infinite conjugate ratios, with the concave surface facing the longest conjugate distance. A collimated beam incident on the curved surface will be transformed into a divergent beam emergent from the plane surface. The divergent beam will appear to emerge from a smaller (more nearly diffraction-limited) virtual point source than if the plane surface had faced toward the collimated beam.

Reversing the rays in the above description, a convergent beam is transformed with least additional spherical aberration into a collimated beam if the convergent beam is incident on the plane surface. The word "additional" is used, as the convergent beam may already contain spherical aberration and, depending on its sign, the plano-concave lens may either increase or decrease the total for a lens combination. Thus, in some applications, the opposite orientation of an element may reduce the overall aberration of a lens combination.

A variety of single and multilayer antireflection coatings is available for these lenses, as described in Chapter 5, Optical Coatings. When a reflective coating is deposited on the concave lens surface an excellent concave mirror is formed. A variety of reflective and partially reflective coatings will also be found in the coating suffix system.



SPECIFICATIONS: PLANO-CONCAVE GLASS LENSES

Paraxial Focal Length (f): $\pm 2\%$

Design Wavelength (λ_0): 546.1 nm

Design Index (n_0): 1.5187 ± 0.001

Centration: 3 arc minutes

Diameter (ϕ): +0, -0.15 mm

Clear Aperture Diameter (D): $D = \phi - 2\Delta$

Nominal Flat Annulus Width (Δ): +0%, -70%

$\Delta = 0.2$ mm for $\phi \leq 40$ mm

$\Delta = 0.4$ mm for $\phi > 40$ mm

Center Thickness (t_c): ± 0.2 mm

Material: BK 7, grade A fine annealed

Surface Quality: Pitch polished, 60-40 scratch-dig

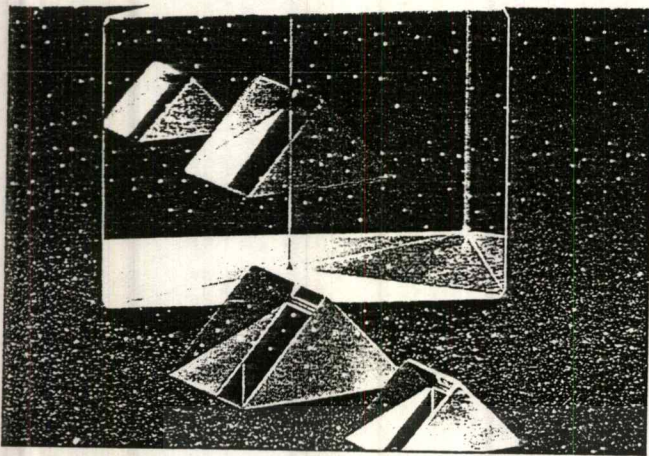
Circumference and flat annulus are ground, and both edges have a slight protective bevel.

Diameters of all lenses may be reduced ("edged") by us to meet your requirements.

Plano-concave lenses can be used as spherical concave reflectors by coating the concave surface with a reflective coating.

The relationship between the mirror focal length and radius is $f = -\frac{r}{2}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



High-Precision Right-Angle Prisms

These high-precision right-angle prisms were designed with the more demanding applications in mind. We offer these prisms in either UV grade synthetic fused silica or BK 7 glass. Our manufacturing process is closely monitored to guarantee a very tight surface flatness specification. For our BK 7 prisms, even wavefront distortion is controlled to a high degree.

The UV grade synthetic fused silica right-angle prism combines the mounting and acoustic isolation advantages of a prism with excellent transmission in the ultraviolet. But because the index of synthetic fused silica is somewhat lower than that of BK 7, the critical angle for TIR is greater (thereby reducing the TIR field acceptance limits). For larger field angles or non-collimated beams, the hypotenuse face can be coated with any of the metallic reflective coatings. (Silver is not recommended for UV applications.) Prisms both with and without aluminized hypotenuse faces are listed below. The aluminized hypotenuse is protected by a coating of black paint which is acetone-soluble, and can be easily removed if desired.

Very high prism transmission can be achieved by using the hypotenuse face in total internal reflection (TIR), and by anti-reflection coating the entrance and exit faces. Antireflection coatings are discussed in Chapter 5, Optical Coatings.

All right-angle prisms listed have entrance and exit faces of identical size and shape: $A=B=C$ in the figure. Triangular faces are fine ground, and all edges are slightly beveled.

SPECIFICATIONS: HIGH-PRECISION RIGHT-ANGLE GLASS PRISMS

Dimensions: ± 0.10 mm

Surface Flatness:

$\lambda/10$ at 632.8 nm over 90% of edge dimension

Wavefront Distortion:

$\lambda/8$ at 632.8 nm over 90% of edge dimension

Angle: ± 1 arc minute

Material: BK 7, grade A fine annealed

Surface Quality: 20-10 scratch and dig

Bevel Width: 0.25 mm maximum

High-Precision Right-Angle Glass Prisms

| A=B=C (mm) | PRODUCT NUMBER | |
|---------------|----------------------------|--------------------------|
| | Unaluminized Hypotenuse | Aluminized Hypotenuse |
| 3.2 | 01 PRB 001 | 01 PRC 001 |
| 5.0 | 01 PRB 003 | 01 PRC 003 |
| 10.0 | 01 PRB 009 | 01 PRC 009 |
| 12.7 | 01 PRB 011 | 01 PRC 011 |
| 20.0 | 01 PRB 019 | 01 PRC 019 |
| 25.4 | 01 PRB 021 | 01 PRC 021 |
| 38.1 | 01 PRB 027 | 01 PRC 027 |

For coatings append Coating Suffix from the previous page and specify faces to be coated.

SPECIFICATIONS: HIGH-PRECISION RIGHT-ANGLE FUSED SILICA PRISMS

Dimensions: ± 0.15 mm

Surface Flatness:

$\lambda/4$ at 632.8 nm over 90% of edge dimension

Angle: ± 30 arc seconds

Material: UV grade synthetic fused silica

Surface Quality: 60-40 scratch and dig

Bevel Width: 0.15 mm maximum

High-Precision Right-Angle Fused Silica Prisms

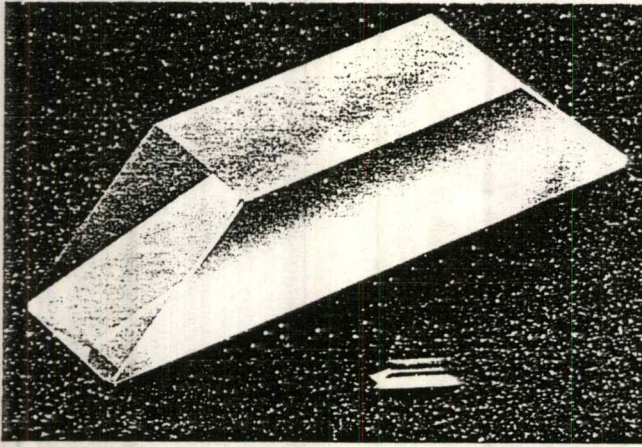
| A=B=C (mm) | PRODUCT NUMBER | |
|---------------|----------------------------|--------------------------|
| | Unaluminized Hypotenuse | Aluminized Hypotenuse |
| 10.0 | 01 PQB 000 | 01 PQA 000 |
| 12.7 | 01 PQB 001 | 01 PQA 001 |
| 25.4 | 01 PQB 002 | 01 PQA 002 |

For coatings append Coating Suffix from the previous page and specify faces to be coated.

For a complete listing of antireflection and reflective coatings see Chapter 5, Optical Coatings.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดย บริษัท ออปติคัล เทคโนโลยี จำกัด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



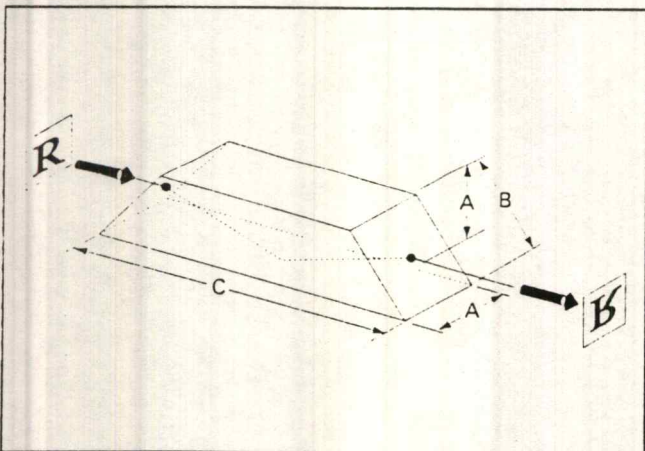
Dove Prisms

Dove prisms are used as image rotators in a variety of opto-mechanical systems. As the prism is rotated, the image passing through will rotate at twice the angular rate of the prism. Light entering the dove prism must be parallel or collimated, because the length of the prism is typically four or five times the height of the prisms or the dimension A. The hypotenuse face of a dove prism is the face of the largest area. Normally the dove prism is used in the total internal reflection (TIR) mode, with the hypotenuse face unaluminized. Cleanliness of this face is important.

The useful aperture of a dove prism can be conveniently doubled by aluminizing or silvering the hypotenuse face of two identical prisms, and subsequently cementing these faces together. The length of the combination is the same as for a single prism. Overall transmission is slightly reduced by the substitution of the metallic reflecting film for the usual TIR surface.

Either bare aluminum or internal silver may be coated on these prisms on a special request basis. When this is done, the coatings are protected by an overcoating of black lacquer.

The clear aperture of these prisms is square and is given by 90% of the dimension A in the figure. Single layer AR coatings and broadband HEBBAR™ antireflection coatings are available for the entrance/exit faces on special request. For HEBBAR coating, please use the /079 coating suffix. For V-coatings please specify both the wavelength and polarization required.



SPECIFICATIONS: DOVE PRISMS

Dimensions: ± 0.15 mm

Design Index: 1.5168

Design Wavelength: 587.6 nm

Surface Flatness:

$\lambda/2$ at 632.8 nm over 90% of edge dimension

Angles: ± 3 arc min

Material: BK 7, grade A fine annealed

Surface Quality: 60–40 scratch and dig

Coatings: See text at left

Sides are fine ground. All edges are lightly beveled.

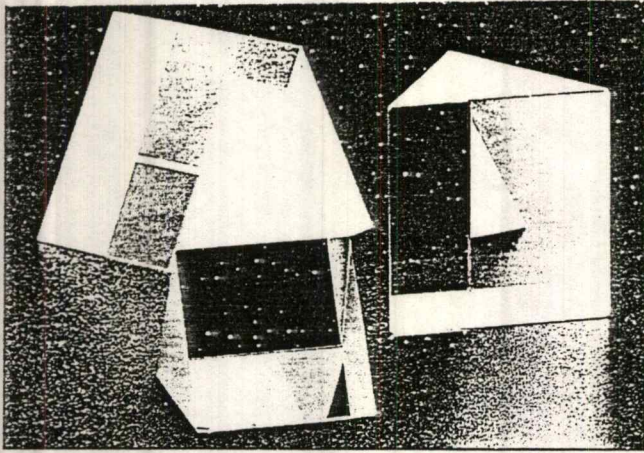
Unaluminized Dove Prisms (TIR)

| A (mm) | B (mm) | C* (mm) | PRODUCT NUMBER |
|-----------|-----------|------------|-------------------|
| 1.2 | 1.7 | 5.07 | 01 PDE 401 |
| 2.0 | 2.8 | 8.45 | 01 PDE 403 |
| 2.5 | 3.5 | 10.56 | 01 PDE 405 |
| 3.6 | 5.1 | 15.22 | 01 PDE 407 |
| 6.0 | 8.5 | 25.37 | 01 PDE 409 |
| 10.0 | 14.1 | 42.28 | 01 PDE 001 |
| 15.0 | 21.2 | 63.41 | 01 PDE 003 |
| 20.0 | 28.3 | 84.55 | 01 PDE 005 |

*To theoretical sharp edges (unbeveled).

Precision Prism and Beamsplitter tables are available for mounting and aligning your setups. (See Chapter 27, Optical Component Holders).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Equilateral Dispersing Prisms

Equilateral prisms are used as dispersing elements in instruments and experiments requiring wavelength separation. While prism dispersion (output ray direction versus wavelength) is nonlinear, spectral brightness is superior to that of diffraction gratings, and there is no possibility of confusion from overlapping spectral orders. The 60-degree angles between the rectangular faces result in a good compromise between dispersion and reflection losses.

A light ray is twice refracted in passing through the prism with total deviation denoted by θ_d in the figure. Deviation is a function of refractive index, and hence of wavelength. Angular dispersion ($\Delta\theta_d$) is the difference in deviation for light rays having different wavelengths. This difference varies with prism orientation. The F (blue) and C (red) lines of the atomic hydrogen spectrum are frequently used to define angular dispersion. It is desirable to have large angular dispersions, as this leads to high instrumental spectral resolution at fixed slit width.

Reflection losses are, for an unpolarized ray of some particular wavelength, minimized for the condition known as minimum deviation, in which the ray travels parallel to the base of the prism while passing through it. This is also the condition in which the angular dispersion of the prism for nearby wavelengths is most nearly linear. In this condition wavelengths of unknown spectrum lines can be approximated by linear interpolation between closely

spaced lines of known wavelength. Externally, the minimum deviation condition is identified by the fact that, for the ray and wavelength of concern, the angle of incidence at the entrance surface is equal to the angle of emergence (both angles measured with respect to the surface normals) at the exit surface.

We offer equilateral dispersing prisms of two materials, crown (BK 7) and flint (F 2). BK 7 is the more durable material and has superior transmission (both internally and at the surfaces). F 2 flint offers superior dispersion, but is somewhat more fragile and sensitive to staining. Antireflection coatings can be applied to all surfaces, serving both to protect from staining and improve transmission. Such coatings also reduce polarization at the prism surfaces by increasing the total transmittance. For more information on these materials, refer to the Optical Materials chapter in the front of the catalog.

SPECIFICATIONS: EQUILATERAL DISPERSING PRISMS

Dimensions: ± 0.2 mm

Surface Flatness: $\lambda/2$ at 546.1 nm over 90% of edge dimension

Angles: ± 3 arc min

Materials

Crown: BK 7, grade A fine annealed

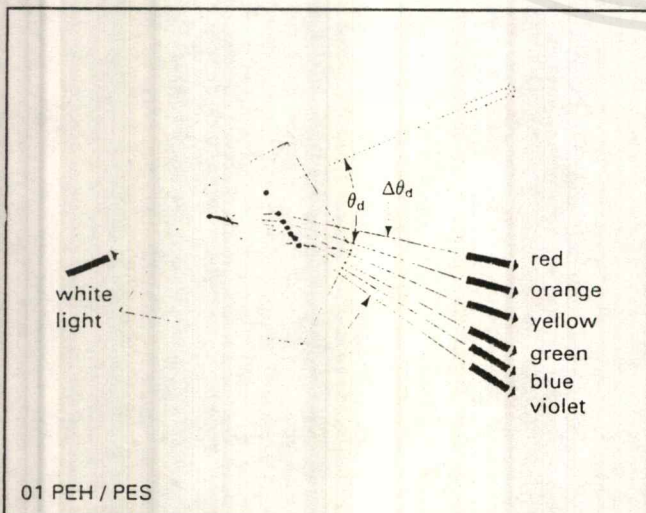
Flint: F 2, grade A fine annealed

Surface Quality: 60–40 scratch and dig

Coatings:

Single layer MgF_2 (/066) or HEBBAR™ (/078),

by appending the appropriate Coating Suffix

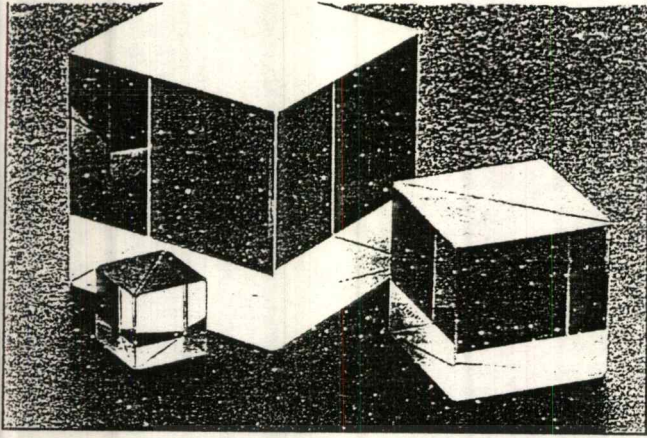


Equilateral Dispersing Prisms

| Edge Dimensions (mm) | PRODUCT NUMBER | |
|----------------------|----------------|-------------|
| | BK 7 (Crown) | F 2 (Flint) |
| 25.0 | 01 PES 001 | 01 PEH 010 |
| 30.0 | 01 PES 003 | 01 PEH 011 |
| 40.0 | 01 PES 005 | 01 PEH 013 |
| 45.0 | 01 PES 007 | 01 PEH 015 |
| 50.0 | 01 PES 009 | 01 PEH 017 |
| 60.0 | 01 PES 011 | 01 PEH 019 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Cube Beamsplitters

Cube beamsplitters have several advantages over plate beamsplitters and are widely used for a variety of reasons. These are rugged beamsplitters which are easy to mount and are ideal for beam superposition applications. This type of beamsplitter deforms much less when subjected to mechanical stress than does a plate beamsplitter. Most of the unwanted reflections from a cube beamsplitter are in the retro direction and do not contribute to ghost images. The coating is very resistant to degradation with time since it is sealed within the body of the cube.

If cube beamsplitters are used in convergent or divergent portions of an optical beam, they will contribute substantial amounts of unwanted spherical aberration. This can be avoided or minimized by only using these components with collimated, or nearly collimated, beams. Conjugate distances which include cubes therefore, should be long. Alternately, other elements of the system can be designed to compensate for any aberrations introduced by the cube in a non-collimated beam.

Cube beamsplitters consist of matched pairs of identical right-angle prisms, with their hypotenuse faces cemented together. Prior to cementing, a partial reflection film is deposited onto one of the hypotenuse faces. The prism which is coated is marked with a small dot on one of the ground faces. For best results, the incident beam should be on one of the faces of this prism.

We currently offer five types of cube beamsplitter, classified by the nature and performance of the partial reflection coating used. These are metal dielectric hybrid, broadband all-dielectric, laser-line non-polarizing all-dielectric, laser line polarizing and broadband polarizing. The latter two types are listed in Chapter 12, Polarization Components.

Each of the coating types has its particular merits and limitations, so your selection should depend on the intended application.

HYBRID PARTIAL REFLECTION COATINGS

Hybrid, metal-dielectric coatings combine the benefits of both metals and dielectrics to produce a moderate absorption beamsplitter with little polarization sensitivity. Typically, absorption is about 10% (20% for UV cube beamsplitters), while reflection and transmission are both approximately 45%, with the s- and p-polarized components within 10% of each other. The broadband spectral flatness of these beamsplitters makes them ideal for wavelength scanning instruments.

Another advantage of these hybrid coatings is that they are fairly insensitive to changes in the angle of incidence. Although

the cube beamsplitter configuration usually causes the angle of incidence to be 45°, this angular invariance in the performance has the advantage of making these beamsplitters chromatically neutral for convergent or divergent beams.

Melles Griot hybrid coatings cover the visible spectrum (400–700 nm), ultraviolet (240–400 nm), and near-infrared (700–1100 nm) for diode laser use. Longer or shorter wavelength versions of this coating are not possible due to material limitations.

BROADBAND PARTIAL REFLECTION COATINGS

Broadband partial reflection coatings provide a high degree of efficiency. There is negligible absorption in the coating, and the reflected and transmitted components have almost equal intensity over a broadband wavelength range, when averaged over p- and s-polarizations. However, they are extremely polarization sensitive, with the s- and p-components differing by as much as 70%. Great care should therefore be taken when using these broadband beamsplitters to consider polarization implications for the optical system into which they are to be integrated.

Melles Griot offers broadband partial reflection coatings for the visible spectrum (450–650 nm), ultraviolet (250–440 nm), near-infrared laser diodes (650–900 nm), neodymium laser region (900–1300 nm), and telecommunications diode lasers (1300–1600 nm).

LASER-LINE NON-POLARIZING COATINGS

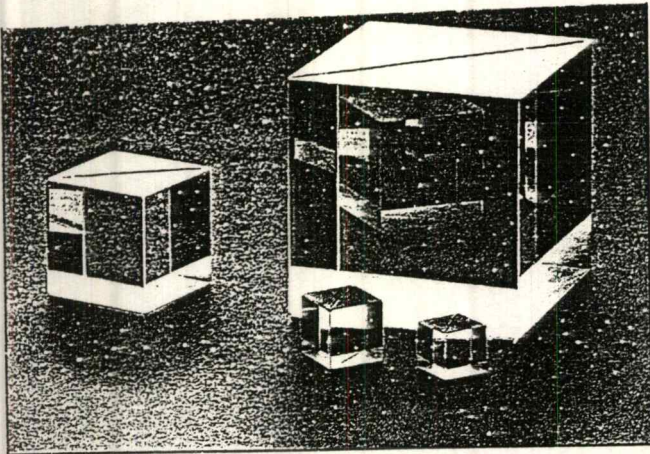
This range of cube beamsplitter coatings is intended for those applications where polarization effects must be kept to an absolute minimum. Unlike the hybrid coatings, these dielectric coatings are designed for high performance at specific wavelengths, where they easily exceed the performance of any other available cube beamsplitters. Being totally dielectric, they have negligible absorption.

At the design wavelength, each of these beamsplitters reflect $50 \pm 5\%$ of incident light. The s- and p-components of the reflected (and therefore transmitted) beam differ by less than 5%, (i.e., each is within $\pm 3\%$ of the average polarization performance).

The current range of these beamsplitters covers four important laser wavelengths; these are 632.8, 670, 780, 830 nm. Other wavelengths and sizes can be accommodated on special request.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

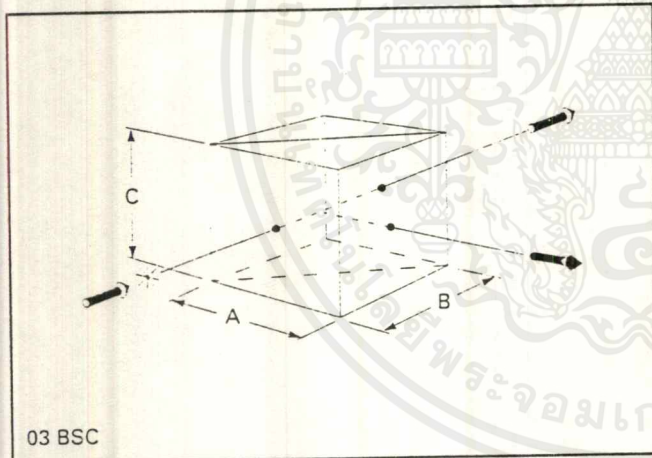
ไม่ว่ากรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Hybrid Cube Beamsplitters

SPECIFICATIONS: VISIBLE AND NEAR-IR HYBRID CUBE BEAMSPLITTERS

Dimensions: ± 0.3 mm
 Material: BK 7, grade A fine annealed
 Face Flatness: $\lambda/2$ per clear aperture at 546.1 nm
 Transmission: $45 \pm 6\%$ ($\pm 5\%$ variation with wavelength)
 Absorption: $<10\%$
 Transmitted Beam Deviation: <5 arc minutes
 Coatings: All 4 faces HEBBAR™ antireflection coated
 Surface Quality: 60-40 scratch and dig



SPECIFICATIONS: UV HYBRID CUBE BEAMSPLITTERS

Dimensions: ± 0.3 mm
 Material: UV grade synthetic fused silica
 Face Flatness: $\lambda/4$ per clear aperture at 632.8 nm
 Transmission:
 $43 \pm 6\%$ for 280-400 nm wavelength range
 $38 \pm 6\%$ for 250-280 nm wavelength range
 s- and p-components matched to within 5% for both ranges
 Absorption: $<24\%$
 Transmitted Beam Deviation: <5 arc minutes
 Coatings:
 All 4 faces antireflection coated for $<1\%$ reflectance per surface
 Surface Quality: 40-20 scratch and dig

ANTIREFLECTION COATINGS

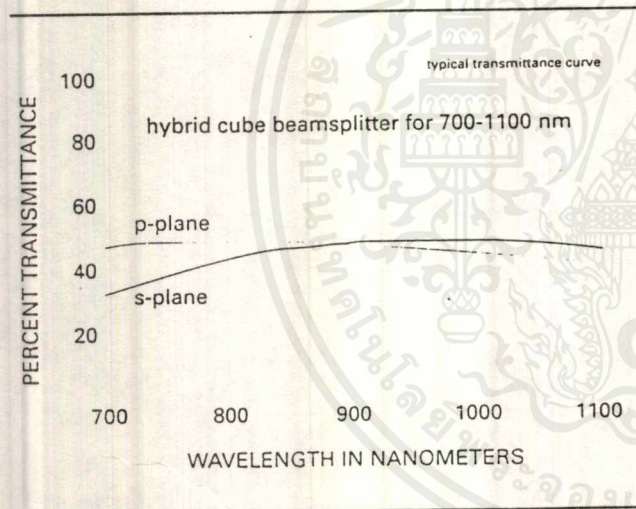
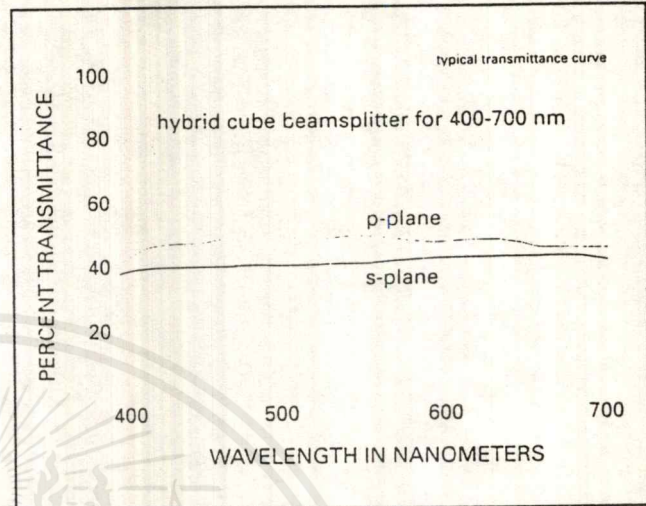
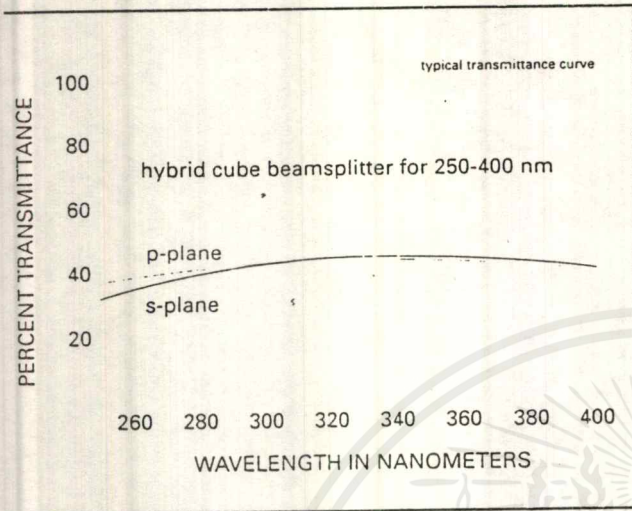
All of our cube beamsplitters are antireflection coated on all four faces to minimize ghost images and reflection losses. They are normally supplied with a multilayer HEBBAR™ antireflection coating. There is no need to append a Coating Suffix.

Hybrid Cube Beamsplitters

| A=B=C (mm) | PRODUCT NUMBER | | |
|---------------|-----------------------|--------------------|---------------------------|
| | Wavelength Range (nm) | | |
| | UV 250-400 | Visible 400-700 | Near-Infrared 700-1100 |
| 5.0 | — | 03 BSC 001 | 03 BSC 023 |
| 10.0 | — | 03 BSC 003 | 03 BSC 025 |
| 12.7 | 03 BSC 055 | 03 BSC 005 | 03 BSC 026 |
| 20.0 | — | 03 BSC 007 | 03 BSC 027 |
| 25.4 | 03 BSC 057 | 03 BSC 009 | 03 BSC 029 |
| 30.0 | — | 03 BSC 011 | — |
| 40.0 | — | 03 BSC 013 | — |
| 50.8 | — | 03 BSC 015 | 03 BSC 031 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

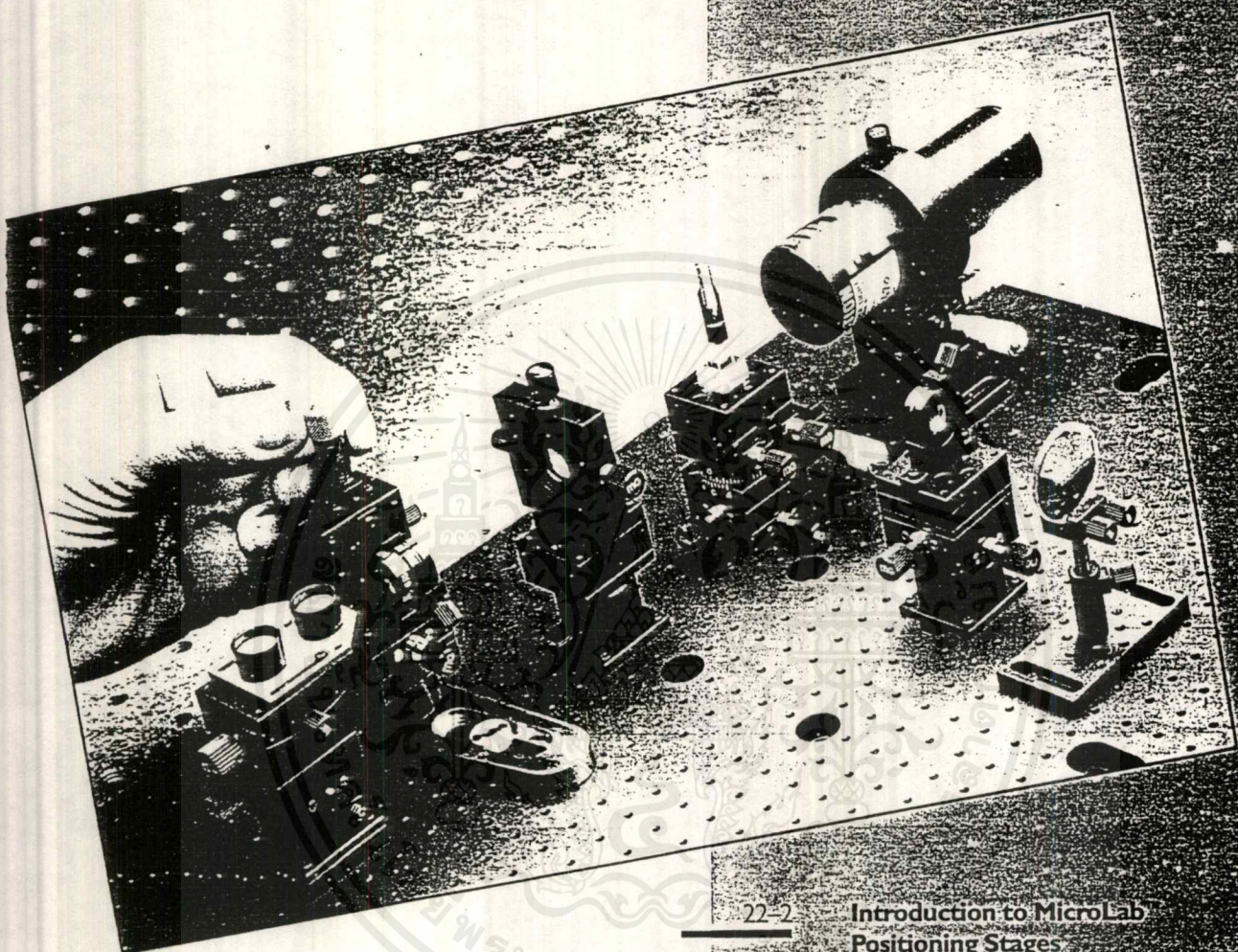


LASER BEAM COLLIMATION

A plane parallel plate, such as a plate or cube beamsplitter, will introduce spherical aberration into a converging or diverging beam. Thus, for optimum performance, one should have excellent collimation going into these optics. For coherent visible sources, this is most easily achieved through the use of a Shear Plate Collimation Tester (page 57-25). These are simple to use devices which allow one to rapidly assess the state of collimation through a simple visual test.

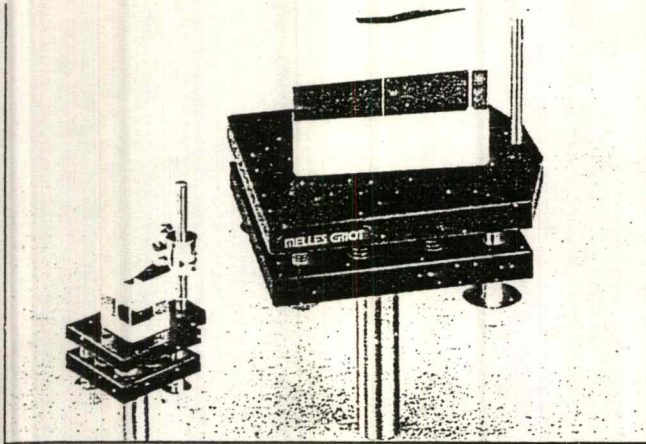
Melles Griot also offers a range of polarizing cube beamsplitters which can be found in Chapter 12, Polarization Components. The 03 PBS series of polarizing cube beamsplitters are designed for specific laser wavelengths, while the 03 PBB series exhibit broadband performance.

MicroLab™ Positioning Stages



- 22-2 Introduction to MicroLab Positioning Stages
- 22-4 Single-Axis Translation Stages
- 22-5 Integral XY Translation Stages
- 22-6 Vertical Translation Stage
- 22-7 Integral XYZ Translation Stage
- 22-8 Low-Profile Tilt Stage
- 22-9 Rotation Stages
- 22-10 Goniometers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Post-Mounted Prism/ Beamsplitter Tables

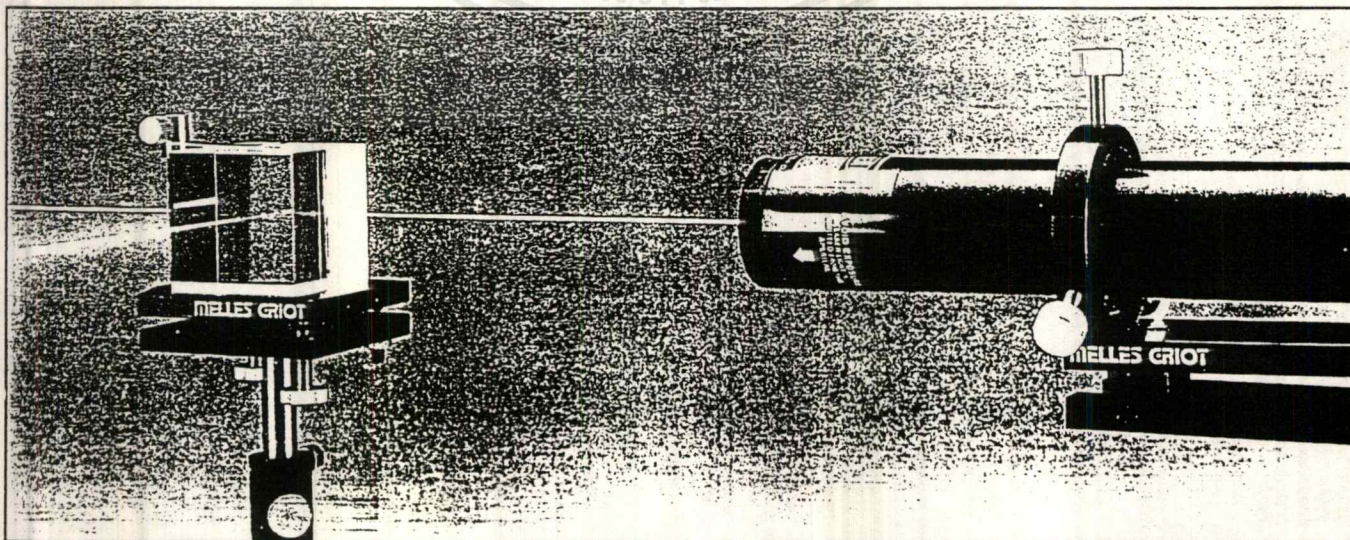
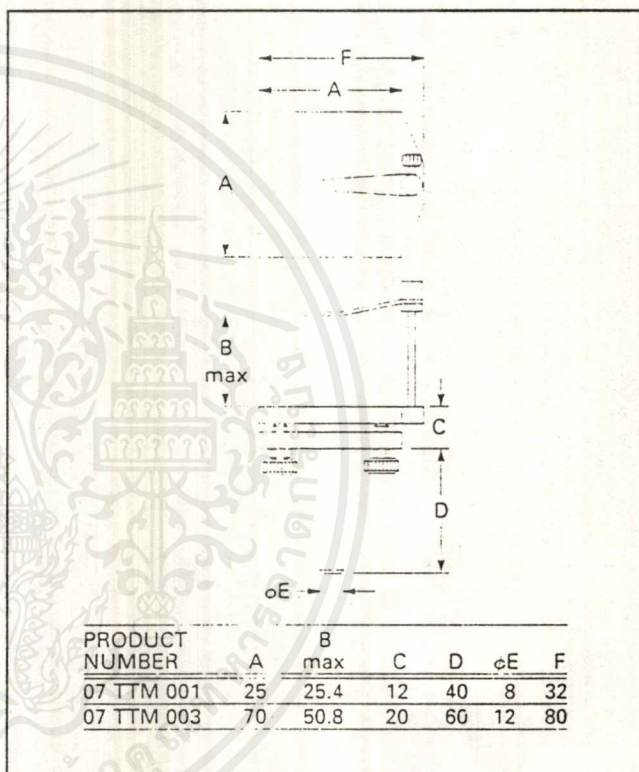
These tables provide an easy means of mounting and adjusting a variety of prisms or cube beamsplitters. The optic is placed on top of the platform and held in position by a spring retainer. High resolution tilt adjustment about two axes is provided by means of the 0.5-mm-pitch (50-TPI) thumbscrews projecting from the underside of the platform. θ_x and θ_y tilt is $\pm 3^\circ$ in each axis.

Two sizes are offered to suit prisms and beamsplitters up to 25.4 or 50.8 mm in height. These items can be found beginning on pages 10-4 and 11-8.

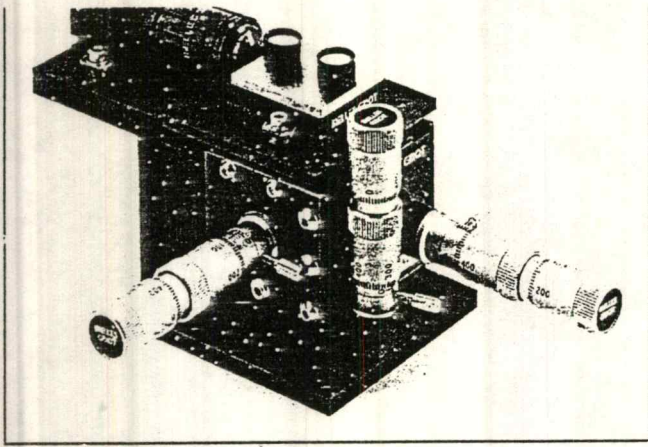
The smaller table is supplied with an 8-mm-diameter stainless steel post with an M4 thread and the larger table is supplied with a 12-mm-diameter post with an M6 thread. These prism/beam splitter tables are made of black anodized aluminum and chromed steel.

Post-Mounted Prism/Beamsplitter Tables

| Maximum Prism Height (mm) | Post Diameter (mm) | Post Thread | PRODUCT NUMBER |
|---------------------------|--------------------|-------------|----------------|
| 25.4 | 8 | M4 | 07 TTM 001 |
| 50.8 | 12 | M6 | 07 TTM 003 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



The MicroBlock™ Alignment System

The MicroBlock™ alignment system has been developed to meet general laboratory and fiber optic needs for multi-axis positioning and alignment with submicron precision. Central to the system is the three-axis MicroBlock stage itself, a compact X-Y-Z flexure-based positioner featuring the UltraMike™ differential micrometer drives with graduated scales or UltraFine™ differential drives, both with 50 nm resolution. In addition, piezoelectric fine-motion controls are available on all axes. The MicroBlock is ideal for use with single-mode fibers. It is also available with simpler actuators appropriate for use with less demanding multimode fiber systems (*see pages 36-6 through 8 for full details*).

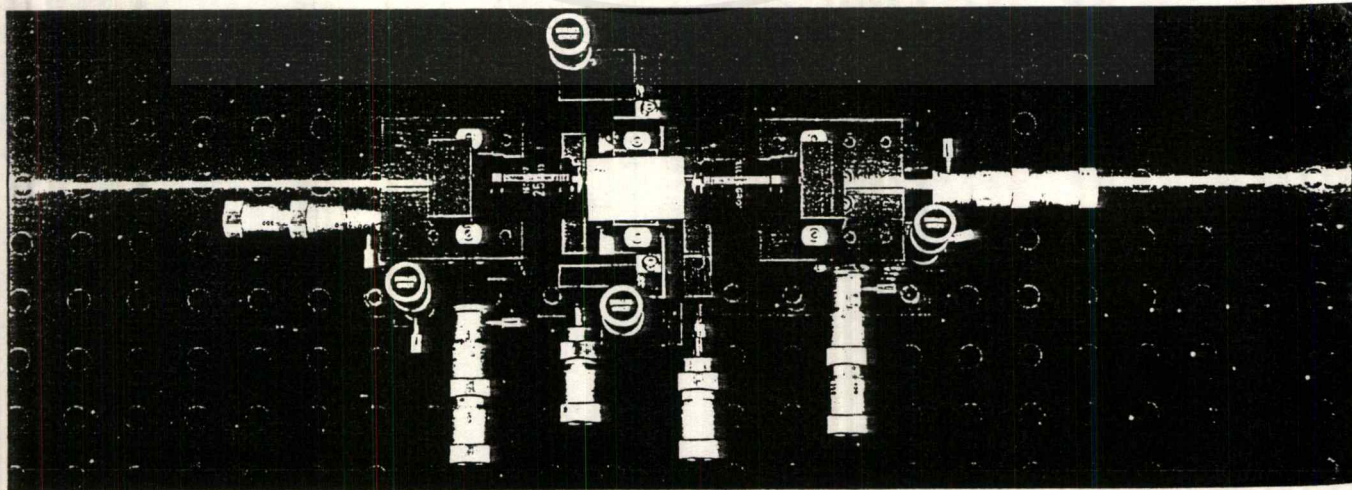
The top-mounting platform of the MicroBlock can be adjusted along the three orthogonal translational axes, X, Y, and Z. This mounting platform has a nominal height of 62.5 mm and provides a common optical axis height of 75 mm for a wide range of interchangeable accessories. These accessories include fiber mounts, lens and gradient index lens mounts, rotators for polarization-preserving fibers, thermoelectric-cooled diode laser mounts, microscope-objective mounts, and simple V-grooves with magnetic clamps. (*These accessories are described in detail in Chapter 40 and are illustrated on page 34-11.*)

A platform-bracket in the shape of an inverted L can be attached to the side of the MicroBlock to provide a fixed platform adjacent to the adjustable moving platform, either along the X optical axis direction or transverse to it. This platform allows accessories to be mounted at the optical axis height of 75 mm adjacent to accessories being translated by the MicroBlock moving platform.

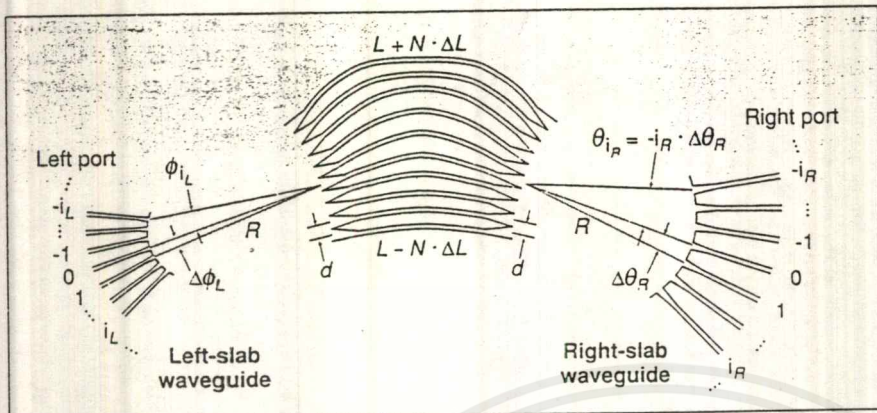
Likewise, the MicroRoll™ rotation stage attaches to the sides of the MicroBlock, or it can be mounted independently. This allows precise rotation of a platform relative to the MicroBlock platform about the 75-mm-high optic axis. The MicroRoll can also be attached to the MicroBlock platform to obtain a X-Y-Z-θ platform (*see pages 36-7 and 36-9 for full details*).

Several other stages and manipulators are available to support and adjust components about the optical axis height of 75 mm. These include fixed-height and Y-Z adjustable platforms (*see page 36-14*) and two waveguide manipulators incorporating θ_y and θ_z motions in addition to Y and Z (*see pages 36-12 and 36-13*).

Various applications and assemblies are demonstrated throughout this chapter, and further possibilities are discussed in the systems portfolio in Chapter 41. The range of possibilities is demonstrated by contrasting the two photographs on this page. In the top photograph a MicroBlock is being used to launch a collimated optical beam into a bare fiber (retained in position with two magnetic clamps) using a microscope objective. In the photograph at the bottom of the page two MicroBlocks are used in an end-fire coupling system, designed to couple light into and out of integrated optical and opto-electronic devices. In the basic end-fire system shown here, microscope objectives are used to focus collimated light into and out of a waveguide. The waveguide is mounted on a 17 AMT 001/D four-axis manipulator (*see page 36-12 for details*).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Central waveguide structure of multiplexer/demultiplexer device acts as a grating, separating a signal into its component colors or combining signals for transmission. Right and left waveguide arrays are for receiving constant-wavelength and constant-frequency demultiplexed signals, respectively. On the right, the angle between channels is constant, reflecting the fact that the diffraction angle varies linearly with wavelength. Spacing on the left varies and is designed to satisfy the grating equation.

loss, good crosstalk rejection, and easy integration with other optoelectronic systems.

Sunny Bains

SUNNY BAINS is a technical journalist based in Edinburgh, Scotland.

REFERENCES

1. M. K. Smit and C. van Dam, Integrated Optics issue of the *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, June 1996, "PHASAR-based WDM-devices: principles, designs, and applications" (to be published April 1997).
2. Wenhua Lin et al., *IEEE Photonics Technol. Lett.* 8(11), (November 1996).

OPTICAL DATA STORAGE

Photorefractive crystal increases capacity

A potassium lithium tantalum niobate (KLTN) crystal for electroholography (EH) has been demonstrated by a multi-university research group headed by Aharon Agranat of Hebrew University of Jerusalem (Jerusalem, Israel). The EH process controls reconstruction of volume holograms by an electric field and can form the basis of devices for very-large-scale optical memory and artificial neural networks, interconnection networks for massively parallel supercomputers, and spatial light modulation. With KLTN crystal, stored holograms do not fade, even when being read, and are selected electrically, rather than electro-optically, by merely changing the voltage applied to the crystal.

Conventional photorefractive materials used for optical data storage have their index of refraction changed in response to incident illumination. The interference patterns between the reference and signal beams are transformed

into a space charge. The electric field induced by the space charge modulates the index of refraction. Thus the hologram is stored as a space charge that induces a spatially correlated modulation in the refractive index.

Many inorganic photorefractive crystals are ferroelectrics and have low levels of symmetry. The electro-optic effect in the space-charge modulation of the refractive index in these crystals is linear. Agranat says that, with KLTN, "the idea was to work with symmetrical crystals in which the electro-optic effect is quadratic. Such crystals are bad photorefractives. However, if an external electric field is applied to them the symmetry is broken; the field creates an induced electric dipole in the direction in which it is applied." Thus with the electric field turned on, the electro-optic effect becomes essentially linear and the crystal behaves as a common photorefractive. When the field is not present,



Laser.Optik.
— Systeme.

Up to
60 watts of cw
diode-pumped
laser power.

AVAILABLE NOW!

Now diode-pumped solid-state lasers from JENOPTIK Laser, Optik, Systeme GmbH are not only some of the most versatile on the market. The new generation of 60 watt Nd:YAG lasers with side pumping technology are ideal for the widest range of applications, including: materials processing, laser marking, micro machining and research. Add to this optimum beam quality, efficient frequency doubling and stable pulsed mode operations and you have a powerful solution that's as economical as it is reliable.

Isn't it time you saw the light?

PHONE:
+ 49 (3641) 65 30 40
FAX:
+ 49 (3641) 65 36 57

JENOPTIK
Laser, Optik, Systeme GmbH
Göschwitzer Str. 25
D-07745 Jena

JENOPTIK Group.

Silica Optical Waveguide Devices

PIRI Photonic Integration Research, Inc.
FDM-53-1.55-M^{Serial #} 49827

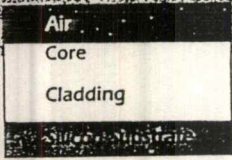
PIRI Photonic Integration Research, Inc.
SM-L-2x32-M^{Serial #} 28630

PIRI Photonic Integration Research, Inc.
PM-L-1x8-M^{Serial #} 24518

PIRI Photonic Integration Research, Inc.
SM-L-1x4-M-FC^{Serial #} 22282

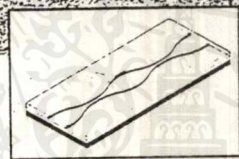
PIRI Photonic Integration Research, Inc.
SM-L-WDM-M^{Serial #} 32557

PIRI Photonic Integration Research, Inc.
SM-L-1x3-FWDM-M^{Serial #} 202457



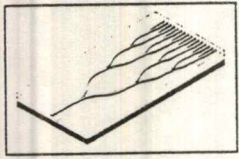
Planar Optical Waveguides

- Single-mode or multi-mode structures
- Core thickness from 2µm to 200µm
- Core-Clad index difference from .2% to 3%
- Substrate size up to 3", 4", or 5"
- Si, quartz or ceramic substrates



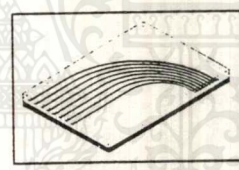
Thermo-Optic Switches

- Non-mechanical single-mode switch
- Isolation typically 15 dB
- 2 msec switching time



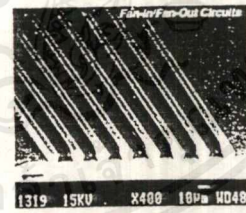
1 x n Optical Splitters

- Single-mode or multi-mode configurations
- Up to 32 outputs standard
- Wavelength and polarization independent
- Custom splitting ratios available
- Polarization maintaining couplers



2 x n Optical Splitters

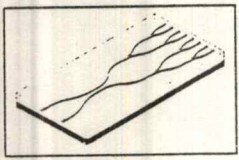
- Intrinsic redundancy over 1 x n designs
- Up to 32 outputs standard
- Wavelength and polarization independent
- Custom splitting ratios available
- Polarization maintaining couplers



Custom Optical Circuits

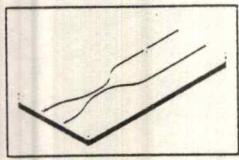
In addition to the standard products above, PIRI manufactures custom optical circuits. PIRI can provide fast turn-around of circuits from customer designs, and we can assist in designing with any of the circuit elements listed below:

- Y-Junctions
- Directional couplers
- Crosses
- Straight sections
- Curves
- Slots/Gaps in waveguides
- Mach-Zehnder interferometers
- Fan in/Fan out arrays
- 45° mirrors
- Wavelength plates
- Polarizers



Wavelength Division Multiplexers (WDM)

- 1.3µm/1.55µm standard
- Other multiplexing combinations available
- Isolation >40 dB



WDM-Splitter Combinations

- 1.3µm/1.55µm standard
- Other multiplexing combinations available
- Circuit designs to fit a variety of applications
- Isolation >40 dB

1319 15KV X400 18µm W048

PIRI Circuit Features:

- Compact and rugged
- Polarization insensitive and maintaining
- High return loss; >50dB
- Operable from -40°C to +85°C
- Available with FC, SC, or ST connectors

Contact PIRI for special requirements



Photonic Integration Research, Inc. 2727 Scioto Parkway Columbus, Ohio 43221-4658 USA
Tel: (614) 876-5655 / Fax: (614) 876-5726
e-mail: sales@piri.com Internet: http://www.piri.com



International Sales Offices:

Mitsubishi International Corporation
New York, New York USA
Tel: (212) 605-2602 / Fax: (212) 605-1847

Mitsubishi Corporation
Tokyo, Japan
Tel: 03-3210-7328 / Fax: 03-3210-7557

Mitsubishi International GmbH
Dusseldorf, Germany
Tel: (0) 211-4397-318 / Fax: (0) 211-4397-458

For FREE Data Circle 90

Custom Optics

- X-ray orientation
- Fabrication
- Optical polishing
- Specialize in short run
Very thin and Micro size
- Calcite, LiNbO₃, LiTaO₃, YVO₄, TeO₂, YIG, PbWO₄, etc.

Optical Crystal

- KTA, KTP, BBO, CLBO, AgGaS₂, AgGaSe₂, ZnGeP₂, GaSe, (doped) LiNbO₃, LiIO₃, LiTaO₃, KD*P, KNbO₃
- Ce:BaTiO₃, Fe:LiNbO₃, SBN, BSO, BGO, Fe:KNbO₃
- Calcite, YVO₄, YAG, TeO₂, YIG, TGS, PbMoO₄, PbWO₄
- Boule, wafer, blank

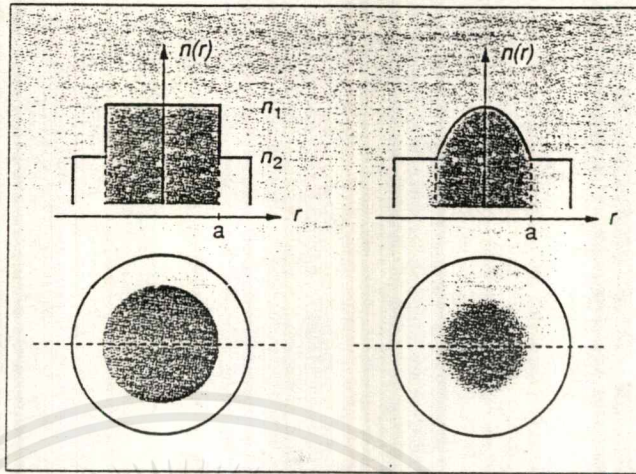


FIGURE 1. Refractive index, n , varies sharply in step-index fibers (left), while it changes gradually in graded-index fibers (right). Step-index fibers have been replaced by graded-index fibers in which the index variation compensates for path-length differences of rays on and off the axis.

equal to only about four wavelengths of light, the fiber will support only a single mode, eliminating multimode dispersion entirely. On the one hand, such single-mode fibers, now universally used for long-distance communications, can theoretically support bandwidths in excess of 1000 GHz/km. On the other hand, the tiny diameter of the fiber means that less light can be coupled into it, and coupling tolerances are extremely tight.

The cores of optical fibers are made of ordinary glass, or silica, which is produced with extremely low impurity levels, because impurities will tend to scatter and absorb light. The surrounding cladding, typically fluorine-doped and 125 μm in diameter for both multi- and single-mode fibers, is in turn surrounded by strengthening materials, either Kevlar or nylon, and the fibers are bound together into a cable reinforced by steel strands. All this material is generally protected by

copper and polyethylene sheathing.

Attenuation losses
As light travels through the fiber, it is vital to minimize absorption and scattering so as to maximize the spacing between repeaters. Once impurities such as transition metals and hydroxyl (OH) ions have been essentially eliminated, two basic processes limit transparency. One is Rayleigh scatter-

ing off the disordered lattice structure that is characteristic of all glass. Rayleigh scattering, responsible for the blue color of the sky, drops steeply as the inverse fourth power of the wavelength. However, at wavelengths beyond 1.6 μm , infrared radiation can be coupled into the absorption band of the silica itself, producing band-edge absorption, which rises steeply with increasing wavelength. Another smaller intrinsic absorption line produces a bump near 1400 nm. The net result is that there are two minimum-absorption wavelength bands—a narrow one around 1300 nm and a

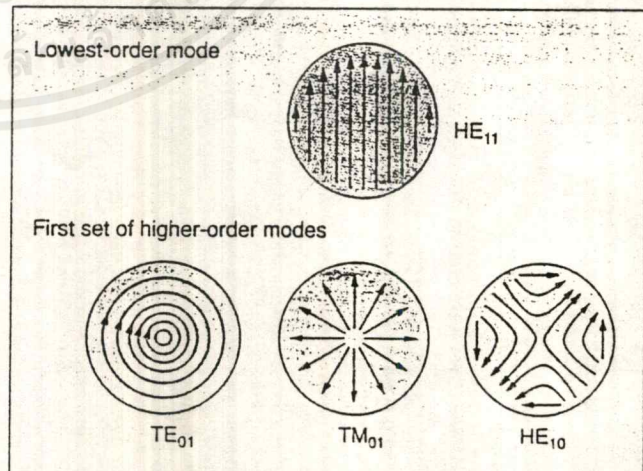


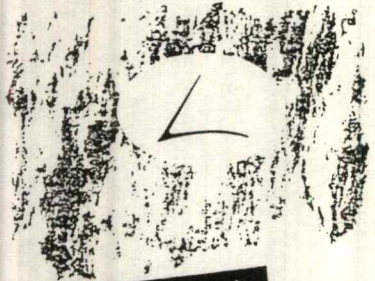
FIGURE 2. In a multimode silica fiber, more than 1000 modes of electromagnetic oscillation can be supported, each with slightly different velocities, which are represented by different transverse electric fields. (For simplicity, only the lowest-order mode and first set of higher-order modes are illustrated, showing the electric-field oscillation directions.)

LIGHTWARE INC.

300 W. Mitchell Hammock Rd., Suite 8
Oviedo, Florida 32765
TEL: 407-977-8080
FAX: 407-977-8006
E-MAIL: lwi@ix.netcom.com

102 For FREE Data Circle 91

L · A · S · I · N · C
LASER ANALYTICAL SYSTEMS



Innovative
in
WAVETRAIN[™]



SHG ring
cavity

tunable
laser
technology

WAVETRAIN[™] CW

is a compact ring cavity for second harmonic generation of single mode radiation from dye, Ti:Sa, Ar⁺ or diode lasers.

NEW!

With the new version WAVETRAIN[™] CW High Efficiency you benefit from more than 10% SHG efficiency throughout the entire range of Ti:Sa lasers. Power enhancements up to 100 and efficiencies up to 18% were observed in this application.

MOREOVER: WAVETRAIN[™] CW facilitates the adjustment of your single mode CW laser considerably.

L · A · S · I · N · C
LASER ANALYTICAL SYSTEMS
3333 BOWERS AVENUE, SUITE 130
SANTA CLARA CALIFORNIA 95054
TEL (408) 253 8350
FAX (408) 253 7288
e-mail lee@lasinc.com

GERMANY

L · A · S · G · M · B · H
TEL +49 (0) 3329 6387 0
FAX +49 (0) 3329 6387 33
e-mail las@wg.b.cunet.de

WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXERS

beam undergoes multiple reflections from the filter input faces, and, at each reflection, one wavelength is removed. For multiplexing operations, the process is simply reversed—input from the individual channels enters the filter block and propagates through to the common fiber. The design also can be extended

mon collimator alignment using an optical spectrum analyzer (Hewlett-Packard, Santa Rosa, CA), in conjunction with a computer-controlled wavemeter and a tunable laser. The filters are typically assembled to provide wavelength accuracies of less than 50 pm.

As channel numbers increase and

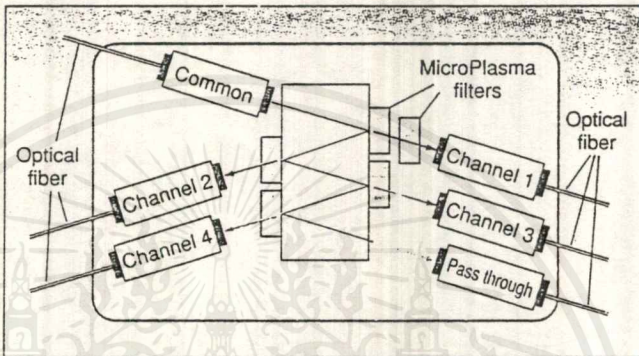


FIGURE 3. In 16-channel multiplexer, like this four-channel design, collimated light at a slight angle from the normal enters the filter block, where it undergoes multiple reflections from the filter input faces. At each reflection, one wavelength is removed. The approach eliminates cumulative insertion loss experienced by conventional designs.

to 32 channels, and 50-GHz channel spacings are realizable.

An advantage of this approach is that collimators are used only when the signal propagates through a filter, eliminating the cumulative effect of insertion loss experienced by the cascaded three-port designs. In addition, the total number of collimator assemblies is reduced, which decreases material costs as well as alignment costs. Finally, all channels have nearly the same low insertion loss as well as low insertion-loss variation with temperature.

Five-axis, micrometer-based equipment aligns fibers and collimators to displacement accuracies of less than 10 μ m and angular accuracies of less than 1 arcmin. By monitoring device throughput with power meters, the positions of the fiber are optimized to minimize insertion losses. The total budget for insertion loss in fiber-to-fiber coupling for a wavelength division multiplexer is typically 0.5 dB, or about 90% transmission.

Interference filters are angle-sensitive, so the angle of the filter or filter block is critical to device performance. This is determined by measuring the center wavelength of the filter during the com-

DWDM systems are applied to applications closer to local access, new requirements will arise. For lower-density, short-haul traffic, all-optical passive multiplexing provides a simple, reliable, and economical method for directing lower speed channels, rather than electronically demultiplexing low speed channels onto a high-speed channel using time division multiplexing techniques. By turning to WDM technology and incorporating photonic devices more deeply into telecommunications networks, the terahertz potential of fiberoptic systems may finally be realized. □

REFERENCE

1. MicroPlasma, US Pat. #5,525,199, Low pressure reactive magnetron sputtering apparatus and method (June 1996).

Bulk reprints of all Laser Focus World articles can be ordered from Sharon MacLeod, reprints manager, at (603) 891-9224 or FAX (603) 891-0574.

YOUR RATING, PLEASE...

Is this article of value to you? Please circle appropriate number on the Reader Service Card.

YES—510 ประโยชน์ด้าน NC—511

er aperture, 50- μ rad range of motion, and 1000-rad/s² acceleration. The mirror assembly measures 5 x 5 x 2.5 in., and the drive electronics are on a 6U VME board.

Ball Aerospace & Technologies Corp., Broomfield, CO
For FREE Data Circle 470

Chillers

A wide selection of chillers are available that are mountable in 19-in. racks. The chillers have cooling capacities ranging from 300 W to 4.5 kW. A range of circulating pumps and safety interlocks are offered. Deionized water circulation is available as an option. Custom colors

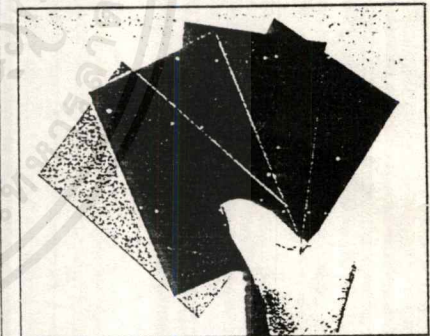
and sink-screening are offered for OEM purchasers.
Bay Voltex Corp.,
Livermore, CA
For FREE Data Circle 471

Multiplexer



The 1310/1625 WDM is a wavelength-division multiplexer that provides isolation of more than 20 dB between 1310 and 1625 nm. The device has a low insertion loss of 0.3 dB. The WDM can be used to monitor fiber-link integrity without signal interference and can be used with an optical time domain reflectometer. The device is available in either a standard miniature or a ruggedized 1 x 2 package.
Amphenol Fiber Optic Products,
Lisle, IL
For FREE Data Circle 472

Filters



A line of interference filters for illumination are made using a sputter coating process. Specific films are available for separating heat and light (cold mirrors), for UV blocking, and for color selection and color conversion. Sputter-coated films offer less color variation than evaporated films because the cut-off edges of the filters do not change with system temperature. Applications include use in specialty lighting and luminaires for the film and theater industry, discotheques, and the architectural lighting industry.
Balzers Thin Films,
Lichtenstein
For FREE Data Circle 473

Your key to CVI's one million piece inventory of Nd:YAG optics

The Complete
Nd:YAG LASER
OPTICS GUIDEBOOK

355nm
光
1064nm

CVI LASER CORPORATION

The Nd:YAG optics you need
with damage threshold up to 45 J/cm²
Ready to ship today.

Call for your free guidebook

See us at CLEO, Booth 409 & 411

CVI LASER CORPORATION

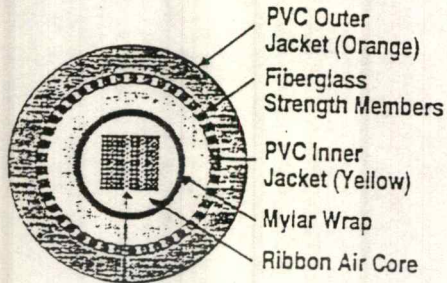
2000 Donald Drive, SE Albuquerque, NM 87104 (505) 296-9541 cvilaser.com
CVI - West (505) 296-1061 cvilaser.com (660) 285-9200 CVI - South (407) 356-0532
CVI - East (617) 621-3337 CVI - Japan Optics Co. Ltd. (022) 571-5111



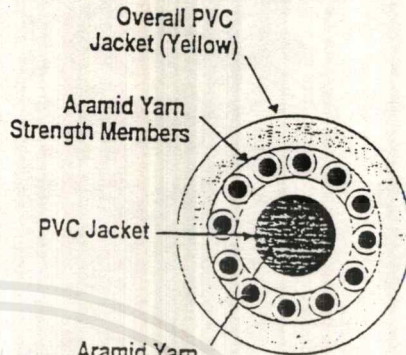
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Types of Fiber

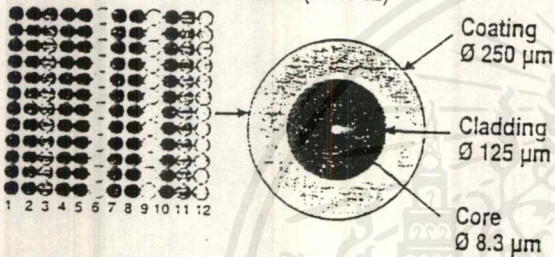
Ribbon



Stranded



COATED FIBER (DETAIL)



Typical Values

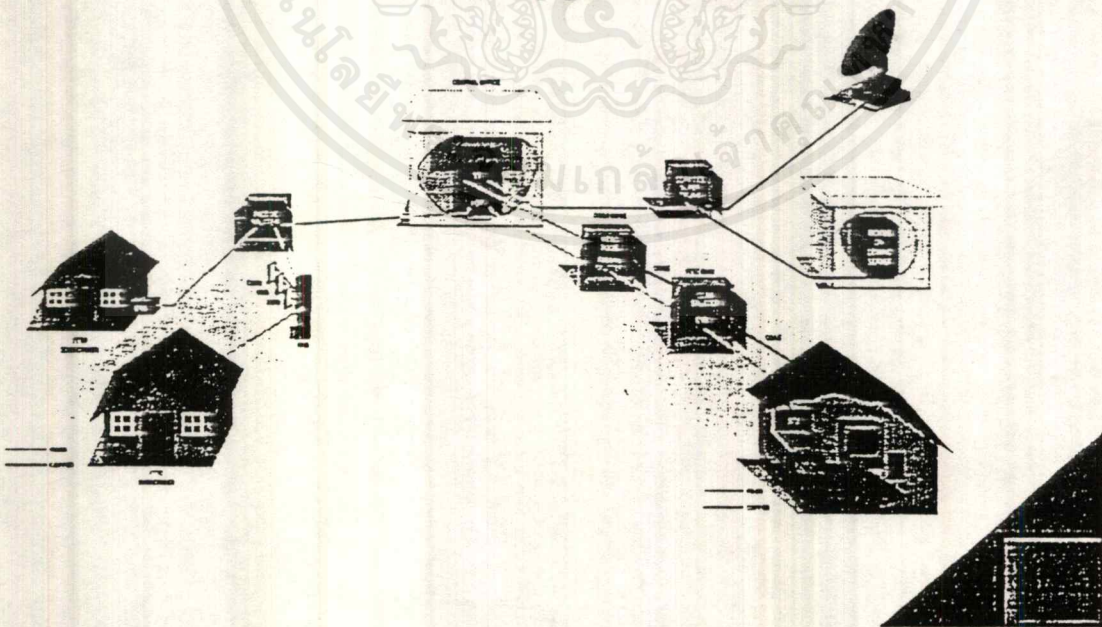
| | GRADED MULTIMODE | SINGLEMODE |
|-------------|--------------------------|-----------------------------------|
| ATTENUATION | 1-3 dB/km | 0.35-0.50 dB/km |
| BANDWIDTH | 0.1-0.8 GHz • km | (≥ 10 GHz • km) |
| DISPERSION | (= 700 $\frac{ps}{km}$) | (25-45 $\frac{ps}{mm \cdot km}$) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น. ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น. อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bandwidth

- *400 MHz - km = a 400 MHz signal can be transmitted for 1 km*
- *Lower frequencies can be transmitted longer distances*
- *Higher frequencies, shorter distances*

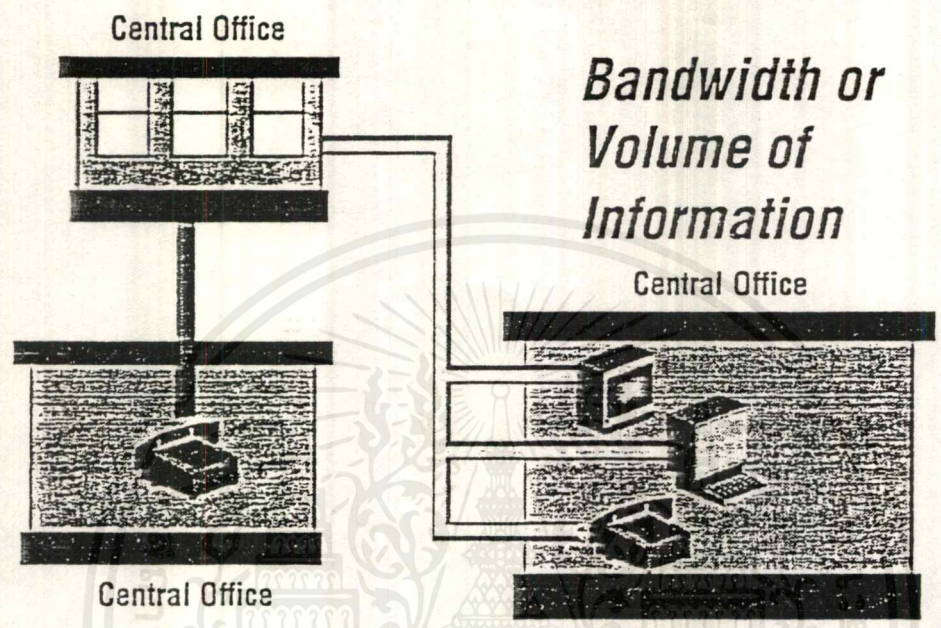
Where Is Fiber Used? Telco Application



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

High Rates of Information

Copper vs. Fiber



Notes/Introduction

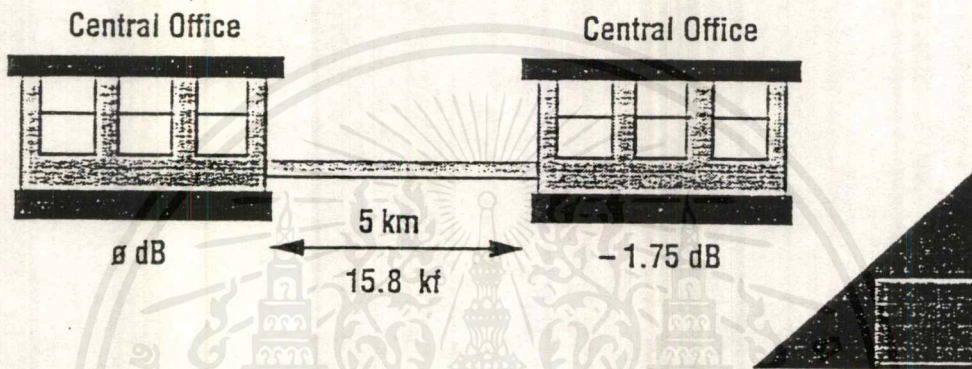
The higher bandwidth of fiber allows a higher bit rate and consequently more voice channels per cable.

| Medium | | Bit Rate | Voice Channels |
|--------------|-------|----------|----------------|
| Twisted Pair | DS1 | 1.544 | 24 |
| Coax | DS3 | 44.736 | 672 |
| Fiber | OC-1 | 51.84 | 672 |
| | OC-3 | 155.52 | 2016 |
| | OC-12 | 622.08 | 8064 |

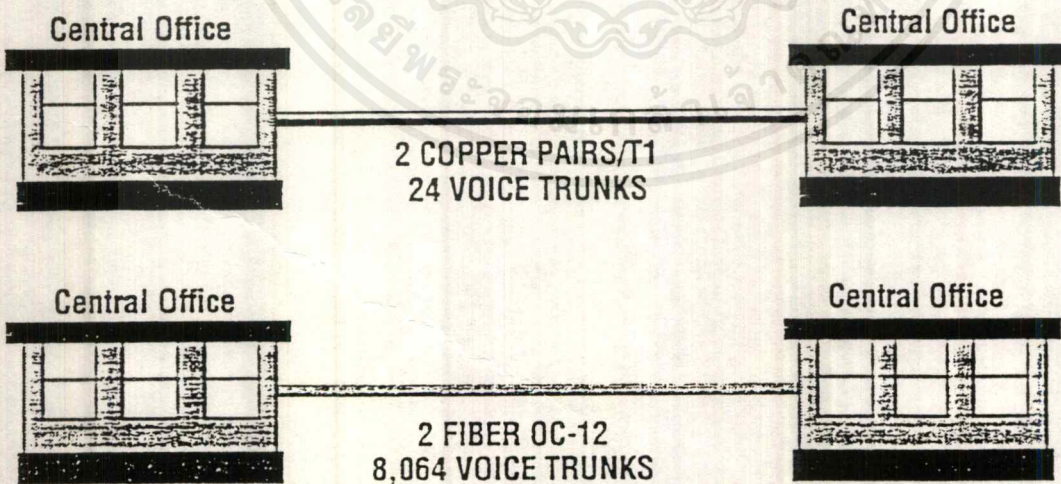
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Loss

- *The decrease in power of a transmitted signal over an optical path*
- *Measured in dB or dB/km*

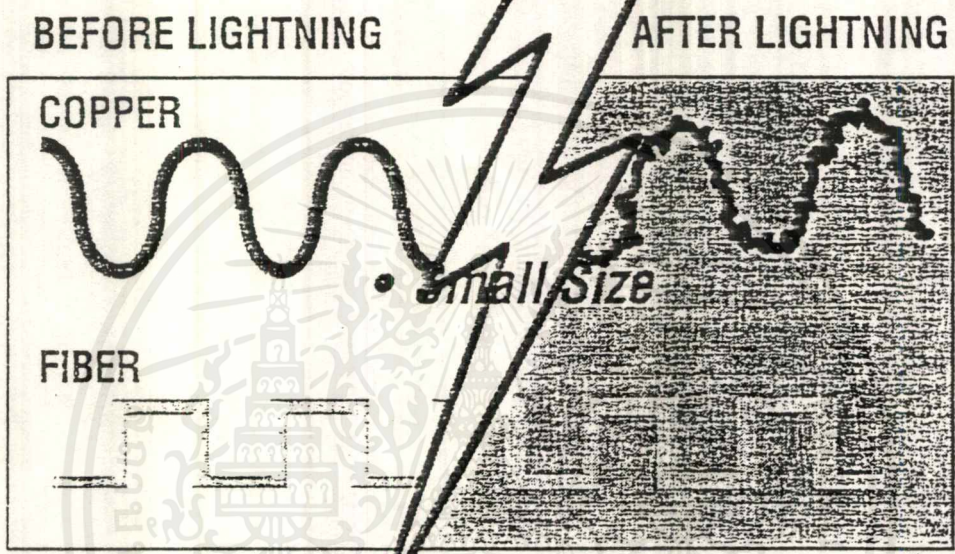


Small Size, Light Weight



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Immune to Interference



Copper conductors act as antennas either transmitting or receiving energy. Electronic equipment can emit electromagnetic interference (EMI) that disrupts other equipment. Fiber does not radiate or pick up EMI.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

HAROLD B. KILLEN, FIBEROPTIC COMMUNICATION, © 1991 by Prentice-Hall, Inc.

Richard SYMS and John cozens, OPTICAL GUIDED WAVES AND DEVICES, 1992 McGRAW-HILL BOOK COMPANY.

JEAN-PIERRE LAUDE, Wave length Division Multiplexing, Masson, PARIS, 1993.

WILLIAM K. BURNS, OPTICAL FIBER ROTATION SENSING, 1994 BY Academic Press, Inc.

J. WILSON and J.F.B. HAWKES, Optoelectronics An Introduction Second edition, Prentice Hall, Inc. 1983,1989.

Paul E. Green, Jr., Fiber Optic Networks, 1993 by Prentice - Hall, Inc.

EUGENE HECHT, OPTICS SECOND edition, 1987, 1974 by Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

Henry Zanger And Cynthia Zanger Fiber Optic Communication And Other Applications :

Collier Macmillan Canada, Inc. Toronto. 1991

Melles Griot Optics, Fiber Optics, Table & Hardware, Lasers, Instruments, Lab Accessories. 1997-1998

ผศ. อภินันท์ มัชฌานนท์ การสื่อสารเส้นใยแสง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
คุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร. 2537