

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง
การจำลองโพรงสั้นพ้องวงแหวนแบบอนุกรมเพื่อเป็นตัวกรองทางแสง

A SIMULATION OF SERIAL RING RESONATORS FOR OPTICAL FILTER



ฉพ.
๒/๒๒๒ก
๒๕๔๘

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **60254**
วัน,เดือน,ปี **27 ส.ย. 2549**

b. 11585031
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. ๒๕๔๘

ISBN 974-15-1944-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองโพรงสั้นพ้องวงแหวนแบบอนุกรม เพื่อเป็นตัวกรองทางแสง
นักศึกษา	นายประจักษ์ แซ่อึ้ง
รหัสประจำตัว	44614002
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. ปรีชา ยูพาพิน

บทคัดย่อ

อุปกรณ์ที่สำคัญในเครือข่ายทางแสงทุกเครือข่ายก็คือตัวกรองสัญญาณแสง ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายประเภทเช่น แปรกซ์เกรตติง ตัวกรองฟิล์มบาง เกรตติงท่อนำคลื่นแฉกลำดับเป็นต้น ตัวกรองทางแสงที่มีการมอดิเฟอเคชันสัญญาณแฉก/ครีป สามารถใช้ในการประมวลผลสัญญาณที่มีช่องสัญญาณแถบกว้างได้ ในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและจำลองคุณลักษณะการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องวงแหวนระดับไมโครเมตรที่เชื่อมต่ออนุกรมกันหลายวงแหวน ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของสัมประสิทธิ์การคัปปลิงกับคุณลักษณะการส่งผ่านของตัวกรองโพรงสั้นพ้อง จะแสดงโดยการวิเคราะห์การแปลงแบบ Z โดยจะจำลองสเปกตรัมของการส่งผ่านที่พอร์ตส่งผ่านและพอร์ตครีป เทียบกับอินพุตแต่ละตัว ผลที่ได้จะแสดงถึงคุณลักษณะการส่งผ่านที่เป็นฟังก์ชันของเฟส ความยาวคลื่นที่ค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิงต่างๆ เนื่องจากความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ได้เป็นการประมาณค่าจากการจำลองจึงเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิงสามารถที่จะควบคุมสมบัติการส่งผ่านเพื่อประยุกต์ใช้เป็นตัวกรองสัญญาณแฉก/ครีปได้

Thesis Title	A Simulation of Serial Ring Resonators for Optical Filter
Student	Prajak Saeung
Student ID	44614002
Degree	Master of Science
Programme	Applied Physics
Year	2005
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Preecha Yupapin

ABSTRACT

A key device in all optical networks is the optical filter. There are different types of optical filters, for examples, Bragg gratings, thin film filters and arrayed waveguide gratings. Optical filters based optical Add/Drop multiplexing (OADM) can be used for processing wideband signals filtering in the optical networks. In this research, the designed and simulated filtering characteristics of a serially coupled multiple microring optical resonators (SMRR) are investigated. The mathematical relations of the coupling coefficients with the transmission characteristics of the SMRR filter are expressed by using Z-transform analysis. The transmission spectra of the through port and the drop port for input port of a STFRR configuration are simulated. Results are presented on the characteristics of the output as a function of phase, wavelength for various values of the coupling coefficient. With the derived approximate formulas, it is shown that the coupling of the microring system can be changed and thus that the transmission properties of the filters can be controlled and used.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการทำวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 วิธีดำเนินการทำการทำวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 การสื่อสารด้วยใยแก้วนำแสง.....	6
2.2 ตัวนำสัญญาณคลื่นพาห์.....	6
2.3 การสูญเสียในใยแก้วนำแสง.....	9
2.3.1 สัมประสิทธิ์การลดทอน.....	9
2.3.2 การสูญเสียเนื่องจากการดูดกลืนของวัสดุ.....	9
2.3.3 การสูญเสียเนื่องจากการกระเจิงแบบเรย์ลี.....	9
2.3.4 การสูญเสียเนื่องจากการโค้งงอของใยแก้ว.....	10
2.4 คุณสมบัติที่ดีของการสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสง.....	12
2.5 เครื่องส่งคลื่นพาห์.....	13
2.6 เครื่องรับคลื่นพาห์.....	13
2.7 ตัวมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์.....	14
2.8 ตัวกรองสัญญาณแสง.....	15
2.9 การวิเคราะห์การแปลงแบบ Z ของตัวกรองโพรงสั้นพ้องวงแหวน.....	18
2.10 โพรงสั้นพ้องวงแหวนวงเดียว.....	22

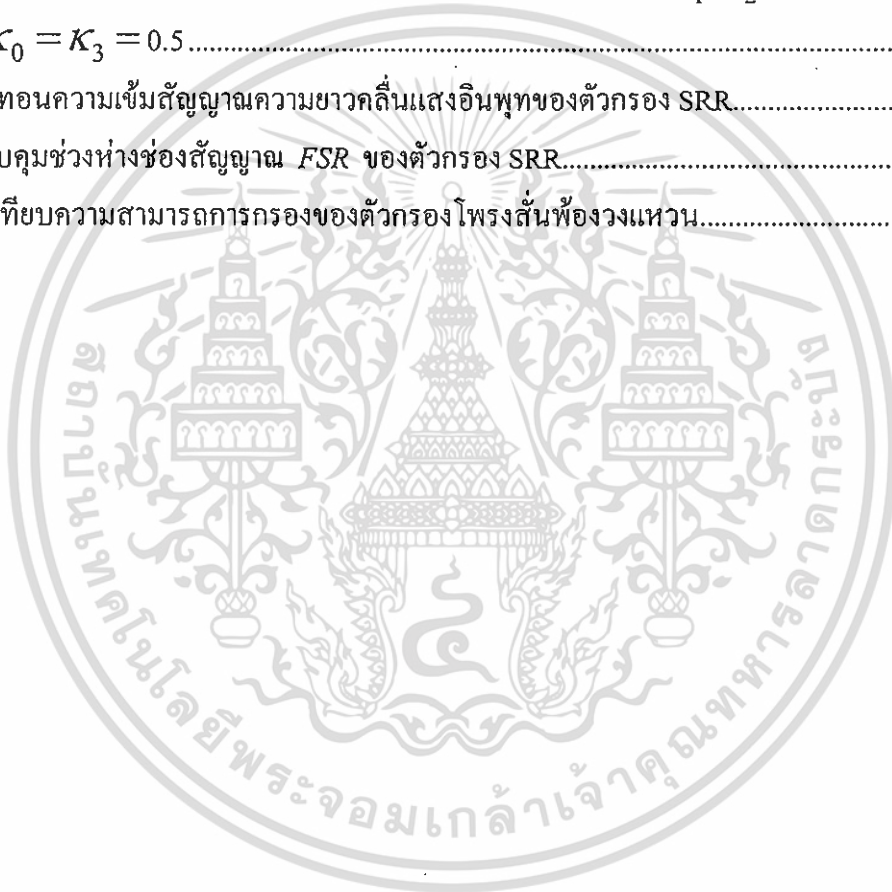
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.11 ความเป็นมาของโพรงสั้นพ้องวงแหวน.....	31
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	33
3.1 โพรงสั้นพ้องวงแหวน 1 วง 2 คัปเปเตอร์.....	33
3.2 โพรงสั้นพ้องวงแหวน 2 วง 3 คัปเปเตอร์.....	41
3.3 โพรงสั้นพ้องวงแหวน 3 วง 4 คัปเปเตอร์.....	48
บทที่ 4 ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์.....	52
4.1 การทวนสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	52
4.2 การตอบสนองกับเฟส.....	52
4.3 การตอบสนองกับความยาวคลื่น.....	55
4.3.1 การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงแสง.....	55
4.3.2 การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ของการลดทอนความเข้มแสง.....	64
4.3.3 การเปลี่ยนแปลงรัศมีวงแหวน โพรงสั้นพ้อง.....	67
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	69
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	69
5.2 แนวทางในการพัฒนา.....	71
เอกสารอ้างอิง.....	72
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์การแปลงแบบ Z ของ SRR.....	74
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์การแปลงแบบ Z ของ DRR.....	78
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์การแปลงแบบ Z ของ TRR.....	83
ประวัติผู้เขียน.....	89

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การแบ่งประเภทและชื่อเรียกของเส้นใยแก้วนำแสง.....	8
4.1 พารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การคัปปลิงของตัวกรอง SRR.....	57
4.2 พารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การคัปปลิง K_1 ของ DRR ($K_0 = K_2 = 0.5$).....	60
4.3 พารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การคัปปลิง K_1, K_2 ของ TRR.....	62
4.4 พารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การคัปปลิง K_1, K_2 ของ TRR เมื่อ $K_0 = K_3 = 0.5$	62
4.5 การลดทอนความเข้มสัญญาณความยาวคลื่นแสงอินพุตของตัวกรอง SRR.....	65
4.6 การควบคุมช่วงห่างช่องสัญญาณ FSR ของตัวกรอง SRR.....	68
5.1 เปรียบเทียบความสามารถการกรองของตัวกรองโพรงสันพ้องวงแหวน.....	70



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ตัวกรองสัญญาณแฉีก/ครีโอป ที่ใช้งานในระบบ WDM	1
1.2 คุณลักษณะการส่งผ่านของตัวกรองสัญญาณแสง.....	3
2.1 การสะท้อนกลับหมดภายในใยแก้วนำแสง แสงที่ตกเป็นมุม $\phi < \phi_c$ จะเลี้ยวเบนออกนอกแกน.....	7
2.2 ประเภทของใยแก้วนำแสงที่แบ่งตามลักษณะดัชนีหักเหของแสงและ โหมดของการแพร่.....	8
2.3 สเปกตรัมการสูญเสียของใยแก้วนำแสงชนิด โหมดเดียว.....	10
2.4 การสูญเสียจากการโค้งงอของใยแก้วนำแสง.....	11
2.5 เปรียบเทียบการลดทอนระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงและสายตัวนำ.....	12
2.6 ฝั่งองค์ประกอบของเครื่องส่งคลื่นพาห์.....	13
2.7 ฝั่งองค์ประกอบของเครื่องรับคลื่นพาห์.....	14
2.8 โครงสร้างของตัวมัลติเพล็กซ์และตัวดีมัลติเพล็กซ์.....	14
2.9 เกรตติงชนิดเบนราบ.....	15
2.10 อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดเพริ-เพอร์โรต์.....	16
2.11 เกรตติงใยแก้วนำแสงแบบแบรกก์.....	16
2.12 การบรรจุเกรตติงที่นำคลื่นแถวลำดับ.....	17
2.13 Mach-Zehnder interferometer.....	17
2.14 โพรงสั้นพ้องวงแหวน 1 วง 2 คัปเปิลอร์ที่ใช้เป็นตัวกรองช่องสัญญาณครีโอป.....	18
2.15 ตัวกรองโพรงสั้นพ้องวงแหวนที่ต่ออันดับกัน N วง.....	19
2.16 โพรงสั้นพ้องวงแหวนวงเดียว.....	23
2.17 คุณลักษณะของสเปกตรัมการส่งผ่านของโพรงสั้นพ้องวงแหวนเดียว.....	25
2.18 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์ K สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน α ที่กำหนด.....	27
2.19 ค่าฟิเนสส์ F เทียบกับค่า K ตรงจุดที่ทำให้เกิดอัตราส่วนเปิด-ปิด สูงสุด.....	28
2.20 ค่าฟิเนสส์ F เทียบกับค่า α ตรงจุดที่ทำให้เกิดอัตราส่วนเปิด-ปิด สูงสุด ($R = 100 \mu m$).....	28
2.21 โพรงสั้นพ้องวงแหวนที่เป็นตัวกรองครีโอปช่องสัญญาณ.....	31
2.22 (a) การคัปปลิงในแนวตั้ง (b) การคัปปลิงทางด้านข้าง.....	32

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 SRR ที่มีท่อนำคลื่น 2 ท่อ เพื่อประยุกต์ใช้เป็นตัวกรองสัญญาณแฉัด/ครีอป.....	34
3.2 โพรงสั้นพ้องวงแหวน 2 วง 3 คัปเปิลอร์ที่ใช้เป็นตัวกรองสัญญาณแฉัด/ครีอป.....	41
3.3 โพรงสั้นพ้องวงแหวน 3 วง 4 คัปเปิลอร์ที่ใช้เป็นตัวกรองสัญญาณแฉัด/ครีอป.....	49
4.1 การตอบสนองต่อเฟสของสเปกตรัมการส่งผ่านของ SRR ที่มี $K_1 = K_2 = 0.2$, $\alpha = 0$	53
4.2 สเปกตรัมการส่งผ่านของ SRR ที่มี $R = 150 \mu m$, $K_1 = K_2 = 0.2$, $\alpha = 0$	53
4.3 ผลจำลองการตอบสนองต่อเฟสของตัวกรอง DRR ที่มี $K_0 = K_2 = 0.5$, $K_1 = 0.13$	54
4.4 การตอบสนองต่อเฟสของตัวกรอง TRR ที่มี $K_0 = K_3 = 0.65$, $K_1 = K_2 = 0.2$	54
4.5 สเปกตรัมการส่งผ่านของตัวกรอง SRR มี $R = 136 \mu m$, $K_1 = K_2 = 0.4$, $\alpha = 0$	55
4.6 ผลตอบสนองของตัวกรอง SRR ที่มี $R = 136 \mu m$, $\alpha = 0$ สัมประสิทธิ์การคัปปลิง คือ (a) $K_1 = K_2 = 0.3$ และ (b) $K_1 = K_2 = 0.2$ ตามลำดับ.....	56
4.7 ผลการจำลองของพอร์ตครีอปที่แสดงให้เห็นอัตราส่วนเปิด-ปิดที่สูงกว่า 20 dB โดยที่ SRR มี $K_1 = K_2 < 0.2$	57
4.8 ผลตอบสนองตัวกรองที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมของ DRR รัศมีวงแหวนคือ $R_{1,2} = 136 \mu m$, $\alpha_{R_1,R_2} = 0$, $K_0 = K_2 = 0.5$ คัปเปิลอร์ตัวกลางมีสัมประสิทธิ์การคัปปลิงคือ (a) $K_1 = 0.12$, (b) $K_1 = 0.13$, และ (c) $K_1 = 0.14$ ตามลำดับ.....	59
4.9 ผลตอบสนองตัวกรองที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมของ TRR รัศมีวงแหวนคือ $R_{1,2,3} = 136 \mu m$, $\alpha_{R_1,R_2,R_3} = 0$, $K_0 = K_3 = 0.65$ คัปเปิลอร์ตัวกลางมีสัมประสิทธิ์การคัปปลิงคือ (a) $K_{1,2} = 0.18$, (b) $K_{1,2} = 0.20$, และ (c) $K_{1,2} = 0.22$ ตามลำดับ.....	61
4.10 ความไม่เข้ากันของการเกิดเรโซแนนซ์ของ DRR รัศมีวงแหวนคือ $R_{1,2} = 136 \mu m$, $\alpha_{R_1,R_2} = 0$, $K_0 = K_2 = 0.5$ คัปเปิลอร์ตัวกลางมี $K_1 > 0.14$	63
4.11 ความไม่เข้ากันของการเกิดเรโซแนนซ์ของ TRR รัศมีวงแหวนคือ $R_{1,2,3} = 136 \mu m$, $\alpha_{R_1,2,3} = 0$, $K_0 = K_2 = 0.5$ คัปเปิลอร์ตัวกลางมี $K_1 = K_2 > 0.1$	63
4.12 ผลจำลองการลดทอนสัญญาณอินพุทของ SRR ที่มี $R = 136 \mu m$, $K_1 = K_2 = 0.2$ วงแหวนมีสัมประสิทธิ์การลดทอนคือ (a) $\alpha = 0$, (b) $\alpha = 1 \text{ dB/cm}$, (c) $\alpha = 2 \text{ dB/cm}$ และ (d) $\alpha = 3 \text{ dB/cm}$	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 ผลจำลองการตอบสนองของตัวกรอง DRG ที่มี $K_0 = K_2 = 0.5$ และ $K_1 = 0.12$ เมื่อวงแหวนมีสัมประสิทธิ์การลดทอนคือ $\alpha = 0, 1, 3$, และ 5 dB/cm ตามลำดับ.....	66
4.14 ผลจำลองการตอบสนองของตัวกรอง TRR ที่มี $K_0 = K_2 = 0.5$ และ $K_1 = K_2 = 0.1$ วงแหวนมีสัมประสิทธิ์การลดทอนคือ $\alpha = 0, 1, 3$, และ 5 dB/cm ตามลำดับ.....	66
4.15 ผลจำลองการลดทอนสัญญาณอินพุทของ SRR ที่มี $K_1 = K_2 = 0.2$, $\alpha = 0$ วงแหวนมีรัศมีคือ (a) $R = 68 \text{ }\mu\text{m}$, (b) $R = 136 \text{ }\mu\text{m}$, (c) $R = 273 \text{ }\mu\text{m}$ และ (d) $R = 544 \text{ }\mu\text{m}$	67

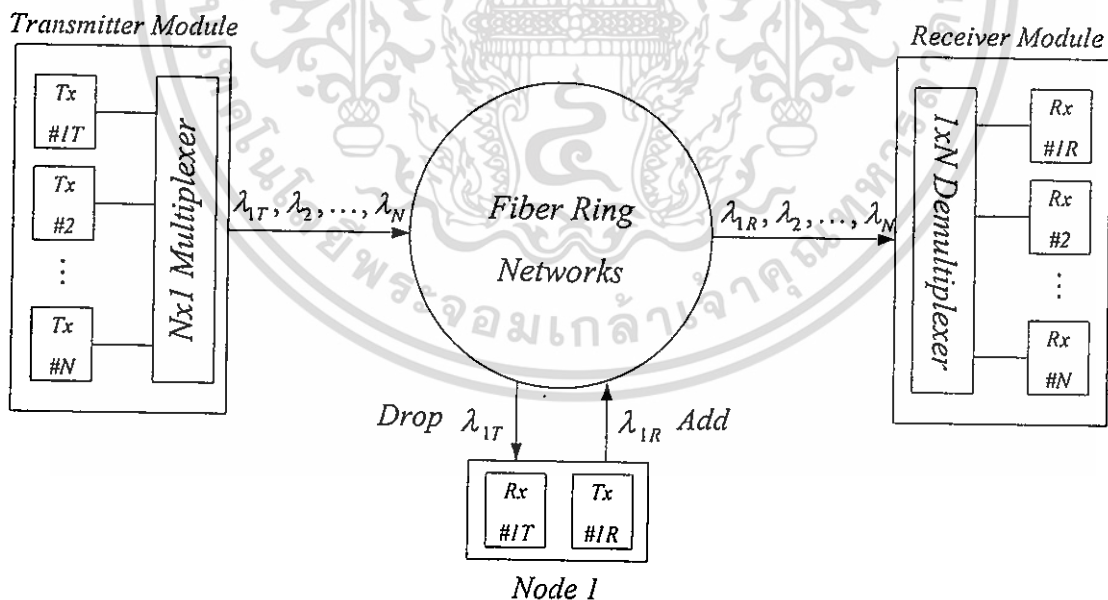


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

หน้าที่เบื้องต้นของใยแก้วนำแสงจะใช้ในการส่งข้อมูลความเร็วสูงจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งระหว่างโนด (Node) ในระบบเครือข่าย อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่โนดต่างๆก็จะทำการประมวลผลและสวิตซ์สัญญาณที่ทำการมัลติเพล็กซ์หรือดีมัลติเพล็กซ์ด้วยอัตราส่งข้อมูลที่ต่างกันไปยังโนดต่างๆ ปัจจัยที่สำคัญในระบบเครือข่ายโทรคมนาคมประกอบด้วยองค์ประกอบหลักที่สำคัญ 2 ส่วนคือ ท่อนำคลื่น (Pipe) ซึ่งใช้สำหรับส่งสัญญาณ ใยแก้วนำแสงจึงได้ถูกนำมาใช้เป็นท่อนำส่งสัญญาณความเร็วสูง ก่อนที่สัญญาณจะเข้าสู่เครือข่ายทางแสงก็จะผ่านการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wavelength division multiplexing, WDM) WDM เป็นการนำคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันเป็นสัญญาณพาห้ข้อมูล แสงทุกความยาวคลื่นจะถูกผสมเข้าด้วยกันแล้วส่งเข้าไปในใยแก้วนำแสงเส้นเดียวกัน คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นค่าหนึ่งสามารถที่จะบรรจุข้อมูลได้ชุดหนึ่ง ใยแก้วนำแสงสามารถส่งแสงความยาวคลื่นต่างๆกันเข้าไปได้หลายช่องสัญญาณและแต่ละช่องสัญญาณอาจส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วที่ต่างกัน



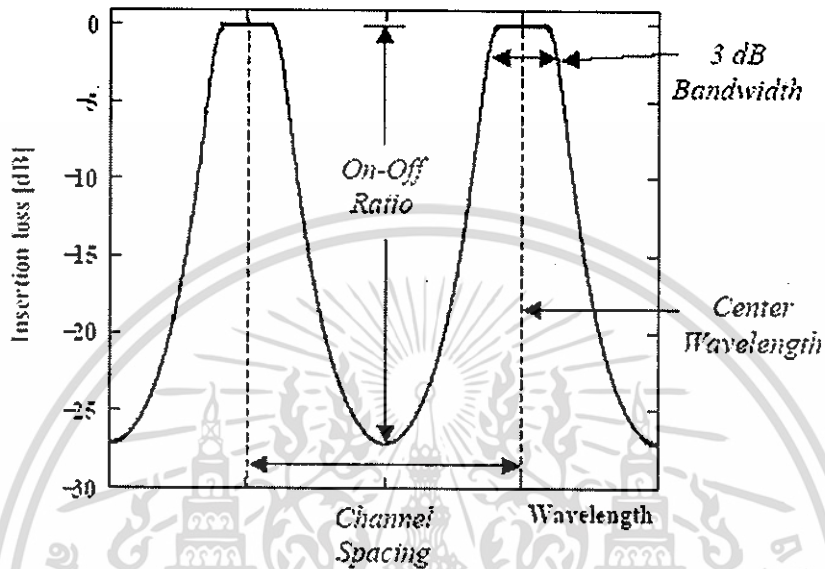
รูปที่ 1.1 ตัวกรองสัญญาณแอด/ดรอ๊ป ที่ใช้งานในระบบ WDM

ส่วนที่สองคือตัวกรองสัญญาณแสง (Optical filter) ในระบบ WDM ใดๆ จำเป็นจะต้องใช้ตัวกรองสัญญาณแสงเพื่อใช้ในการแยกช่องสัญญาณหนึ่งออกจากช่องสัญญาณอื่นๆ ที่รวมเข้าไว้ด้วยกันโดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ตัวกรองสัญญาณแสงจึงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญของระบบ WDM การนำตัวกรองสัญญาณแสงไปประยุกต์ใช้ที่เห็นชัดที่สุดคือการดัดแปลงเพดิกซ์ช่องสัญญาณที่ความยาวคลื่นใกล้เคียงกันมาก แผนผังของระบบ WDM อย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 1.1

ตัวกรองที่ได้ทำการวิจัยในที่นี้เป็นตัวกรองสัญญาณแสงแอดด/ดรอ๊ป (Add/Drop filter) ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในเครือข่ายวงแหวนใยแก้วนำแสงเพื่อใช้แยกช่องสัญญาณที่ต้องการดรอ๊ปไปใช้ออกจากช่องสัญญาณอื่นที่ส่งผ่านไป จากรูปที่ 1 ที่โนด 1 มีการรับช่องสัญญาณดรอ๊ปเข้ามาและอาจมีการส่งข้อมูลข่าวสารเดิมนี้ด้วยข้อมูลข่าวสารใหม่ที่มีความยาวเท่าเดิม เหมือนสัญญาณ ดรอ๊ป หรือเป็นความยาวคลื่นใหม่ที่ไม่ทำให้เกิดการแทรกสอดกับความยาวคลื่นที่ส่งผ่าน ช่วงห่างช่องสัญญาณ (Channel spacing) ตามมาตรฐาน International Telecommunications Union (ITU) [1] กำหนดกริดช่วงห่างความถี่ 100 GHz , $f = 193.1 \pm m \times 0.1 \text{ THz}$ ที่ซึ่ง m เป็นเลขจำนวนเต็ม กริดกึ่งกลางอยู่ที่ 193.1 THz ซึ่งตรงกับความยาวคลื่น 1552.524 nm ในสูญญากาศ ช่วงห่างช่องสัญญาณที่ใช้ในระบบพาดิชย์อยู่ในช่วง 100 GHz ด้วยอัตราส่งข้อมูลสูงถึง 10 Gbit/s ต่อช่องสัญญาณ ในการเพิ่มความจุของข้อมูลมีด้วยกันอยู่สองวิธี วิธีแรกคือเพิ่มช่วงความยาวคลื่นที่ใช้ งานและใช้แบนด์วิดท์ครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นนี้ ตัวอย่างเช่น โดยการลดช่วงห่างช่องสัญญาณลงเหลือ 50 GHz , 25 GHz หรือน้อยกว่า 12.5 GHz อีกวิธีคือเพิ่มอัตราส่งข้อมูลซึ่งจะสัมพันธ์กับการเพิ่มแบนด์วิดท์สัญญาณ [2] ช่วงห่างช่องสัญญาณที่แคบกว่านี้ต้องใช้ฟิลเตอร์ที่ตอบสนองได้เร็วและอัตราส่วนเปิด-ปิด (On-off ratio) มากกว่า 20 dB เพื่อแยกช่องสัญญาณโดยไม่ให้เกิดสัญญาณไขว้แทรก (Crosstalk) จากช่องสัญญาณอื่น สเปกตรัมการส่งผ่านของฟิลเตอร์ทางแสงแสดงดังรูปที่ 1.2

ดังนั้นตัวกรองสัญญาณแสงที่เป็นโครงสร้างโพรงวงแหวนระดับไมโครเมตรที่ประดิษฐ์ขึ้นจากระบบวัสดุสารกึ่งตัวนำเช่น Si-SiO_2 , AlGaAs-GaAs , GaInAsP-InP เป็นต้น จึงเป็นอุปกรณ์ที่มีสำคัญเป็นอย่างมากที่ใช้ในระบบ WDM โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยุคปัจจุบันที่มีการดัดแปลงแบบแบ่งความยาวคลื่นกับช่องสัญญาณจำนวนมาก (Dense wavelength division multiplexing, DWDM) เพื่อการควบคุมและประมวลผลสัญญาณที่มีช่องสัญญาณแถบกว้างและลดปัญหาการเกิดสัญญาณไขว้ ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประมวลผลสัญญาณมัลติเพล็กซ์แอดด/ดรอ๊ป ด้วยการจำลองโครงสร้างโพรงวงแหวนระดับไมโครเมตรที่ประดิษฐ์ด้วยวัสดุ GaInAsP-InP และมีการเชื่อมต่อวงแหวนในลักษณะอันดับกัน ให้ทำหน้าที่เป็นตัวกรองสัญญาณแสงแอดด/ดรอ๊ป โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นซึ่งใช้วิธีการแปลงแบบ Z เป็นการวิเคราะห์สเปกตรัมของการส่งผ่านที่พอร์ตส่งผ่านและพอร์ตดรอ๊ปเทียบกับพอร์ตอินพุท ในการออกแบบสามารถที่จะควบคุมสมบัติลักษณะสเปกตรัมการส่งผ่านได้ ด้วยการเปลี่ยนแปลงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ของโพรงสั้นพ้องวงแหวน อย่างเช่น สัมประสิทธิ์การคัปปลิง สัมประสิทธิ์การลดทอน ความเข้มแสง รัศมีวงแหวน เป็นต้น จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโพรงสั้นพ้องที่ใช้ได้จริงนี้ สามารถนำไปออกแบบอุปกรณ์ให้มีคุณลักษณะการกรองตามต้องการและนำไปประดิษฐ์เป็นชิ้นงานได้ในที่สุด



รูปที่ 1.2 คุณลักษณะการส่งผ่านของตัวกรองสัญญาณแสง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการส่งข้อมูลข่าวสารด้วยใยแก้วนำแสงในระบบเครือข่ายทางแสง
2. เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้โพรงสั้นพ้องวงแหวนระดับไมโครเมตรเป็นตัวกรองสัญญาณแสงแอ็ด/ดริอป ในระบบ WDM
3. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนเพื่อใช้แสดงคุณลักษณะการกรองของตัวกรองโพรงสั้นพ้องวงแหวน 1 วง และที่เชื่อมต่ออันดับกัน 2 และ 3 วง
4. เพื่อออกแบบและกำหนดคุณลักษณะการกรองสัญญาณแสงของโพรงสั้นพ้องวงแหวนด้วยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์โพรงสั้นพ้อง
5. เปรียบเทียบความสามารถในการกรองของโพรงสั้นพ้องวงแหวนในโครงร่างต่างๆ

1.3 ขอบเขตของการทำวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาตัวกรองสัญญาณแสงที่เรียกว่าตัวกรองสัญญาณแฉัด/ครีโอป ซึ่งเป็นอุปกรณ์รวมแสงอย่างหนึ่งที่เป็นหัวใจสำคัญของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น WDM ในระบบเครือข่ายทางแสง โดยทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนความเข้มสนามไฟฟ้าของตัวกรองโพรงสั้นพ้องวงแหวนระดับไมโครเมตร ทั้ง 3 รูปแบบคือ โพรงสั้นพ้องวงแหวน 1,2 และ 3 วงและคัปปลิงกับท่อนำคลื่น 2 ท่อผ่านคัปเปลอร์ โพรงสั้นพ้องวงแหวนที่ต่อกันในลักษณะนี้จะเรียกว่าตัวกรองสัญญาณแฉัด/ครีโอป แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนความเข้มแสงที่พอร์ตส่งผ่านและพอร์ตครีโอปเทียบกับพอร์ตอินพุท ในการหาฟังก์ชันถ่ายโอนจะใช้การวิเคราะห์การแปลงแบบ Z ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้เป็นตัวแสดงถึงคุณลักษณะการส่งผ่านหรือการกรองความยาวคลื่นแสง ในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์สเปกตรัมของการส่งผ่านที่เป็นฟังก์ชันกับความยาวคลื่น โดยการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของโพรงสั้นพ้องเช่น สัมประสิทธิ์การคัปปลิง สัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มแสง รัศมีวงแหวน ก็สามารถที่จะกำหนดคุณลักษณะการกรองความยาวคลื่นแสงได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจการประยุกต์ใช้ตัวกรองสัญญาณแสงในระบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น
2. ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กำหนดคุณลักษณะการกรองของตัวกรองโพรงสั้นพ้อง
3. สามารถกำหนดคุณลักษณะการกรองความยาวคลื่นแสงของตัวกรองโพรงสั้นพ้องวงแหวนได้ตามต้องการ
4. สามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ในการออกแบบและสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้งานได้จริง

1.5 วิธีดำเนินการ การทำวิทยานิพนธ์

แผนการดำเนินการแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาหลักการพื้นฐานทางแสง การซ้อนทับกันของคลื่น การแทรกสอดของแสงรวมถึงเครื่องมือต่างๆที่อาศัยหลักการทางแสง

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาสมบัติของใยแก้วนำแสง การประยุกต์ใช้ใยแก้วนำแสงในเครือข่ายทางแสง การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นตัวกรองสัญญาณแสงแฉัด/ครีโอป

ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาการประดิษฐ์โพรงสั้นพ้องวงแหวนระดับไมโครเมตรที่ใช้เป็นตัวกรองสัญญาณแฉัด/ครีโอปด้วยระบบวัสดุสารกึ่งตัวนำ

- ขั้นตอนที่ 4 ศึกษาบทความที่มีการประยุกต์ใช้โพรงสั้นพ้องวงแหวนระดับไมโครเมตร เป็นตัวกรองสัญญาณแสง การส่งผ่านแสงในโพรงสั้นพ้อง การวิเคราะห์สเปกตรัมการส่งผ่าน ของตัวกรองโพรงสั้นพ้องวงแหวนที่ต่ออันดับกัน N วง ด้วยวิธีการแปลงแบบ Z
- ขั้นตอนที่ 5 ออกแบบโครงสร้างตัวกรองโพรงสั้นพ้องวงแหวน 1 วงและที่ต่ออันดับกัน 2 และ 3 วง หาความสัมพันธ์ฟังก์ชันถ่ายโอนทั้งในรูปสนามไฟฟ้าและความเข้มสนามไฟฟ้า
- ขั้นตอนที่ 6 จำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของโพรงสั้นพ้องวงแหวนที่ได้ในขั้นตอนที่ 5 และประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เปรียบเทียบผลที่ได้ในเรื่องเดียวกันกับบทความ ระดับนานาชาติ ถ้ามีข้อบกพร่องทำการปรับปรุงแก้ไข
- ขั้นตอนที่ 7 วิเคราะห์ผลที่ได้เพื่อหาคุณลักษณะการกรองที่ต้องการ
- ขั้นตอนที่ 8 สรุปการทำวิทยานิพนธ์และแนวทางในการพัฒนาต่อไป



บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

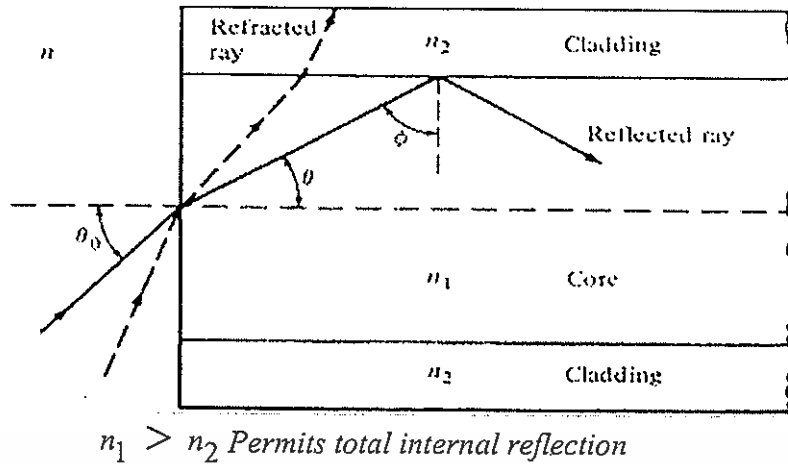
2.1 การสื่อสารด้วยใยแก้วนำแสง

การสื่อสาร คือการส่งข้อมูลหรือสัญญาณจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง ข้อมูลหรือสัญญาณที่ถูกส่งออกไปอาจจะอยู่ในรูปของสัญญาณเสียงหรือข้อมูลอื่นๆก็ได้ การสื่อสารเบื้องต้นของมนุษย์เป็นการสื่อความหมายโดยการพูดและการเขียน ในอดีตมนุษย์สื่อสารกันโดยใช้นกพิราบ การสร้างสัญญาณคว้นไฟ เป็นต้น ในปัจจุบันใยแก้วนำแสงมีบทบาทที่สำคัญกับระบบการสื่อสารทางไกล ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดของทั้งระบบและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมไปถึงอุปกรณ์สายส่งที่ทำจากสายทองแดง ส่วนประกอบหลักของระบบสื่อสารคือ มีตัวมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ช่องสัญญาณ เครื่องส่งและรับสัญญาณคลื่นพาห์ และตัวนำสัญญาณคลื่นพาห์ก็คือเส้นใยแก้วนำแสงนั่นเอง

2.2 ตัวนำสัญญาณคลื่นพาห์ [3], [4], [5]

หน้าที่ของตัวกลางที่ใช้สื่อสารก็คือการส่งสัญญาณแสงจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับโดยไม่เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณ ระบบที่ใช้คลื่นแสงในการสื่อสารส่วนใหญ่จะใช้ใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางในการนำพาห์ข้อมูลสื่อสาร เพราะว่าใยแก้วซิลิกาสามารถส่งคลื่นแสงโดยเกิดการสูญเสียเพียง 0.2 dB/km หรือกำลังจะลดลงเพียง 1% ในระยะทาง 100 km

ใยแก้วนำแสงทำขึ้นจากแก้วใส โปร่งแสงที่ประกอบด้วยวัสดุประเภทซิลิกาหรือพลาสติกที่มีความละเอียด โครงสร้างของใยแก้วนำแสงมีลักษณะเป็นท่อกลมยาว 2 ชั้น แสดงดังรูปที่ 2.1 ในส่วนชั้นในเป็นส่วนที่แสงเดินทางเรียกว่า แกน (Core) ซึ่งมีดัชนีหักเหประมาณ 1.6 และส่วนชั้นนอกที่หุ้มไว้เรียกว่า แคลดดิง (Cladding) มีดัชนีหักเหประมาณ 1.5 หน้าที่ของแคลดดิงก็คือลดการสูญเสียกำลังแสงเนื่องจากการสะท้อนกลับหมดของแสง และป้องกันการดูดกลืนกำลังแสงเมื่อแกนของใยแก้วไปสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอก นอกจากนี้ยังป้องกันไม่ให้แกนของใยแก้วโค้งงอหรือหักได้ง่าย จากการที่แกนมีค่าดัชนีหักเหมากกว่าแคลดดิง โดยอาศัยทฤษฎีการสะท้อนกลับหมดของแสงจึงทำให้แสงส่งผ่านไปตามแกนของใยแก้วนำแสงได้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนจะขึ้นอยู่กับสมบัติของการส่งสัญญาณแสง โดยทั่วไปมีขนาดประมาณ $5 - 50 \mu\text{m}$



รูปที่ 2.1 การสะท้อนกลับหมดภายในใยแก้วนำแสง แสงที่ตกเป็นมุม $\phi < \phi_c$ จะเลี้ยวเบนออกนอกแกน

ประสิทธิภาพของการเดินทางของคลื่นแสงที่ดีที่สุดจะ ได้จากการที่คลื่นแสงเกิดการสูญเสียพลังงานตกระทบและการสะท้อนน้อยที่สุด มุมตกระทบนี้เรียกว่ามุมวิกฤต (Critical angle, ϕ_c) จากรูปที่ 2.1 โดยอาศัยการสะท้อนกลับหมดของแสงที่ผิวรอยต่อระหว่างแกนและเคลือบคิงตามกฎของ สเนลล์ (Snell's law) จะได้

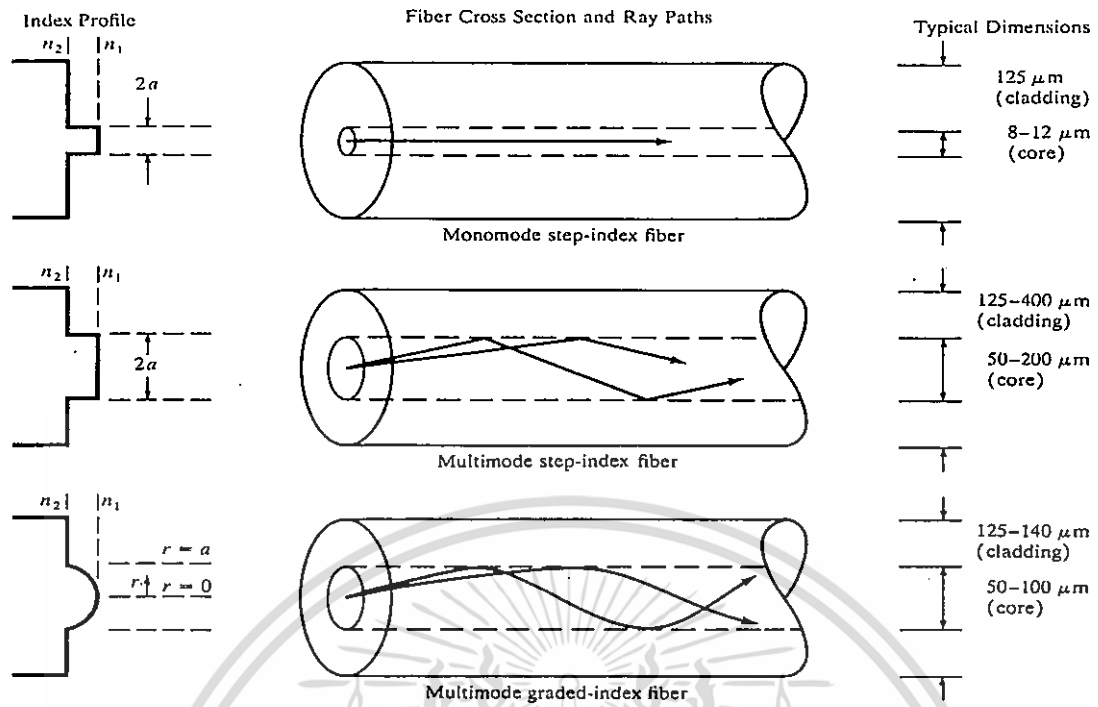
$$n_1 \sin \phi_c = n_2 \sin(90^\circ)$$

$$\phi_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (2.1)$$

ปริมาณที่บอกถึงความสามารถของคลื่นแสงที่เดินทางผ่านในใยแก้วนำแสงพิจารณาจากค่า อะเพอร์เจอร์เชิงตัวเลข (Numerical aperture, NA) ซึ่งมีค่าเป็น

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.2)$$

ประเภทของใยแก้วนำแสงที่แบ่งตามลักษณะดัชนีหักเหและโหมดของการแพร่ของแสง แสดงดังรูปที่ 2.2 และสรุปการแบ่งประเภทและชื่อเรียกของใยแก้วนำแสงไว้ในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.2 ประเภทของใยแก้วนำแสงที่แบ่งตามลักษณะดัชนีหักเหของแสงและโหมดของการแพร่

ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทและชื่อเรียกของเส้นใยแก้วนำแสง

การแบ่งประเภท	ชื่อเรียก	คุณสมบัติ
ชนิดของสาร ไดอิเล็กตริก	<ul style="list-style-type: none"> - Silica glass optic fiber - Multi component glass optic Fiber - Plastic optic fiber 	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้สาร SiO_2 บริสุทธิ์ - แก้วชนิด Sodium calcium silicates - ใช้สาร Silicon resin, Acryl resin
จำนวนโหมด ของการแพร่	<ul style="list-style-type: none"> - Single mode optic Fiber - Multi mode optic fiber 	<ul style="list-style-type: none"> - แสงเดินทางในใยแก้วนำแสงเส้นทางเดียว - แสงเดินทางในใยแก้วนำแสงหลายเส้นทาง
ลักษณะของดัชนี หักเหของแสง	<ul style="list-style-type: none"> - Step index optic Fiber - Graded index optic fiber 	<ul style="list-style-type: none"> - แนวทางเดินของแสงในใยแก้วนำแสงจะสะท้อนไปตามตรงรอยต่อของแกนและเคลดดิ้ง - แนวทางเดินของแสงในใยแก้วนำแสงจะสะท้อนไปตามความแตกต่างของเนื้อสารที่ใช้ทำแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การสูญเสียในใยแก้วนำแสง (Fiber Loss)

การสูญเสียในใยแก้วนำแสงเป็นสาเหตุที่ทำให้กำลังของแสงที่ส่งไปในเส้นใยแก้วนำแสงลดลงไปจากเดิม การสูญเสียกำลังแสงที่มีค่าน้อยจะยิ่งทำให้แสงเดินทาง (หรือการส่งสัญญาณ) ไปได้ไกลมากขึ้น

2.3.1 สัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation Coefficient)

ถ้า P_{in} เป็นกำลังแสงอินพุตที่ป้อนเข้าสู่ใยแก้ว กำลังเอาต์พุต P_{out} ที่ปลายใยแก้วที่มีความยาว L กำหนดได้เป็น

$$P_{out} = P_{in} \exp(-\alpha L) \quad (2.3)$$

โดยที่ α คือ สัมประสิทธิ์การลดทอน โดยปกติแล้วจะแสดงค่า α ในหน่วยของ dB / km โดยใช้ความสัมพันธ์

$$\alpha (dB / km) = -\frac{10}{L} \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \approx 4.343\alpha \quad (2.4)$$

2.3.2 การสูญเสียเนื่องจากการดูดกลืนของวัสดุ (Material Absorption Loss)

เป็นการดูดกลืนของพิวส์ซิลิกาซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำใยแก้วนำแสง โดยวัสดุจะดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นที่สั้นด้วยความถี่ตรงกับความถี่ไอออนของการเปลี่ยนสถานะภายในโมเลกุล สำหรับโมเลกุลของซิลิกา SiO_2 จะมีการดูดกลืนแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ต ($\lambda < 0.4 \mu m$) และย่านอินฟราเรด ($\lambda > 0.7 \mu m$) แสดงดังรูปที่ 2.5 นอกจากนี้ยังมีการดูดกลืนของสิ่งเจือปน โดยเฉพาะอะตอมโลหะทรานซิชัน (Fe, Cu, Co, Ni) และไฮดรอกไซด์ไอออน OH^- ซึ่งเป็นโมเลกุลของน้ำและจะมีการดูดกลืนสูงสุดที่แสงความยาวคลื่นราว $1400 nm$

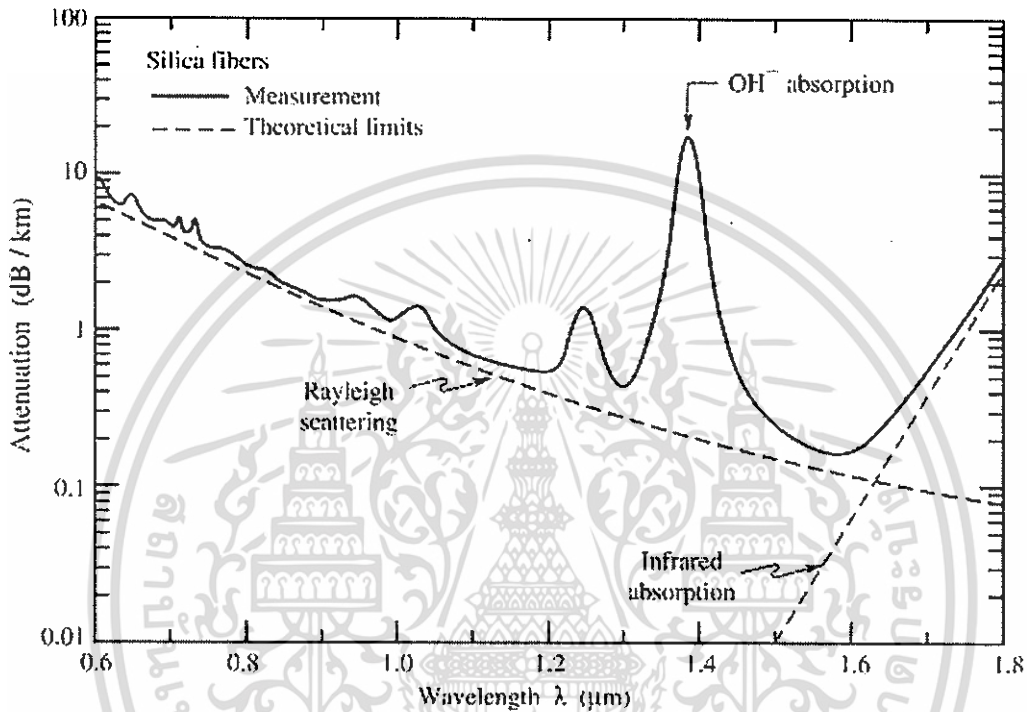
2.3.3 การสูญเสียเนื่องจากการกระเจิงแบบเรย์ลี (Rayleigh Scattering Loss)

เกิดจากการที่แสงตกกระทบวัตถุที่มีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่น ทำให้แสงกระเจิงไปในทิศทางต่างๆ ซึ่งเกิดจากในเนื้อแก้วมีโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบในแบบโมเลกุลจับเรียงตัวกันไม่เป็นระเบียบและทำให้ดัชนีหักเหมีค่าไม่คงที่ การสูญเสียจากการกระเจิงแบบเรย์ลีสามารถเขียนได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha_R = C / \lambda^4 \quad (2.5)$$

เมื่อ C เป็นค่าคงที่ซึ่งอยู่ในช่วง $0.7 - 0.9 (dB / km) \mu m^4$ ขึ้นกับส่วนประกอบของแกนใยแก้ว ค่า C ดังกล่าวตรงกับ $\alpha_R = 0.12 - 0.16 dB / km$



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมการสูญเสียของใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว

2.3.4 การสูญเสียเนื่องจากการโค้งงอของใยแก้ว (Bending Loss)

การโค้งงอของเส้นใยแก้วนำแสงเป็นที่มาของการสูญเสียเนื่องจากการกระเจิงอีกทางหนึ่ง โดยปกติแสงที่เดินทางในใยแก้วจะสะท้อนกลับหมดที่รอยต่อของแกนและแคลดดิ้ง ถ้ามุมตกกระทบมากกว่ามุมวิกฤต อย่างไรก็ตามมุมตกกระทบจะลดลงใกล้กับส่วนโค้งและอาจมีค่าน้อยกว่ามุมวิกฤตถ้าใยแก้วโค้งมากขึ้น ซึ่งทำให้แสงจะกระเจิงเข้าสู่ชั้นของแคลดดิ้ง ดังรูปที่ 2.3 เขียนแทนด้วยความสัมพันธ์ดังนี้

$$\alpha_\beta = C \exp\left(-\frac{R}{X_c}\right) \quad (2.6)$$

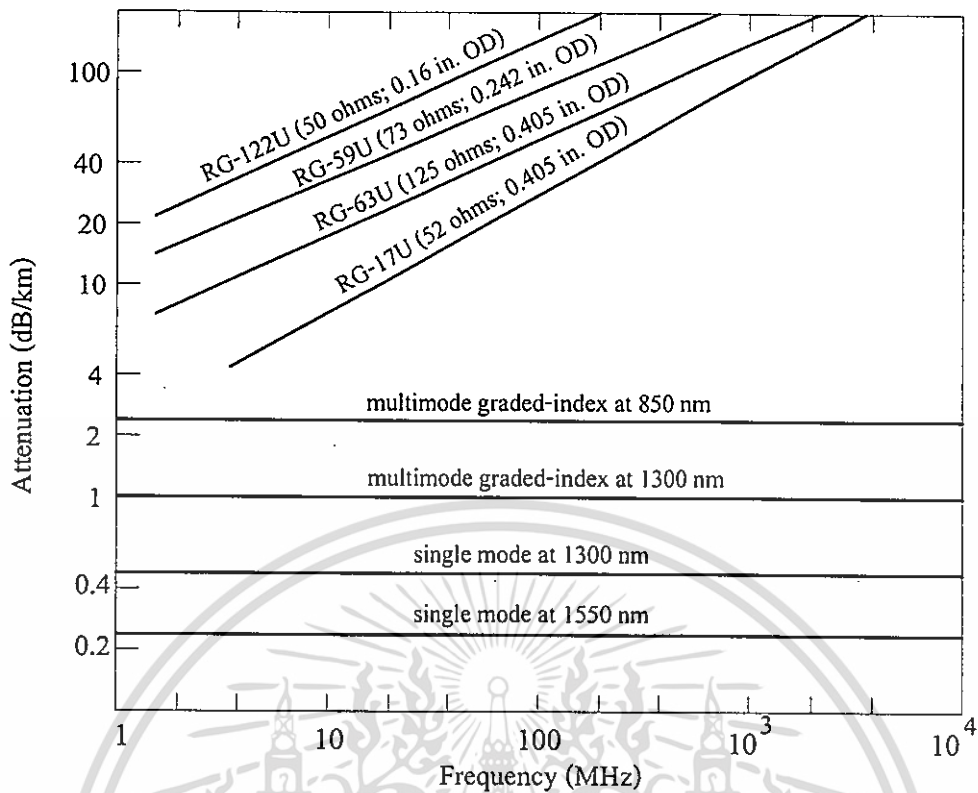
เมื่อ C คือ ค่าคงที่, R คือ รัศมีความโค้งของใยแก้วนำแสง

และ X_c คือ $\frac{a}{(NA)^2}$ เมื่อ a คือรัศมีของใยแก้วนำแสง

สำหรับใยแก้วนำแสงชนิดโมดเดี่ยว $X_c = 0.2 - 0.4 \mu m$ และกรณีรัศมีความโค้ง $R > 5 mm$ ก็จะไม่คำนึงถึงผลของการสูญเสียเนื่องจากการโค้งงอ ($< 0.01 dB / km$)



รูปที่ 2.4 การสูญเสียจากการโค้งงอของใยแก้วนำแสง



รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบการลดทอนระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงและสายตัวนำ

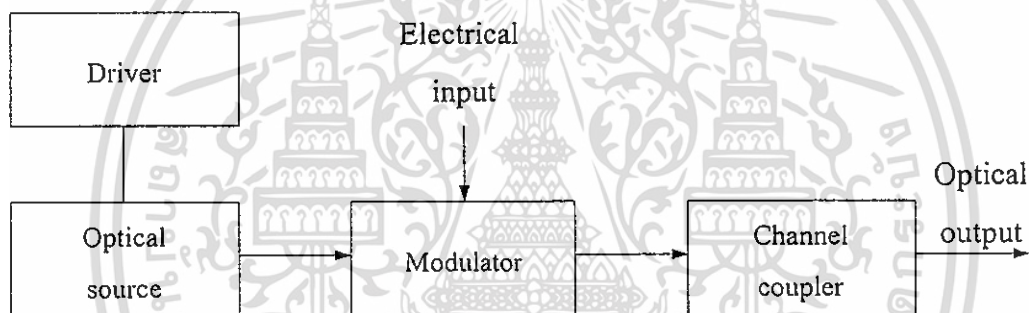
2.4 คุณสมบัติที่ดีของการสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสง

- มีการสูญเสียในการส่งสัญญาณต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับสายตัวนำที่ทำจากโลหะชนิดแกนร่วม จึงสามารถติดต่อสื่อสารระหว่างคู่สถานีได้ไกล (ดูรูปที่ 2.5)
- เป็นระบบสื่อสารที่ใช้กำลังงานไฟฟ้าต่ำมากเนื่องจากไม่มีอุปกรณ์กินกำลังไฟฟ้า
- ไม่มีการเหนี่ยวนำไฟฟ้า เนื่องจากทำจากสารพวกซิลิคอนที่เป็นฉนวนไฟฟ้า สัญญาณรบกวนจากภายนอกจึงไม่สามารถเหนี่ยวนำได้
- สามารถส่งสัญญาณที่มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมาก
- ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีและมีการขยายตัวทางความร้อนต่ำ
- ระบบซ่อมบำรุงทำได้ง่ายและปลอดภัยเนื่องจากอุปกรณ์มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ไม่มีส่วนของไฟฟ้าแรงสูงและอุปกรณ์อยู่ในที่ต่ำ
- ช่วยประหยัดธรรมชาติเนื่องจากซิลิกามีมากมายในธรรมชาติเมื่อเทียบกับทองแดง
- เกิดเวลาหน่วงสัญญาณต่ำซึ่งเป็นผลดีต่อการส่ง-รับสัญญาณข้อมูล
- มีความน่าเชื่อถือและมีความปลอดภัยในการส่งข่าวสารสูงเพราะไม่สามารถดักรับสัญญาณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 เครื่องส่งคลื่นพาห์ (Optical Transmitter) [3]

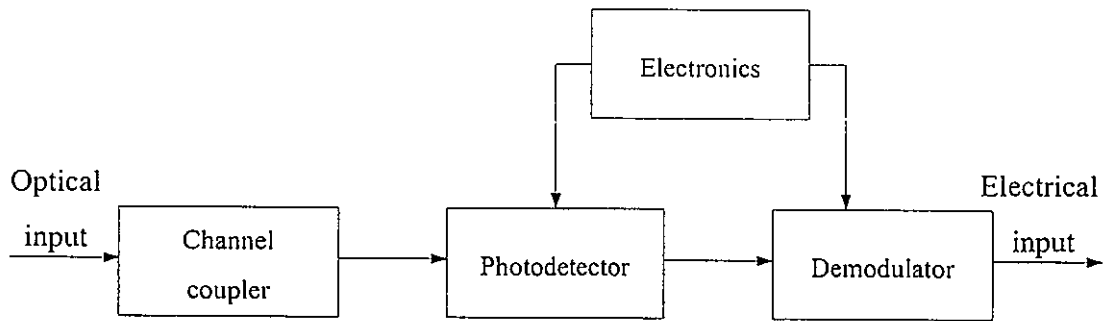
หน้าที่ของเครื่องส่งคลื่นพาห์คือการแปลงสัญญาณไฟฟ้า (อนาล็อกหรือดิจิทัล) ไปเป็นสัญญาณแสงเพื่อป้อนเข้าสู่ใยแก้วนำแสง รูปที่ 2.6 แสดงผังองค์ประกอบของเครื่องส่งคลื่นพาห์ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง มอดูเลเตอร์และตัวเชื่อมต่อช่องสัญญาณ แหล่งกำเนิดแสงที่เป็นที่นิยมจะใช้แอลอีดีหรือเลเซอร์สารกึ่งตัวนำซึ่งให้ความยาวคลื่นแสงระหว่าง 1300 nm ถึง 1600 nm การมอดูเลตสัญญาณมี 2 ลักษณะคือการมอดูเลตโดยตรงผ่านทางกระแสขาเข้าของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นหลักการที่ง่าย มีประสิทธิภาพที่ดี และการมอดูเลตภายนอกซึ่งใช้ได้ในบางกรณีเท่านั้นทำได้โดยเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง คุณสมบัติต่างๆเหล่านี้ของตัวกลางที่มีแสงผ่านจะทำให้สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวกลางเปลี่ยนไป เช่นผลของไฟฟ้า-แสง (Electro-Optic Effect) ผลของแม่เหล็ก-แสง (Magneto-Optic Effect) ส่วนตัวเชื่อมต่อจะเป็นไมโครเลนส์ซึ่งจะรวมสัญญาณแสงเข้าสู่ใยแก้วนำแสงเพื่อส่งต่อไปยังภาคเครื่องรับคลื่นพาห์



รูปที่ 2.6 ผังองค์ประกอบของเครื่องส่งคลื่นพาห์

2.6 เครื่องรับคลื่นพาห์ (Optical Receiver) [3]

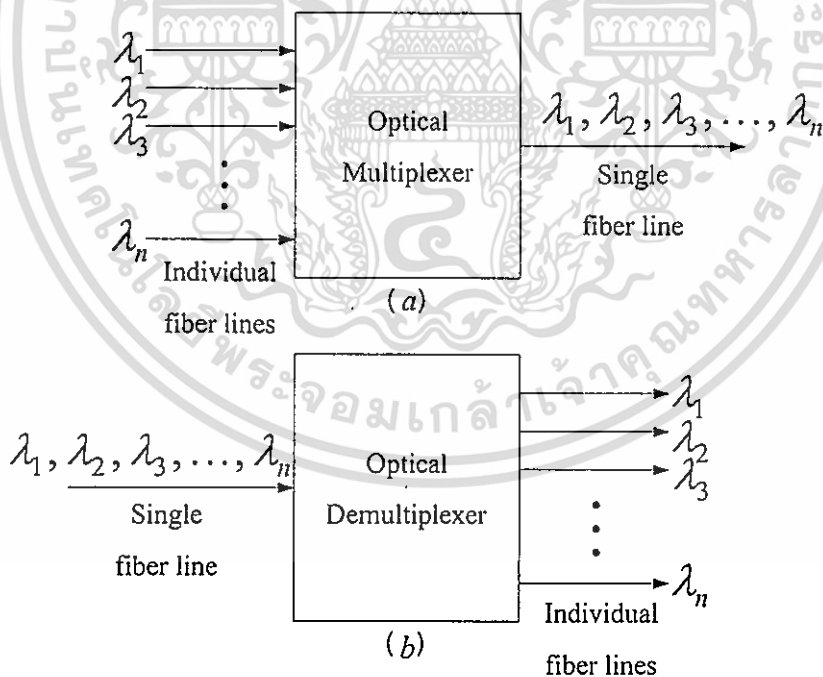
หน้าที่ของเครื่องรับคลื่นพาห์คือการแปลงสัญญาณแสงเอาท์พุทที่ปลายของใยแก้วนำแสงกลับไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า รูปที่ 2.7 แสดงผังองค์ประกอบของเครื่องรับคลื่นพาห์ซึ่งประกอบด้วยตัวเชื่อมต่อช่องสัญญาณ โฟโตดีเทคเตอร์ และคิมมอดูเลเตอร์ ตัวเชื่อมต่อจะรวมสัญญาณแสงที่ได้รับจากภาคเครื่องส่งคลื่นพาห์เข้าสู่โฟโตดีเทคเตอร์ โฟโตดีเทคเตอร์ที่ใช้ในระบบการสื่อสารทางแสงคือโฟโตไดโอดสารกึ่งตัวนำทั้งชนิด PIN โฟโตไดโอดและอะวาแลนซ์โฟโตไดโอด ส่วนคิมมอดูเลเตอร์จะทำหน้าที่แยกสัญญาณไฟฟ้าออกจากคลื่นพาห์ ประสิทธิภาพของการรับแสงจะขึ้นอยู่กับความสามารถของโฟโตดีเทคเตอร์และสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น โดยส่วนมากจะวัดได้จากอัตราส่วน S/N หรือค่าความผิดพลาดสัญญาณข้อมูลซึ่งเรียกว่า BER (Bit Error Rate)



รูปที่ 2.7 ฟังก์ชันประกอบของเครื่องรับคลื่นพาห้

2.7 ตัวมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ (Optical (De)Multiplexer) [2]

ตัวมัลติเพล็กซ์เป็นอุปกรณ์เชิงแสงที่ทำหน้าที่รวมสัญญาณแสงหลายช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่น อัตราส่งข้อมูลที่แตกต่างกันเข้าไว้ด้วยกันแล้วจึงป้อนเข้าสู่เส้นใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียวโดยไม่มีการเพิ่มจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงตาม แสดงดังรูปที่ 2.8(a) ส่วนตัวดีมัลติเพล็กซ์เป็นอุปกรณ์เชิงแสงที่ทำหน้าที่ตรงกันข้ามกล่าวคือ จะแยกสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันที่ส่งมาในใยแก้วนำแสงภายในเส้นเดียวออกเป็นความยาวคลื่นค่าต่างๆ ดังรูปที่ 2.8(b)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของตัวมัลติเพล็กซ์และตัวดีมัลติเพล็กซ์

2.8 ตัวกรองสัญญาณแสง

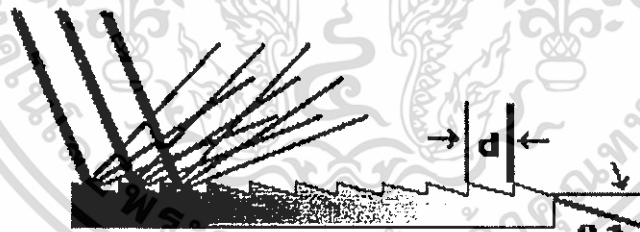
อุปกรณ์ที่สำคัญในการควบคุมแสงในระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น WDM ก็คือตัวกรองสัญญาณแสง สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลักดังนี้

- 1) Finite impulse response (FIR) / moving average (MA) filters : เป็นฟิลเตอร์ฟิลเตอร์ที่มีเฉพาะรูปแสงป้อนไปข้างหน้า ไม่ต้องอาศัยการป้อนกลับเชิงกลใดๆ นั่นคือ ไม่ต้องอาศัยการสะท้อนกลับทางแสง บางครั้งจะเรียกฟิลเตอร์เหล่านี้ว่า feed-forward ตัวอย่างของฟิลเตอร์ประเภทนี้คือฟิลเตอร์ที่ใช้หลัก Mach-Zehnder และ waveguide grating routers (WGRs)
- 2) Infinite impulse response (IIR) / autoregressive (AR) filters : เป็นฟิลเตอร์ที่โดยธรรมชาติแล้วจะอาศัยการสะท้อนกลับไปกลับมาหลายๆครั้ง ตัวอย่างของฟิลเตอร์ประเภทนี้จะรวมถึง fiber Bragg gratings (FBGs), thin film filters (TFFs) และ optical all-pass filters (APFs)

ตัวกรองสัญญาณแสงบางชนิดที่ใช้กันทั่วไปมีดังนี้

1. เกรตติงชนิดแบนราบ (plane grating)

เป็นเกรตติงที่ใช้การสะท้อนแสงเหมือนเกรตติงทั่วไป ประกอบด้วยผิวหน้ากระจกที่ถูกเซาะเป็นร่องและมีระยะร่องที่แคบมากดังรูปที่ 2.9 เมื่อมีการฉายแสง แสงจะสะท้อนจากร่องหนึ่งและแทรกสอดกับแสงที่สะท้อนจากร่องหนึ่ง โดยแสงที่สะท้อนจะมีระยะทางเดินแสงที่ต่างกัน ผลก็คือจะทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมและหักล้างกัน ความยาวคลื่นที่ขึ้นอยู่กับความถี่ของการแทรกสอดจะใช้ในการแยกความยาวคลื่นต่างๆที่ตรวจจับได้

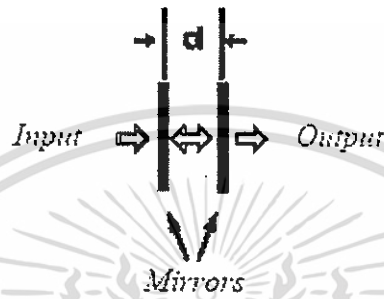


รูปที่ 2.9 เกรตติงชนิดแบนราบ

2. อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดแฟบริ-เพอร์โรต์ (Fabry-Perot interferometer)

หลักการของตัวกรองชนิดนี้เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1898 โดยนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสชื่อชาร์ล แฟบริ (Charles Fabry) และ อัลเฟรด เพอร์โรต์ (Alfred Perot) ลักษณะการจัดวางแสดงดังรูปที่ 2.10 ก็คือใช้กระจก 2 แผ่นวางขนานห่างกันเล็กน้อย มีผิวด้านในที่เรียบมากและสะท้อนดีมากด้วย การสะท้อนทำได้โดยฉาบโลหะบางชนิดลงบนแผ่นแก้ว การฉายต้องให้เรียบและบางเพื่อให้แสงส่งผ่านได้ด้วย แสงที่ตกกระทบกระจกแผ่นแรกจะเกิดการสะท้อน แต่ก็ยังแสงบางส่วนที่ทะลุผ่านเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

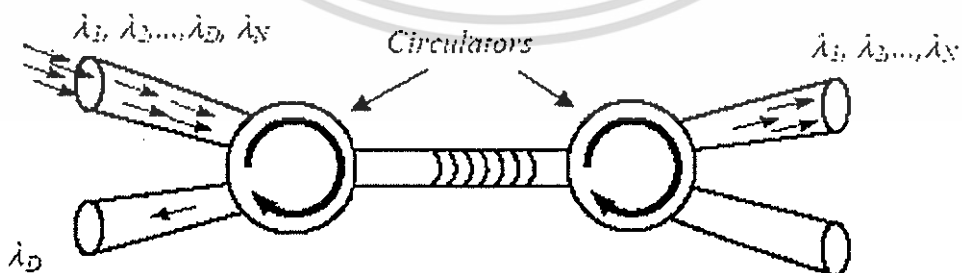
กระจกและเดินทางอยู่ในโพรงระหว่างกระจกทั้งสองแผ่น (ซึ่งอาจจะมีการเติมสารไดอิเล็กทริกบางประเภทเช่น ผลึกเหลว) และเกิดการชนกับกระจกแผ่นที่ 2 ที่กระจกแผ่นที่ 2 นี้แสงจำนวนมากระยะห่างและดัชนีหักเหของสารระหว่างกระจก แสงเอาที่พู่ทที่เกิดจากการแทรกสอดจะเป็นผลรวมของแสงอินพุตที่ถูกหน่วงโดยจำนวนของการสะท้อนในโพรง



รูปที่ 2.10 อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดแฟบริ-เพอร์โรต์

3. เกรตติงใยแก้วนำแสงแบบแบรกก์ (fiber Bragg grating)

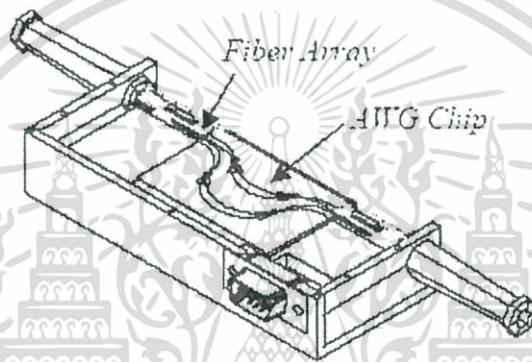
ตัวกรองชนิดนี้ (ดังรูปที่ 2.11) ประกอบด้วยบริเวณที่ดัชนีหักเหของใยแก้วเปลี่ยนแปลงเป็นช่วงๆ ระหว่างสูงและต่ำ เมื่อปล่อยแสงเลเซอร์ย่านอุลตราไวโอเล็ตเข้าไปในใยแก้วก็จะทำให้เกิดลวดลายการแทรกสอดขึ้นเกิดเป็นแถบมืดและสว่างบนเส้นใยแก้ว จะมีแสงเฉพาะบางความยาวคลื่นเท่านั้นที่สอดคล้องกับเงื่อนไขของแบรกก์ ซึ่งที่ค่าความยาวคลื่นแบรกก์จะเกิดการสะท้อนกลับสูงมากซึ่งก็จะสัมพันธ์กับระยะห่างของเกรตติงหรือที่เรียกว่า พิตช์ (Pitch) ในขณะที่ความยาวคลื่นอื่นๆ จะทะลุผ่านหมด



รูปที่ 2.11 เกรตติงใยแก้วนำแสงแบบแบรกก์

4. เกรตติงท่อนำคลื่นแถวลำดับ (arrayed waveguide grating, AWG)

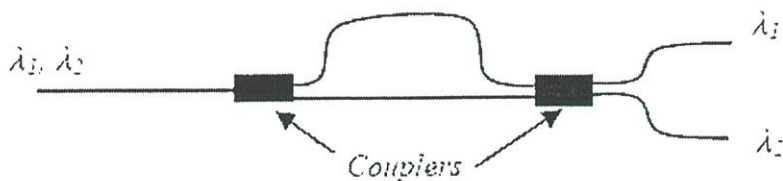
เป็นตัวกรองที่นิยมใช้กันมากในงานด้านการสื่อสารโทรคมนาคม AWG จะใช้แถวลำดับของท่อนำคลื่นชนิดโมดเดียวโดยที่ท่อนำคลื่นที่อยู่ใกล้กันจะมีความยาวต่างกันคงที่ แสงอินพุทจากเส้นใยแก้วจะผ่านเข้าสู่ท่อนำคลื่นทุกแถวลำดับ เนื่องจากความยาวของท่อนำคลื่นที่ต่างกัน เฟสของแสงที่ปลายด้านเอาต์พุทของแถวลำดับท่อนำคลื่นก็จะเปลี่ยนแปลงตามความยาวที่ต่างกันคงที่นี้ ผลของความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับหน้าเฟส (phase front) ซึ่งคล้ายกับที่เกิดในเกรตติงชนิดแบนราบ ปริมาณการแทรกสอดที่เอาต์พุทจะขึ้นกับความถี่ของแสง เมื่อคลื่นแสงผสมออกจากเกรตติง คลื่นแสงหลายความถี่จะถูกแยกออกแต่ละความถี่สู่เอาต์พุทใยแก้ว AWG สามารถใช้เป็นตัวมัลติเพลกซ์หรือดีมัลติเพลกซ์ความยาวคลื่นได้



รูปที่ 2.12 การบรรจุเกรตติงท่อนำคลื่นแถวลำดับ

5. Mach-Zehnder interferometer (MZI)

ตัวกรองชนิดนี้ประกอบด้วยคัปเปิลเลอร์ 2 ตัวที่เชื่อมต่อทางเดินแสง 2 ทางที่มีความยาวไม่เท่ากัน ดังรูปที่ 2.13 การแทรกสอดของแสงทั้ง 2 ทางจะเกิดขึ้นที่คัปเปิลเลอร์ตัวที่ 2 การกระจายความเร็วกลุ่ม (group velocity dispersion) ในทางเดินทางแสงที่ยาวไม่เท่ากัน ก็จะส่งผลให้บางความยาวคลื่นส่งผ่านไปยังเอาต์พุทพอร์ตบน และอีกความยาวคลื่นส่งผ่านไปยังเอาต์พุทพอร์ตล่าง



รูปที่ 2.13 Mach-Zehnder interferometer

60254

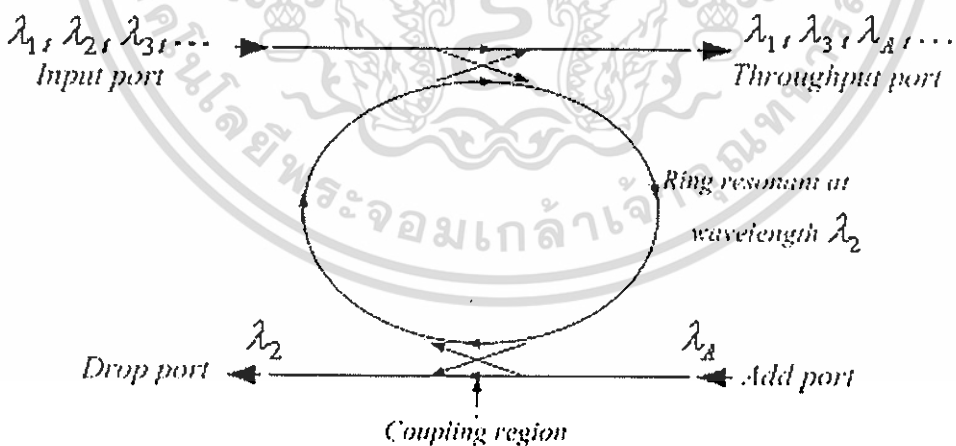
6. ตัวกรองแทรกสอดชนิดฟิล์มบางไดอิเล็กตริก (Thin film dielectric interference filter)

ตัวกรองแทรกสอดชนิดนี้ต้องมีการเคลือบชั้นของฟิล์มบางที่มีค่าดัชนีหักเหแตกต่างกัน ซ้อนกันหลายๆชั้นเพื่อที่จะสร้างตัวกรองที่มีแถบแคบๆ ตัวกรองชนิดเดียวกันนี้ที่มีแบนด์วิดท์ $100\text{ GHz } 3\text{ dB}$ ต้องมีการเคลือบฟิล์มบางซ้อนกันมากกว่าร้อยชั้น จากการที่ต้องเคลือบฟิล์มบาง ซ้อนกันหลายๆชั้นจึงทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มบาง จึงทำให้มีการใช้ตัวกรองชนิดนี้ลดน้อยลง ลำแสงทะลุผ่านที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกรองประกอบด้วย ลำแสงย่อยๆจำนวนมาก แต่ละลำแสงย่อยก็จะมีเวลาในการเคลื่อนที่ที่ต่างกันน้อยๆ ซึ่งส่งผลให้เกิด การกระจายสัญญาณข้อมูลเพิ่มขึ้น

2.9 การวิเคราะห์การแปลงแบบ Z ของตัวกรองโพรงสั้นพ้องวงแหวน

Autoregressive (AR) add/drop filter ที่เป็นท่อนำคลื่นชนิดเบนราบพื้นฐานก็คือ โพรงสั้นพ้องวงแหวนเดี่ยวที่มีบัสท่อนำคลื่น 2 ท่อและคัปเปิลเลอร์ 2 ตัว แสดงดังรูปที่ 2.14 ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองโพรงสั้นพ้องจะมีโพล (Pole) ของระบบ 1 ค่าและไม่มีค่าศูนย์ (Zero) ของระบบ ดังสมการที่ (2.7) โดยสมมติให้คัปเปิลเลอร์ทั้ง 2 ตัวมีค่าเฟกเตอร์ของการคัปปลิงเท่ากันคือ K [6]

$$H(z) = \frac{\text{output}}{\text{input}} = \frac{-K\sqrt{z^{-1}}}{1 - (1-K)z^{-1}} \quad (2.7)$$



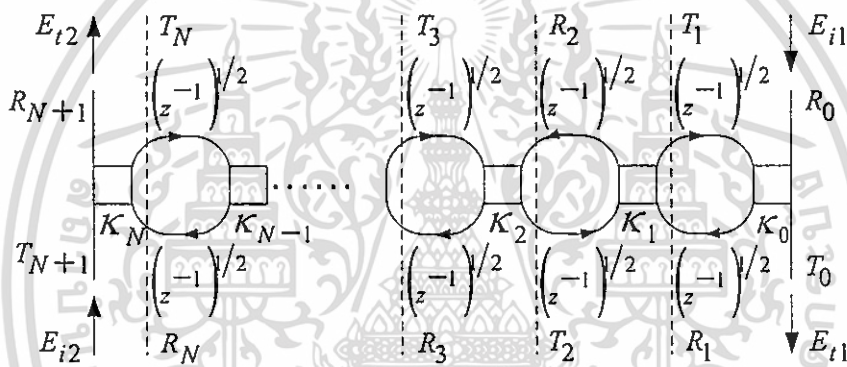
รูปที่ 2.14 โพรงสั้นพ้องวงแหวน 1 วง 2 คัปเปิลเลอร์ที่ใช้เป็นตัวกรองช่องสัญญาณครีโอบ

การส่งผ่านสนามไฟฟ้ารอบวงแหวนแสดงด้วย $z^{-1} = \exp\left(-\frac{\alpha}{2}L - jk_n L\right)$ ที่ซึ่ง k_n คือ

ค่าคงที่การแพร่ของคลื่น (Wave Propagation Constant) และ $\exp\left(-\frac{\alpha}{2}L\right)$ คือ การสูญเสียกำลัง

ในหนึ่งรอบวงแหวน (One Roundtrip Loss) ซึ่งหมายถึงรวมถึงความสูญเสียจากการแพร่ (Propagation Loss) ความสูญเสียที่เป็นมาจากการเคลื่อนที่ในวงแหวนและความสูญเสียจากการโค้งงอ ค่าของ

α (มีหน่วยเป็น length^{-1}) จะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุและท่อนำคลื่นที่นำมาใช้และมีชื่อเรียกว่า สัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มแสง (Intensity Attenuation Coefficient), L คือความยาวรอบวงแหวน โปร่งสั้นพ้อง รายละเอียดการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างโปร่งสั้นพ้องที่ต่อกันในลักษณะที่แตกต่างกันสามารถค้นคว้าได้ในหนังสือ “Optical Filter Design and Analysis”



รูปที่ 2.15 ตัวกรองโปร่งสั้นพ้องวงแหวนที่ต่ออันดับกัน N วง

ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ของตัวกรองโปร่งสั้นพ้องที่ต่ออันดับกัน ดังรูปที่ 2.15 สามารถหาได้โดยใช้สูตรทางเมตริกซ์ ดังที่อธิบายใน [7] โดยเรียกโปร่งสั้นพ้องที่ต่ออันดับดังรูปที่ 2.15 ว่า IIR Filter ซึ่งประกอบด้วยวงแหวนจำนวน N วง โดยมีเส้นรอบวงยาว L เท่ากัน เชื่อมต่อกันด้วยคัปเปิลอร์ที่มีสัมประสิทธิ์ของคัปปลิง (Fiber Coupler Coupling Coefficient) K_0, K_1, \dots, K_N และมีสัมประสิทธิ์การสูญเสียคัปปลิง (Loss Coupling Coefficient) $\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_N$ ความผิดพลาดของเฟส (Phase Error) จะรวมอยู่ในการวิเคราะห์การแปลงแบบ Z โดยคูณ z^{-1} ด้วยเทอม $\exp(j\phi_n)$ ในแต่ละขั้นของวงแหวน สนามไฟฟ้าอินพุตและเอาต์พุตจะแทนด้วย E_{i1}, E_{o1} และ E_{i2}, E_{o2} ตามลำดับ เช่นเดียวกับกับสนามไฟฟ้าที่เดินทางอยู่ภายในวงแหวนในทิศทางไปข้างหน้าจะแทนด้วย T_0, T_1, \dots, T_N และสนามไฟฟ้าในทิศทางย้อนกลับจะแทนด้วย R_0, R_1, \dots, R_N การหาผลตอบสนองต่อความถี่ของโครงสร้างดังรูปที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15 ทำได้โดยเริ่มต้นจากการหาเมตริกซ์การส่งผ่าน (Transmission Matrix) สำหรับวงแหวนชั้นเดียวก่อน สัมประสิทธิ์การคับปลิงของคับปลอร์แต่ละตัวตามเส้นทางทะลุผ่าน (Throughput Path) กำหนดให้มีค่าเป็น $y_n = \sqrt{(1 - \kappa_n)}$ และตามเส้นทางทแยงมุม (Cross Path) มีค่าเป็น $r_n = j\sqrt{\kappa_n}$ การแปลงอินพุตไปสู่เอาต์พุตในแต่ละชั้นสามารถแสดงด้วยเมตริกซ์การส่งผ่าน Φ_n ดังนี้

$$T_{n-1} = r_{n-1} \sqrt{z^{-1}} T_n + y_{n-1} R_{n-1} \quad (2.8)$$

$$R_n = \sqrt{z^{-1}} \left[y_{n-1} \sqrt{z^{-1}} T_n + r_{n-1} R_{n-1} \right] \quad (2.9)$$

$$\begin{bmatrix} T_{n+1}(z) \\ R_{n+1}(z) \end{bmatrix} = \frac{1}{r_n \sqrt{e^{j\phi_{n+1}} z^{-1}}} \Phi_n \begin{bmatrix} T_n(z) \\ R_n(z) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\Phi_n = \begin{bmatrix} 1 & -y_n \\ y_n e^{j\phi_{n+1}} z^{-1} & -e^{j\phi_{n+1}} z^{-1} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างวงแหวนชั้นแรกและวงแหวนชั้นสุดท้ายสามารถแสดงได้โดยการคูณต่อกันของเมตริกซ์ Φ_n ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} T_{n+1}(z) \\ R_{n+1}(z) \end{bmatrix} = \frac{1}{j^{N+1} \left\{ \sigma_N e^{j(\phi_{tot} + \phi_{N+1})} z^{-(N+1)} \right\}^{1/2}} \cdot \Phi_N \cdots \Phi_0 \begin{bmatrix} T_0(z) \\ R_0(z) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\text{ที่ซึ่ง } \phi_{tot} = \sum_{n=1}^N \phi_n \text{ และ } \sigma_N = \prod_{n=0}^N \kappa_n$$

กำหนดให้ Φ_{N0} แทนผลคูณเมตริกซ์ $\Phi_{N0} = \prod_{n=0}^N \Phi_n$ ดังนั้นแต่ละเทอมในเมตริกซ์การส่งผ่าน N อันดับ สามารถจะแสดงในเทอมของ 2 พหุนามดังนี้

$$\Phi_{N0} = \begin{bmatrix} A_N(z) & B_N^R(z) \\ e^{j\phi_{N+1}} z^{-1} B_N(z) & e^{j\phi_{N+1}} z^{-1} A_N^R(z) \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

ที่ซึ่ง $A_N(z)$ และ $B_N(z)$ คือพหุนาม N อันดับใน z^{-1} พหุนามย้อนกลับ (Reverse Polynomial) นิยามได้ดังนี้

$$A_N^R(z) = (-1)^{N-1} z^{-N} e^{j\phi_{tot}} A_N^*(z) \begin{pmatrix} 1 \\ * \\ z \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

$$B_N^R(z) = (-1)^{N-1} z^{-N} e^{j\phi_{tot}} B_N^*(z) \begin{pmatrix} 1 \\ * \\ z \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

สมมติว่าไม่มีอินพุต E_{i1} ป้อนเข้ามา ฟังก์ชันถ่ายโอนของอินพุต E_{i2} ต่อเอาต์พุตแต่ละตัวแสดงได้ดังนี้

$$H_{11}(z) = \frac{E_{i1}}{E_{i2}} = \frac{T_0(z)}{\sqrt{e^{j\phi_{N+1}} z^{-1} T_{N+1}(z)}} = \frac{j^{N+1} z^{-N/2} e^{j\phi_{tot}/2} \sqrt{\sigma_N}}{A_N(z)}$$

$$H_{21}(z) = \frac{E_{i2}}{E_{i2}} = \frac{z R_{N+1}(z)}{e^{j\phi_{N+1}} T_{N+1}(z)} = \frac{B_N(z)}{A_N(z)} \quad (2.16)$$

ในทำนองเดียวกัน ถ้าสมมติว่าไม่มีอินพุต E_{i2} ป้อนเข้ามา ฟังก์ชันถ่ายโอนของอินพุต E_{i1} ต่อเอาต์พุตแต่ละตัวจะมีค่าเป็น

$$H_{22}(z) = \frac{E_{i2}}{E_{i1}} = \frac{R_{N+1}(z)}{\sqrt{e^{j\phi_{N+1}} z^{-1} R_0(z)}} = H_{11}(z)$$

$$H_{12}(z) = \frac{E_{i1}}{E_{i1}} = \frac{T_0(z)}{R_0(z)} = \frac{-B_N^R(z)}{A_N(z)} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$H_{11}(z)$ คือ autoregressive filter และ $H_{21}(z)$ คือ autoregressive moving average filter (หัวข้อที่ 2.8) ตำแหน่งของโพลจะเป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้นกับสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิง ซึ่งแสดงด้วยพหุนาม A_N และ B_N ของอันดับที่ 1 และ 2 ดังที่แสดงไว้ดังสมการที่ (2.18) โดยเฉพาะอย่างยิ่งทั้งค่าศูนย์และโพลจะขึ้นต่อกัน

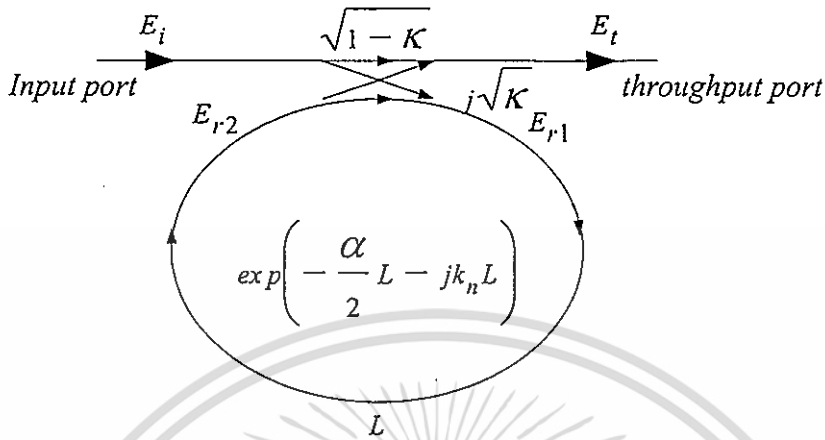
$$\begin{aligned} A_1 &= 1 - y_0 y_1 e^{j\phi_1} z^{-1} \\ B_1 &= y_1 - y_0 e^{j\phi_1} z^{-1} \\ A_2 &= 1 - y_1 \left(y_0 e^{j\phi_1} + y_2 e^{j\phi_2} \right) z^{-1} + y_0 y_2 e^{j(\phi_1 + \phi_2)} z^{-2} \\ B_2 &= y_2 - y_1 \left(y_0 y_2 e^{j\phi_1} + e^{j\phi_2} \right) z^{-1} + y_0 e^{j(\phi_1 + \phi_2)} z^{-2} \end{aligned} \quad (2.18)$$

ความสัมพันธ์ภายในวงแหวนและเฟกเตอร์ของการคัปปลิงทั้งสองค่าจะมีผลต่อขนาดของสัมประสิทธิ์พหุนาม A_N และ B_N เนื่องจากขนาดของ z^{-1} มีค่าน้อยกว่า 1 ถ้าไม่มีความผิดพลาดเฟสเกิดขึ้นจะทำให้สัมประสิทธิ์พหุนามเป็นค่าจริง เฟสรวม (Total Phase) ได้มาจากสัมประสิทธิ์อันดับที่ N ของพหุนาม A_N และ B_N การเปลี่ยนแปลงใดๆของการสูญเสียภายในวงแหวนจากชั้นวงแหวนหนึ่งไปสู่อีกชั้นวงแหวนหนึ่งสามารถรวมแยกไว้เป็นอีกเทอม ซึ่งประกอบด้วยความผิดพลาดเฟส นั่นคือ $\exp\left(j\phi_n - \frac{\Delta\alpha}{2} L\right)$ เทอม $\Delta\alpha_n$ จะต้องรู้ค่าก่อนที่จะกำหนดพหุนามย้อนกลับในสมการ (2.12) และ (2.13)

2.10 โพรงสั้นพ้องวงแหวนวงเดียว

โครงสร้างอย่างง่ายของโพรงสั้นพ้องวงแหวนวงเดียวที่มีคัปเปิลเตอร์ 2x2 เพียง 1 ตัวแสดงดังรูปที่ 2.16 ซึ่งมีเส้นรอบวงของวงแหวนเป็น L ($L = 2\pi R$; รัศมีคือ R) สัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงกำลังคือ K สัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มแสงของวงแหวนคือ α ค่าคงที่ของการแพร่กระจายคลื่น (Wave propagation constant) คือ k_n การวิเคราะห์อุปกรณ์ที่แสดงดังรูปข้างล่างจะอธิบายการคัปปลิงของแสงที่เข้าและออกจากโพรงสั้นพ้อง ในเทอมความสัมพันธ์ของการแยกลำแสงทั่วไป โดยมีสัมประสิทธิ์การคัปปลิงตามเส้นทางทะลุผ่าน ($E_i \rightarrow E_t, E_{r2} \rightarrow E_{r1}$)

มีค่าเป็น $y = \sqrt{(1-\gamma)(1-K)}$ และตามเส้นทางทแยงมุม ($E_i \rightarrow E_{r1}, E_{r2} \rightarrow E_t$)
มีค่าเป็น $r = j\sqrt{(1-\gamma)K}$



รูปที่ 2.16 โพรงสั้นห้องวงแหวนวงเดียว

ความสัมพันธ์สนามไฟฟ้าส่งผ่าน E_t และอินพุต E_i สามารถหาได้ดังนี้

$$E_t = (1-\gamma)^{1/2} \times [E_i \cdot \sqrt{1-K} + j \cdot E_{r2} \sqrt{K}] \quad (2.19)$$

$$E_{r1} = (1-\gamma)^{1/2} \times [j \cdot E_i \cdot \sqrt{K} + E_{r2} \cdot \sqrt{1-K}] \quad (2.20)$$

จากทฤษฎีการส่งผ่านแสง (Light transmission theory) ในระบบเชิงแสงที่เป็นเชิงเส้น สนามไฟฟ้าของคลื่นแสงที่เคลื่อนที่ไปได้ในแต่ละส่วนระยะทางอธิบายได้ด้วยสมการ

$$E_{segment} = E_A \cdot \exp\left(-\frac{\alpha_{segment}}{2} \cdot L_{segment} - j \cdot k_n \cdot L_{segment}\right) \quad (2.21)$$

เมื่อ E_A คือ แอมพลิจูดสนาม, $L_{segment}$ คือ ความยาวทางเดินแสงในแต่ละส่วน ดังนั้นความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าที่ปลายทั้งสองของวงแหวนคือ

$$E_{r2} = E_{r1} \cdot \exp\left(-\frac{\alpha}{2} \cdot L - j \cdot k_n \cdot L\right) \quad (2.22)$$

ในที่นี้ $k_n = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda}$ และ γ แทนสัมประสิทธิ์การสูญเสียความเข้มแสงอินพุตของคัปเปลอร์ และ n_{eff} คือ ดัชนีหักเหประสิทธิผล (effective refractive index) โดยใช้สมการ (2.19),(2.20) และ (2.22) สามารถคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอน E_t/E_i ได้เป็น

$$\frac{E_t}{E_i} = (1-\gamma)^{1/2} \times \left[\frac{\sqrt{1-K} - (1-\gamma)^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{\alpha}{2} \cdot L - j \cdot k_n \cdot L\right)}{1 - (1-\gamma)^{1/2} \cdot \sqrt{1-K} \cdot \exp\left(-\frac{\alpha}{2} \cdot L - j \cdot k_n \cdot L\right)} \right] \quad (2.23)$$

เพื่อให้่ายในการแก้สมการจะกำหนดพารามิเตอร์ตัวใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned} D &= (1-\gamma)^{1/2} \\ x &= D \cdot \exp\left(-\frac{\alpha}{2} \cdot L\right) \\ y &= \sqrt{1-K} \\ \phi &= k_n \cdot L \end{aligned} \quad (2.24)$$

ความสัมพันธ์ความเข้มแสงของพอร์ตเอาต์พุตเทียบกับพอร์ตอินพุตกำหนดได้เป็น [8]

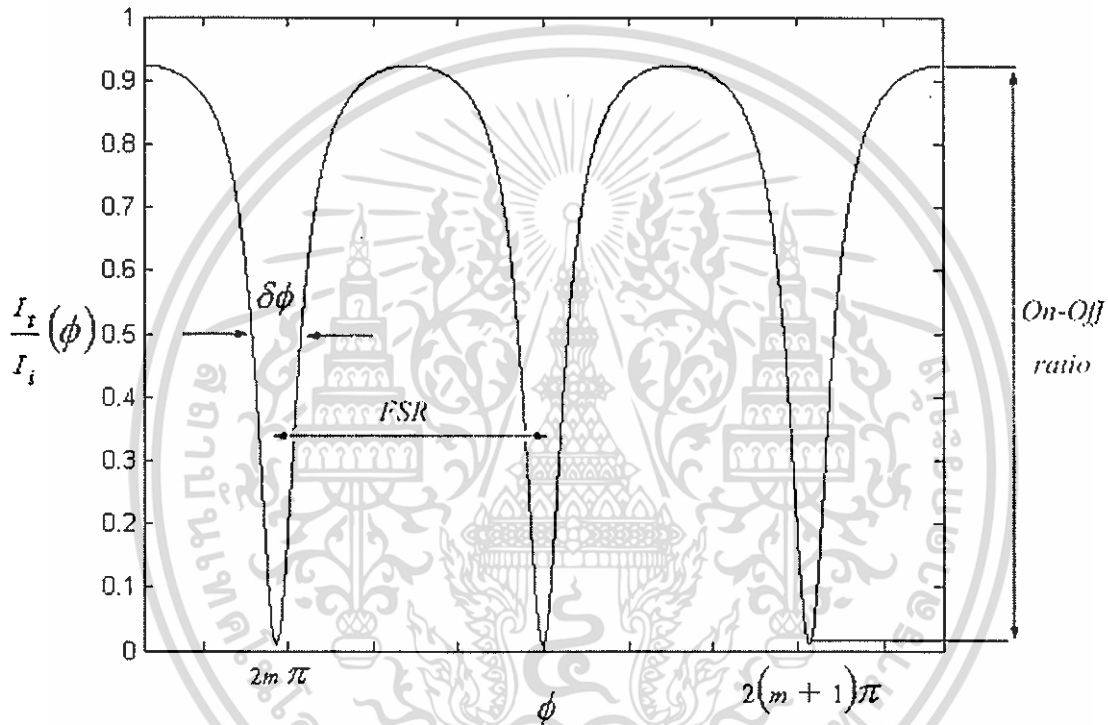
$$T = \frac{I_t}{I_i}(\phi) = \left| \frac{E_t}{E_i} \right|^2 = D^2 \cdot \left[1 - \frac{(1-x^2) \cdot (1-y^2)}{(1-x \cdot y)^2 + 4 \cdot x \cdot y \cdot \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \right] \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเปกตรัมของการส่งผ่านของโพรงสั้นพ้องวงแหวนเดี่ยวแสดงดังรูปที่ 2.17 โดยที่ความเข้มการส่งผ่านสูงสุด ($\phi = m\pi$) และต่ำสุด ($\phi = 2m\pi$) มีค่าดังนี้

$$T_{\max} = D^2 \cdot \frac{(x+y)^2}{(1+x \cdot y)^2} \quad (2.26)$$

$$T_{\min} = D^2 \cdot \frac{(x-y)^2}{(1-x \cdot y)^2} \quad (2.27)$$



รูปที่ 2.17 คุณลักษณะของสเปกตรัมการส่งผ่านของโพรงสั้นพ้องวงแหวนเดี่ยว

แบนด์วิดท์ที่ 3 dB (full-width at half-maximum, FWHM) $\delta\phi \left[\frac{I_t}{I_i}(\phi) = 0.5 \right]$ และ

ค่าฟิเนสส์ (Finesse, F) ของโพรงสั้นพ้องกำหนดได้เป็น

$$\delta\phi = \frac{2 \cdot (1 - x \cdot y)}{\sqrt{x \cdot y}} \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = \frac{2\pi}{\delta\phi} = \frac{\pi \cdot \sqrt{x \cdot y}}{(1 - x \cdot y)} \quad (2.29)$$

สัมประสิทธิ์เฟสเป็นตัววัดเพื่อดูคุณลักษณะการส่งผ่านของตัวกรองสัญญาณแสง จุดที่เกิดเรโซแนนซ์ตามสมการที่ (2.25) ที่ทำให้สเปกตรัมการส่งผ่านมีค่าต่ำสุด T_{min} กำหนดด้วย

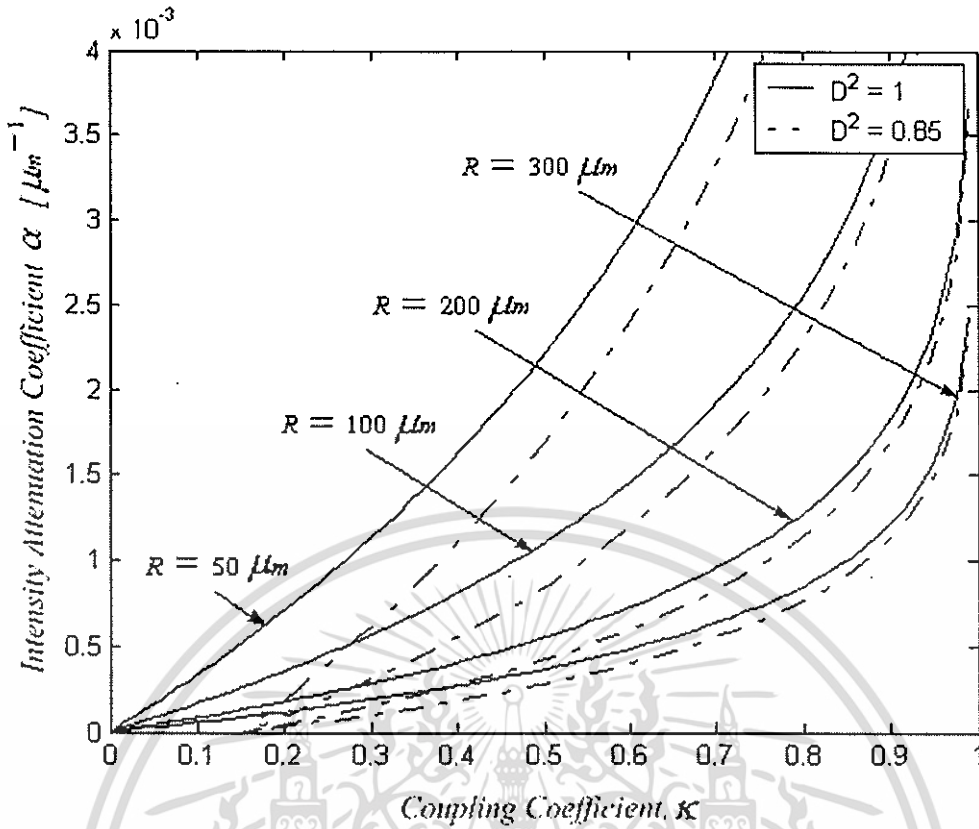
$$\phi = k_n \cdot L = 2 \cdot m \cdot \pi \quad (2.30)$$

เนื่องจากว่าคลื่นแสงที่เดินทางภายในวงแหวนจะเกิดการลดทอนกำลังความเข้มแสง T_{max} จึงมีค่าน้อยกว่า 1 ดังนั้นอัตราส่วนเปิด-ปิด (On-Off Ratio) จะมีค่าสูงสุดต่ำ

$$T_{min} = 0 \Rightarrow x = y$$

$$\alpha = -\frac{1}{L} \cdot \ln\left(\frac{1-K}{D^2}\right) \quad (2.31)$$

อัตราส่วนเปิด-ปิด สูงสุด $\left[\frac{I_t}{I_i}(2m\pi) = 0\right]$ สามารถหาได้โดยการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิง K หรือเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มแสง α ดังสมการ (2.24)



รูปที่ 2.18 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์ K สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน α ที่กำหนด

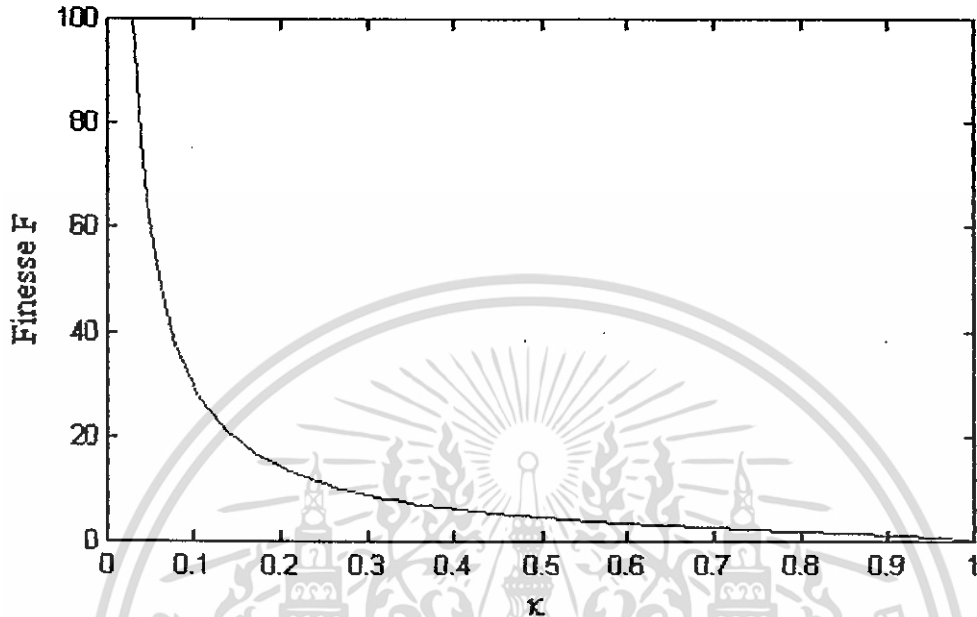
รูปที่ 2.18 สัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มแสง α ในอุดมคติที่ทำให้โพรงสั่นพ้องวงแหวนเดี่ยวมีอัตราส่วนเปิด-ปิด สูงสุด $\left[\frac{I_t}{I_i}(2m\pi) = 0 \right]$ ตัวอย่างเช่น วงแหวนที่มีรัศมี $R = 100 \mu\text{m}$ มีสัมประสิทธิ์ของการคับปลิงกำลัง $K = 0.5$ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความเข้มแสงของคัปเปลอร์ $D^2 = 0.85$ ($\gamma = 15\%$) จากกราฟจะได้ $\alpha = 0.0008 \mu\text{m}^{-1}$ จากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะได้สัมประสิทธิ์เฟนเนสส์ $F = 4.4$ สัมประสิทธิ์เฟนเนสส์ F ดังสมการ (2.29) ที่ทำให้อัตราส่วนเปิด-ปิด สูงสุด กำหนดได้เป็น

$$F_{x=y} = \frac{\pi y}{1-y^2} = \frac{\pi \cdot \sqrt{1-K}}{K} \quad (2.32)$$

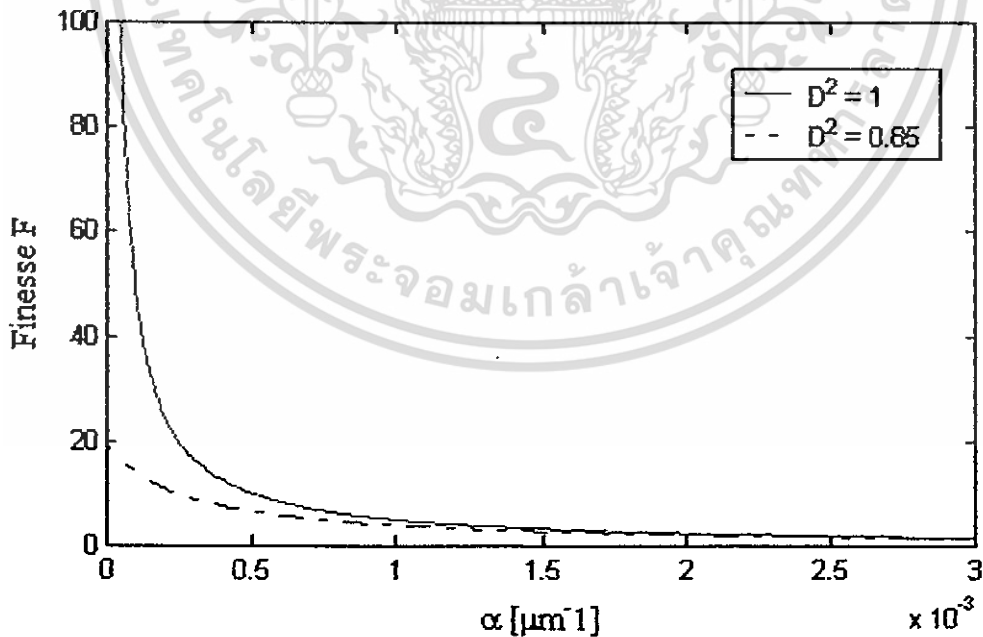
$$F_{y=x} = \frac{\pi x}{1-x^2} = \frac{\pi D \cdot e^{-\frac{\alpha}{2}L}}{1-D^2 \cdot e^{-\alpha L}} \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์ฟิเนสส์ F ที่ขึ้นอยู่กับค่า K ที่จุดซึ่งเกิดอัตราส่วนเปิด-ปิด สูงสุดดังสมการ (2.32) แสดงดังรูปที่ 2.19 และสัมประสิทธิ์ฟิเนสส์ F ที่ขึ้นอยู่กับค่า α ที่จุดซึ่งเกิดอัตราส่วนเปิด-ปิด สูงสุด ตามสมการ (2.33) สำหรับวงแหวนที่มีรัศมี $R = 100 \mu m$ แสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.19 ค่าฟิเนสส์ F เทียบกับค่า K ตรงจุดที่ทำให้เกิดอัตราส่วนเปิด-ปิด สูงสุด



รูปที่ 2.20 ค่าฟิเนสส์ F เทียบกับค่า α ตรงจุดที่ทำให้เกิดอัตราส่วนเปิด-ปิด สูงสุด

($R = 100 \mu m$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์ฟิเนสส์ F ที่มีค่าสูง (> 10) สามารถเกิดได้โดยให้สัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงของคัปเปลอร์ $K < 0.3$ หรือที่สัมประสิทธิ์การสูญเสียของคัปเปลอร์ $\gamma = 15\%$ สัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มแสงของวงแหวน $\alpha < 0.0001 \mu\text{m}^{-1}$

ระยะระหว่างค่าพีคเรโซแนนซ์ 2 ค่าคำนวณได้ดังนี้: ค่าคงที่เฟส (phase constant) ที่ตรงกับเฟส $\phi = 2 \cdot m \cdot \pi$ กำหนดให้เป็น k และค่าคงที่เฟสที่ตรงกับ $\phi = 2 \cdot (m+1) \cdot \pi$ กำหนดให้เป็น $k + \Delta k$ ความถี่เลื่อนค่า Δf (frequency shift) และความยาวคลื่นเลื่อนค่า $\Delta \lambda$ (wavelength shift) สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่เฟส Δk เมื่อ $\Delta f = \frac{c}{2\pi} \cdot \Delta k$ และ

$\Delta \lambda = -\left(\frac{\lambda^2}{2\pi}\right) \cdot \Delta k$ ช่องห่างเรโซแนนซ์ในเทอมของความถี่ f และความยาวคลื่น λ กำหนดได้ดังนี้

$$\Delta f = \frac{c}{n_{gr} \cdot L} \quad (2.34)$$

$$\Delta \lambda = \left| -\frac{\lambda^2}{n_{gr} \cdot L} \right| \quad (2.35)$$

เมื่อ n_{gr} คือ ดัชนีหักเหกลุ่ม (Group Refractive Index) ซึ่งนิยามได้เป็น

$$n_{gr} \equiv n_{eff} - \lambda \frac{dn_{eff}}{d\lambda} \quad (2.36)$$

ช่องห่างความถี่ระหว่างค่าพีคเรโซแนนซ์ 2 ค่าจะเรียกว่าช่วงปลอดสเปกตรัม FSR (Free Spectrum Range) โดยให้ $\delta \phi = \delta(k_n \cdot L) = \frac{2\pi}{F}$ จะได้ว่า FWHM $\delta \phi$ ในเทอมของความถี่และความยาวคลื่นที่ค่าพีคเรโซแนนซ์ กำหนดได้เป็น

$$\delta f = \frac{c}{F \cdot n_{ng} \cdot L} \quad (2.37)$$

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{F \cdot n_{ng} \cdot L} \quad (2.38)$$

สัมประสิทธิ์ฟิเนสส์ F สามารถคำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ของ FSR (Δf หรือ $\Delta\lambda$) และ FWHM (δf หรือ $\delta\lambda$) ของฟิลเตอร์โปรงสั้นพ้องและกำหนดได้ดังนี้

ในโดเมนของความถี่ :

$$\frac{\Delta f}{\delta f} = \frac{\frac{c}{n_{ng} \cdot L}}{\frac{c}{F \cdot n_{ng} \cdot L}} = F \quad (2.39)$$

ในโดเมนของความยาวคลื่น :

$$\frac{\Delta\lambda}{\delta\lambda} = \frac{\frac{\lambda^2}{n_{ng} \cdot L}}{\frac{\lambda^2}{F \cdot n_{ng} \cdot L}} = F \quad (2.40)$$

พารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่แสดงคุณลักษณะของโปรงสั้นพ้องวงแหวนคือแฟกเตอร์ Q (Q Factor) ซึ่งก็คือพลังงานตกค้าง (Stored Energy) หารด้วยกำลังสูญเสียต่อรอบเชิงแสง (Optical Cycle) มีรูปแบบคือ

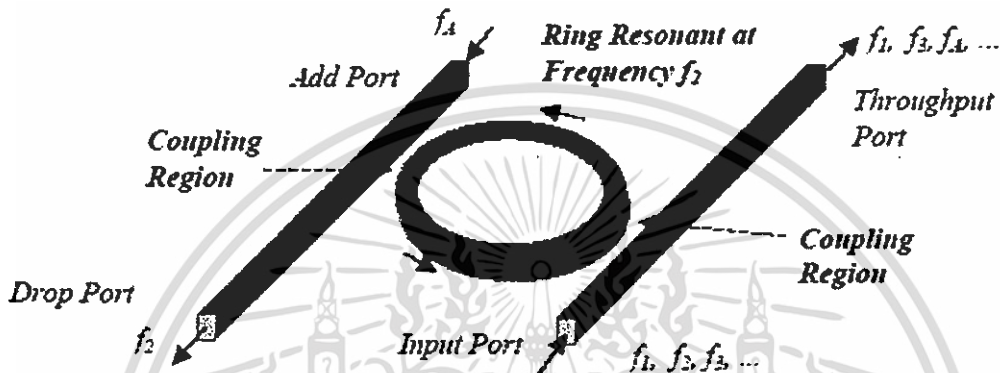
$$Q = \frac{f_0}{\delta f} = \frac{\lambda_0}{\delta\lambda} \quad (2.41)$$

แฟกเตอร์ Q คืออัตราส่วนของความถี่สัมบูรณ์ f_0 หรือความยาวคลื่นสัมบูรณ์ λ_0 ต่อแบนด์วิดท์ 3 dB (δf หรือ $\delta\lambda$) รูปร่างและแบนด์วิดท์ของผลตอบสนองตัวกรองโปรงสั้นพ้องหาได้โดยใช้แฟกเตอร์ Q ทั้งสัมประสิทธิ์ฟิเนสส์ F และแฟกเตอร์ Q นั้นมีความสำคัญทั้งสองค่าเมื่อตัวหนึ่งตัวใดต้องใช้เพื่อหาค่าทั้ง FSR (Δf หรือ $\Delta\lambda$) และแบนด์วิดท์ 3 dB (δf หรือ $\delta\lambda$) โดยทั้งสองค่ามีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\frac{Q}{F} = \frac{f_0}{\Delta f} = \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda} \quad (2.42)$$

2.11 ความเป็นมาของโพรงสั้นพ้องวงแหวน

การนำเสนอที่มีการนำโพรงสั้นพ้องวงแหวนสำหรับเป็นตัวกรองสัญญาณแถบผ่าน เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1969 โดย E. A. Marcatili [9] การออกแบบตัวกรองที่ใช้ครีโชนช่องสัญญาณ (Channel dropping filter) แสดงในรูปที่ 2.21 คุณสมบัติการส่งผ่านของท่อนำคลื่นที่ใช้ ประกอบด้วยท่อไดอิเล็กตริกที่มีภาคตัดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยมและท่อหุ้มด้วยชั้นไดอิเล็กตริกที่มีดัชนีหักเหต่ำกว่า [10]

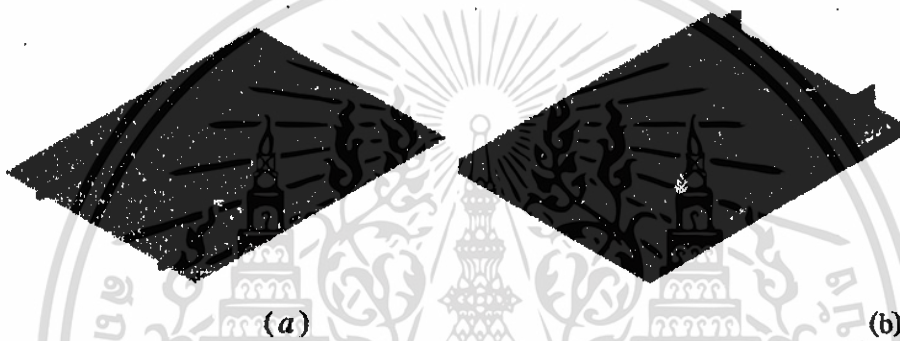


รูปที่ 2.21 โพรงสั้นพ้องวงแหวนที่เป็นตัวกรองครีโชนช่องสัญญาณ

สถาปัตยกรรมของตัวกรองสัญญาณแสงที่เป็นท่อนำคลื่นชนิดแบนราบ (Planar waveguide) ได้มีการสาธิตเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1996 [11] ซึ่งท่อนำคลื่นที่ประดิษฐ์ขึ้นทำจากวัสดุซิลิกา SiO_2 และโด้ปด้วยเจอร์มาเนียมเพื่อทำให้แก้วมีดัชนีหักเหตามต้องการ ในปีต่อมาตัวกรองโพรงสั้นพ้องวงแหวนเดี่ยวที่เป็นอุปกรณ์แบบพาสซีฟตามรูปที่ 2.21 ได้ทำการประดิษฐ์ด้วยระบบวัสดุ AlGaAs-GaAs [12], [13] และ Si-SiO_2 [14] และ $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ [15] รัศมีของวงแหวนที่ใช้อยู่ระหว่าง $5 \mu\text{m}$ และ $30 \mu\text{m}$ และช่วงปลอดสเปกตรัมที่เกิดขึ้นอยู่ระหว่าง 20 nm และ 30 nm ส่วนโพรงสั้นพ้องวงแหวนแบบพาสซีฟที่มีลักษณะเป็นเรซแทรค (Racetrack) ดังรูปที่ 3 ประดิษฐ์ขึ้นจากระบบวัสดุระหว่างธาตุหมู่ III และ V คือ GaInAsP [16] และ AlGaAs-GaAs [17] ความสามารถในการนำตัวกรองโพรงสั้นพ้องไปใช้งานมีข้อจำกัดเนื่องจากความสูญเสียจากการโค้งงอและการกระเจิงภายในโพรงสั้นพ้อง ความสูญเสียที่เกิดขึ้นสามารถที่จะชดเชยโดยใช้อุปกรณ์แบบแอกทีฟเพื่อใช้เป็นตัวขยาย

เมื่อไม่กี่ปีมานี้ อุปกรณ์ทางแสงที่เป็นโพรงสั้นพ้องระดับไมโครเมตร (Microresonator) ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างมาก เพราะมีศักยภาพสูงพอที่จะทำเป็นอุปกรณ์รวมแสง (Optical integrated device) ในอนาคตและประยุกต์ใช้เป็นวงจรรวมแสงขนาดใหญ่ (Optical very large scale integrated circuit, VLSI) [18] โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำเอาวัสดุสารกึ่งตัวนำที่เกิดจากการรวมธาตุเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมู่ III และ V เข้าด้วยกันมาทำเป็นอุปกรณ์ทางแสงแบบพาสซีฟที่มีรัศมีเล็กระดับไมโครเมตร ทั้งนี้ก็เพราะว่าวัสดุธาตุหมู่ III และ V มีค่าดัชนีหักเหมากกว่า 3 โพรงสันพ้องระดับไมโครเมตรสามารถที่จะสร้างได้ 2 รูปแบบ คือ การคัปปลิงในแนวตั้ง (Vertical coupling) โดยที่บัสท่อนำคลื่นอยู่คนละระนาบกับโพรงสันพ้อง (รูปที่ 2.22a) และการคัปปลิงทางด้านข้าง (Lateral coupling) ที่บัสท่อนำคลื่นอยู่ในระนาบเดียวกันกับโพรงสันพ้อง (รูปที่ 2.22b) วิธีการคัปปลิงทางด้านข้างเหมาะสำหรับคัปปลิงผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่างกันมากดังเช่นระหว่างวัสดุธาตุหมู่ III-V กับอากาศ ซึ่งต้องทำลวดลายด้วยวิธีลิโทกราฟีด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron-beam lithography) เพราะช่องว่างการคัปปลิงอยู่ระหว่าง 100-300 nm ในขณะที่การคัปปลิงในแนวตั้งสามารถทำลิโทกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (i-line lithography)



รูปที่ 2.22 (a) การคัปปลิงในแนวตั้ง (b) การคัปปลิงทางด้านข้าง

บทที่ 3

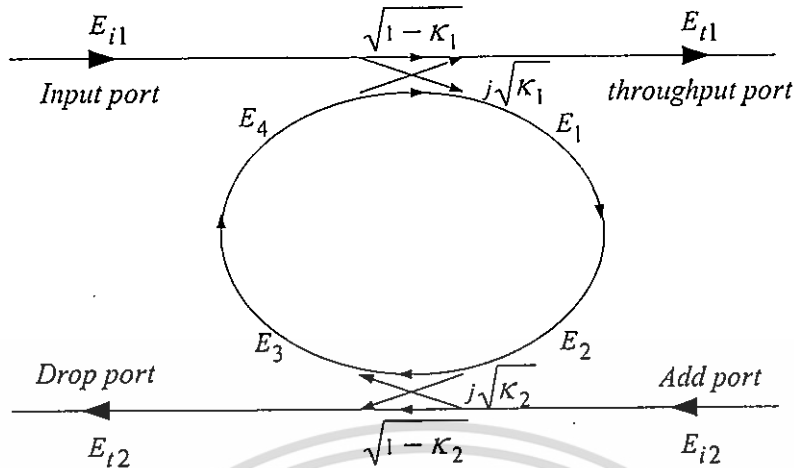
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

มัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น WDM เป็นเทคนิคที่ใช้ความยาวคลื่นแสงในการส่งผ่านสัญญาณข้อมูล ความยาวคลื่นแสงแต่ละค่าจะตรงกันกับชุดข้อมูลหนึ่ง และชุดข้อมูลที่แตกต่างกันเหล่านี้จะส่งผ่านเข้าไปในตัวกลางเดียวกัน อุปกรณ์ที่มีการกรอง (ครีโอบ) เอาสัญญาณหนึ่งสัญญาณหรือมากกว่าที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันออกจากกลุ่มของความยาวคลื่นที่เข้ามาทางอินพุทพอร์ตออกไปยังครีโอบพอร์ต และใส่ (แอด) ค่าความยาวคลื่นเดียวกันที่ออกทางครีโอบพอร์ตแต่เป็นข้อมูลข่าวสารที่แตกต่างกันเข้าทางแอดพอร์ต โดยเรียกอุปกรณ์นี้ว่าตัวมัลติเพลกซ์สัญญาณแอด/ครีโอบ (Optical Add/Drop Multiplexer, OADM) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญของระบบ WDM รูปที่ 2.14 เป็นตัวอย่างหนึ่งของอุปกรณ์นี้

ในบทนี้จะเป็นการอธิบายถึงการนำโพรงสั่นพ้องวงแหวนระดับไมโครเมตรมาประยุกต์ใช้เป็นตัวกรองสัญญาณ จากคุณลักษณะการส่งผ่านลอเรนซ์เซียน (Lorentzian Transmission Characteristic) ของโพรงสั่นพ้องวงแหวนวงเดียวจะนำไปสู่การเกิดผลตอบสนองของตัวกรองลักษณะคล้ายรูปสี่เหลี่ยม (Box-Like Filter Shape) ได้นั้น โดยใช้โพรงสั่นพ้องวงแหวนวง 2 วง 3 วงหรือหลายวง โดยจะหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และพารามิเตอร์ที่สำคัญทุกตัวที่ใช้อธิบายคุณลักษณะการส่งผ่านหรือการกรอง

3.1 โพรงสั่นพ้องวงแหวน 1 วง 2 คัปเปิลอร์

โพรงสั่นพ้องวงแหวนที่ทำหน้าที่เป็นตัวกรองสัญญาณแสงแอด/ครีโอบ ที่เป็นพื้นฐานที่สุดก็คือ โพรงสั่นพ้องวงแหวนวงเดียว (Single Ring Resonator, SRR) ที่มีท่อนำคลื่น 2 ท่อวางไว้ประชิดกันเพื่อใช้คัปปลิงสัญญาณแสงเข้าและออก แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 SRR ที่มีท่อนำคลื่น 2 ท่อ เพื่อประยุกต์ใช้เป็นตัวกรองสัญญาณแอดด์/ดริอป

จากรูปที่ 3.1 E_{i1} คือสนามไฟฟ้าเชิงซ้อนของคลื่นตกกระทบที่พอร์ตอินพุท (Input Port) E_{t1} และ E_{t2} คือสนามไฟฟ้าส่งผ่านและสนามไฟฟ้าสะท้อนที่พอร์ตส่งผ่าน (Throughput Port) และพอร์ตดริอป (Drop Port) ตามลำดับ และยังมี E_{i2} ที่เป็นสนามไฟฟ้าเชิงซ้อนของคลื่นตกกระทบที่พอร์ตแอดด์ (Add Port) E_1 และ E_2 เป็นสนามไฟฟ้าที่เดินทางอยู่ภายในครึ่งวงแหวนด้านขวา ส่วน E_3 และ E_4 เป็นสนามไฟฟ้าที่เดินทางอยู่ภายในครึ่งวงแหวนด้านซ้าย สำหรับคัปเปิลเลอร์ K_1 ความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าส่งผ่านและสนามไฟฟ้าอินพุทแสดงได้ดังนี้ [20]

$$E_{t1} = \sqrt{1-K_1} [j\sqrt{K_1}E_4 + \sqrt{1-K_1}E_{i1}] \quad (3.1)$$

$$E_1 = \sqrt{1-K_2} [j\sqrt{K_2}E_{i2} + \sqrt{1-K_2}E_4] \quad (3.2)$$

ตามทฤษฎีการส่งผ่านแสง (Light Transmission Theory) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า E_1

และ E_2 ที่เดินทางภายในครึ่งวงแหวนแรก $\frac{L}{2}$ คือ

$$E_2 = E_1 e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n \frac{L}{2}} \quad (3.3)$$

ในการทำงานเดียวกัน สำหรับคัปเปิลอร์ K_2 โดยกำหนดว่าไม่มีการป้อนสนามไฟฟ้า E_{i2} ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้า

$$E_{i2} = E_1 e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n \frac{L}{2}} \cdot j\sqrt{1-\gamma_2}\sqrt{K_2} \quad \text{ที่ } E_{i2} = 0 \quad (3.4)$$

$$E_3 = E_1 e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n \frac{L}{2}} \sqrt{1-\gamma_2}\sqrt{1-K_2} \quad (3.5)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า E_3 และ E_4 ที่เดินทางภายในครึ่งวงแหวนที่สอง คือ

$$E_4 = E_3 e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n \frac{L}{2}} \quad (3.6)$$

$$E_1 = \frac{E_{i1} j\sqrt{1-\gamma_1}\sqrt{K_1}}{1 - \sqrt{1-\gamma_1}\sqrt{1-K_1}\sqrt{1-\gamma_2}\sqrt{1-K_2} e^{-\frac{\alpha}{2}L - jk_n L}} \quad (3.7)$$

$$E_4 = \frac{E_{i1} j\sqrt{1-\gamma_1}\sqrt{K_1}}{1 - \sqrt{1-\gamma_1}\sqrt{1-K_1}\sqrt{1-\gamma_2}\sqrt{1-K_2} e^{-\frac{\alpha}{2}L - jk_n L}} \sqrt{1-\gamma_2}\sqrt{1-K_2} e^{-\frac{\alpha}{2}L - jk_n L} \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้สมการข้างบนจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของสนามไฟฟ้าที่พอร์ดส่งผ่าน ดังนี้

$$\begin{aligned} & - (1 - \gamma_1) \kappa_1 \sqrt{1 - \kappa_2} e^{-\frac{\alpha}{2} L - jk_n L} + \sqrt{1 - \gamma_1} \sqrt{1 - \kappa_1} \\ \frac{E_{t1}}{E_{i1}} &= \frac{- (1 - \gamma_1) (1 - \kappa_1) \sqrt{1 - \gamma_2} \sqrt{1 - \kappa_2} e^{-\frac{\alpha}{2} L - jk_n L}}{1 - \sqrt{1 - \gamma_1} \sqrt{1 - \kappa_1} \sqrt{1 - \gamma_2} \sqrt{1 - \kappa_2} e^{-\frac{\alpha}{2} L - jk_n L}} \quad (3.9) \\ &= \frac{- \sqrt{1 - \gamma_2} \sqrt{1 - \kappa_2} e^{-\frac{\alpha}{2} L - jk_n L} + \sqrt{1 - \gamma_1} \sqrt{1 - \kappa_1}}{1 - \sqrt{1 - \gamma_1} \sqrt{1 - \kappa_1} \sqrt{1 - \gamma_2} \sqrt{1 - \kappa_2} e^{-\frac{\alpha}{2} L - jk_n L}} \end{aligned}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของสนามไฟฟ้าที่พอร์ดครีป คือ

$$\begin{aligned} \frac{E_{t2}}{E_{i1}} &= \frac{- \sqrt{1 - \gamma_1} \sqrt{1 - \gamma_2} \sqrt{\kappa_1 \cdot \kappa_2} e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n \frac{L}{2}}}{1 - \sqrt{1 - \gamma_1} \sqrt{1 - \kappa_1} \sqrt{1 - \gamma_2} \sqrt{1 - \kappa_2} e^{-\frac{\alpha}{2} L - jk_n L}} \quad (3.10) \end{aligned}$$

สำหรับ SRR ที่มีท่อนำคลื่น 2 ท่อ ที่ใช้เป็นตัวกรองสัญญาณแอมป์/ครีป การหาฟังก์ชันถ่ายโอนของสนามไฟฟ้าทั้งที่พอร์ดส่งผ่านและพอร์ดครีปเทียบกับอินพุตแต่ละตัว ยังสามารถหาได้โดยใช้การวิเคราะห์การแปลงแบบ Z ซึ่งแสดงในภาคผนวก ก

สมการที่ (3.9) และ (3.10) นำมาหาความสัมพันธ์ความเข้มสนามไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\frac{I_{t1}}{I_{i1}} = \frac{\left| \frac{E_{t1}}{E_{i1}} \right|^2}{1 + (1 - \gamma_1)(1 - \kappa_1) \cdot (1 - \gamma_2)(1 - \kappa_2)e^{-\alpha L} - 2\sqrt{1 - \gamma_1}\sqrt{1 - \kappa_1} \cdot \sqrt{1 - \gamma_2}\sqrt{1 - \kappa_2}e^{-\frac{\alpha}{2}L} \cos(k_n L)} = \frac{1 - (1 - \gamma_1)\kappa_1 - 2\sqrt{1 - \gamma_1}\sqrt{1 - \kappa_1} \cdot \sqrt{1 - \gamma_2}\sqrt{1 - \kappa_2}e^{-\frac{\alpha}{2}L} \cos(k_n L) + (1 - \gamma_2)(1 - \kappa_2)e^{-\alpha L}}{1 + (1 - \gamma_1)(1 - \kappa_1) \cdot (1 - \gamma_2)(1 - \kappa_2)e^{-\alpha L} - 2\sqrt{1 - \gamma_1}\sqrt{1 - \kappa_1} \cdot \sqrt{1 - \gamma_2}\sqrt{1 - \kappa_2}e^{-\frac{\alpha}{2}L} \cos(k_n L)} \quad (3.11)$$

$$\frac{I_{t2}}{I_{i1}} = \frac{\left| \frac{E_{t2}}{E_{i1}} \right|^2}{1 + (1 - \gamma_1)(1 - \kappa_1) \cdot (1 - \gamma_2)(1 - \kappa_2)e^{-\alpha L} - 2\sqrt{1 - \gamma_1}\sqrt{1 - \kappa_1} \cdot \sqrt{1 - \gamma_2}\sqrt{1 - \kappa_2}e^{-\frac{\alpha}{2}L} \cos(k_n L)} = \frac{(1 - \gamma_1)(1 - \gamma_2) \cdot \kappa_1 \kappa_2 e^{-\frac{\alpha}{2}L}}{1 + (1 - \gamma_1)(1 - \kappa_1) \cdot (1 - \gamma_2)(1 - \kappa_2)e^{-\alpha L} - 2\sqrt{1 - \gamma_1}\sqrt{1 - \kappa_1} \cdot \sqrt{1 - \gamma_2}\sqrt{1 - \kappa_2}e^{-\frac{\alpha}{2}L} \cos(k_n L)} \quad (3.12)$$

เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณสามารถลดรูปสมการ (3.11) และ (3.12) โดยกำหนดให้ไม่มีการสูญเสียเนื่องจากการคัปปลิง ($\gamma_n = 0$) และกำหนดพารามิเตอร์ใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned} x &= \exp\left(-\frac{\alpha}{2}L\right) \\ y_1 &= \sqrt{1 - \kappa_1} \\ y_2 &= \sqrt{1 - \kappa_2} \end{aligned} \quad (3.13)$$

ดังนั้นความสัมพันธ์ของความเข้มแสงตามสมการ (3.11) และ (3.12) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{I_{t1}}{I_{i1}}(\phi) = \left| \frac{E_{t1}}{E_{i1}} \right|^2 = 1 - \frac{(1 - y_1^2) \cdot (1 - y_2^2 x^2)}{(1 - y_1 y_2 x)^2 + 4 y_1 y_2 x \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \quad (3.14)$$

$$\frac{I_{t2}}{I_{i1}}(\phi) = \left| \frac{E_{t2}}{E_{i1}} \right|^2 = \frac{(1 - y_1^2) \cdot (1 - y_2^2) \cdot x}{(1 - y_1 y_2 x)^2 + 4 y_1 y_2 x \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \quad (3.15)$$

แบนด์วิดท์ที่ -3 dB หรือ FWHM สำหรับตัวกรอง SRR ดังรูปที่ 3.1 กำหนดได้เป็น

$$\delta\phi = 2 \frac{1 - y_1 y_2 x}{\sqrt{y_1 y_2 x}} \quad (3.16)$$

สัมประสิทธิ์พีเนสส์ F สำหรับกรณีนี้กำหนดได้เป็น

$$F = \frac{2\pi}{\delta\phi} = \frac{\pi \sqrt{y_1 y_2 x}}{1 - y_1 y_2 x} \quad (3.17)$$

การส่งผ่านสูงสุดและต่ำสุดคำนวณได้ดังนี้

สำหรับช่อง พอร์ตส่งผ่าน :

$$T_{max} = \frac{(y_1 + y_2 x)^2}{(1 + y_1 y_2 x)^2} \quad (3.18)$$

$$T_{min} = \frac{(y_1 - y_2 x)^2}{(1 - y_1 y_2 x)^2} \quad (3.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับช่อง พอร์ตครีป :

$$T_{max} = \frac{(1 - y_1^2) \cdot (1 - y_2^2) \cdot x}{(1 - y_1 y_2 x)^2} \quad (3.20)$$

$$T_{min} = \frac{(1 - y_1^2) \cdot (1 - y_2^2) \cdot x}{(1 + y_1 y_2 x)^2} \quad (3.21)$$

อัตราส่วนเปิด-ปิด สามารถคำนวณโดยใช้สมการ (3.18) และ (3.21) ซึ่งมีค่าเป็น

$$\frac{T_{max}(\text{throughput port})}{T_{min}(\text{drop port})} = \frac{(y_1 + y_2 x)^2}{(1 - y_1^2) \cdot (1 - y_2^2) \cdot x} \quad (3.22)$$

อัตราส่วนเปิด-ปิดในหน่วยเดซิเบล dB กรณีที่ $K_1 = K_2 = K$ และ $\alpha = 0$ กำหนดได้ดังนี้

$$10 \log \left(\frac{4(1 - K)}{K^2} \right) \text{ (dB)} \quad (3.23)$$

ความเข้มแสงเอาท์พุท I_{l1} ที่พอร์ตส่งผ่านดังสมการที่ (3.14) จะมีค่าเป็นศูนย์ที่จุดซึ่งเกิดเรโซแนนซ์ ($k_n L = 2m\pi$) สิ่งนี้ชี้ให้เห็นว่าความยาวคลื่นที่เรโซแนนซ์กับโพรงสั้นพ้องวงแหวนจะออกมาทางพอร์ตครีปทั้งหมด กรณีที่คัปเปิลเลอร์ทั้งสองสมมาตรกันคือ $K_1 = K_2$ และ $\alpha = 0$ ค่า $\alpha = 0$ สามารถทำได้โดยใส่ตัวขยายสารกึ่งตัวนำ SOA (Semiconductor Optical Amplifier) เข้าไปในโพรงสั้นพ้องวงแหวนเพื่อชดเชยความสูญเสียที่นำคลื่น ในโพรงสั้นพ้องวงแหวนแบบพาสซีฟ (Passive Fiber Ring Resonator) ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มแสงของวงแหวน α จะกำหนดให้มีค่าคงที่ ดังนั้นความเป็นไปได้ที่เอาท์พุทจะมีความเข้มต่ำสุด $\left(\frac{I_{l1}}{I_{i1}} = 0 \right)$ ที่จุดเกิดเรโซแนนซ์ของสเปกตรัม

การส่งผ่าน I_{t1} ที่พอร์ตส่งผ่าน ทำได้โดยการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิง K_1, K_2 ในสมการ (3.9) ใหม่ดังนี้

$$\frac{E_{t1}}{E_{i1} (k_n L = 2\pi m)} = \frac{-\sqrt{1-K_2} e^{-\frac{\alpha}{2}L} + \sqrt{1-K_1}}{1 - \sqrt{1-K_1} \sqrt{1-K_2} e^{-\frac{\alpha}{2}L}} \equiv 0$$

$$\Rightarrow -\sqrt{1-K_2} e^{-\frac{\alpha}{2}L} + \sqrt{1-K_1} = 0 \quad (3.24)$$

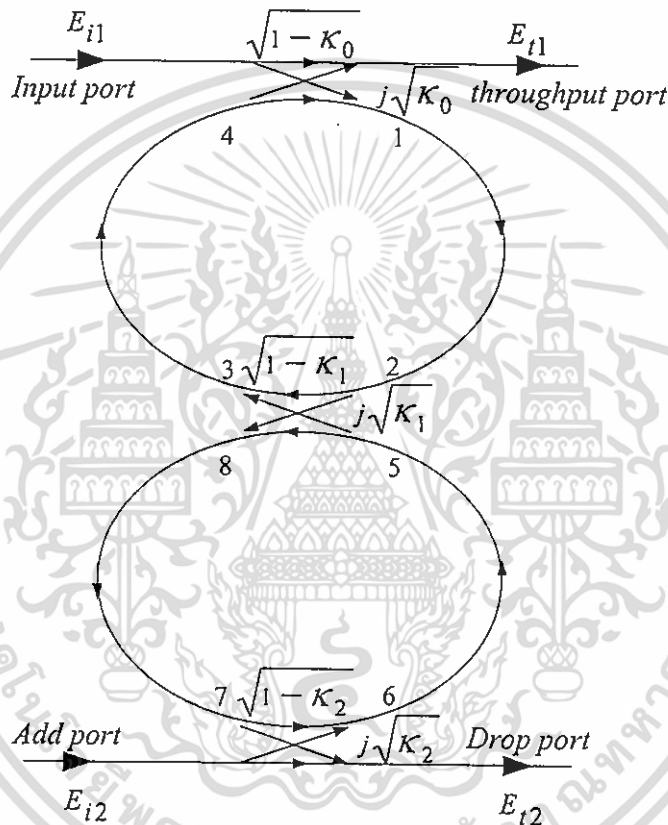
$$\Rightarrow e^{-\frac{\alpha}{2}L} = \sqrt{\frac{1-K_1}{1-K_2}}$$

ลักษณะโครงร่างโพรงสี่เหลี่ยมวงแหวนรูปแบบอื่นๆ ที่มี K_1 และ K_2 ก็สามารถคำนวณได้จากสมการนี้ ตัวอย่างเช่น ถ้าสัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มแสง α ของโพรงสี่เหลี่ยมที่มีโครงร่างดังรูปที่ 3.1 มีค่าเป็น $\alpha = 0.0005 \mu\text{m}^{-1}$, $R = 100 \mu\text{m}$ และเลือก K_2 ให้มีค่าเป็น $K_2 = 0.2$ ดังนั้นค่า K_1 ที่คำนวณได้จากสมการ (3.24) มีค่าเป็น $K_1 = 0.42$ ในการกำหนดให้สัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงทั้ง K_1 และ K_2 มีค่าต่างกัน เมื่อเกิดเรโซแนนซ์จะทำให้เอาต์พุตการส่งผ่านที่พอร์ตส่งผ่านมีค่าต่ำสุดหรือที่พอร์ตดรออปมีค่าสูงสุด

การทำให้เห็นได้จริงในทางปฏิบัตินั้นยากมากเพราะว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มแสง α และสัมประสิทธิ์การคัปปลิง K_1, K_2 ไม่สามารถวัดให้มีความแม่นยำสูงได้ ดังนั้นคำตอบหนึ่งที่เป็นไปได้คือใช้คัปเปลอร์ที่ปรับค่าได้ ในการออกแบบเพื่อให้ได้คุณลักษณะการส่งผ่านของตัวกรองลักษณะคล้ายรูปสี่เหลี่ยมจะใช้โพรงสี่เหลี่ยมวงแหวน 2 วงหรือ 3 วง ซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป

3.2 โพรงสั้นพ้องวงแหวน 2 วง 3 คัปเปิลอร์

แผนภาพโครงร่างของโพรงสั้นพ้องวงแหวน 2 วง 3 คัปเปิลอร์ (Double Ring Resonator, DRR) ที่แสดงดังรูปที่ 3.3 สนามไฟฟ้าอินพุต E_{i1} จะถูกส่งเข้าทางพอร์ตอินพุต สนามไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จะเกิดขึ้นที่พอร์ตส่งผ่าน E_{t1} หรือที่พอร์ตครีโปก E_{t2} สนามไฟฟ้าอินพุตอีกพอร์ตหนึ่ง E_{i2} สามารถป้อนเข้าได้ทางพอร์ตแอดของอุปกรณ์โพรงสั้นพ้อง



รูปที่ 3.2 โพรงสั้นพ้องวงแหวน 2 วง 3 คัปเปิลอร์ที่ใช้เป็นตัวกรองสัญญาณแอด/ครีโปก

เพื่อให้ง่ายในการอธิบายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงทำการแบ่งโครงร่างวงแหวนโพรงสั้นพ้องออกเป็นพอร์ตย่อยๆ (พอร์ต 1 - พอร์ต 8) ดังรูปที่ 3.2 สนามไฟฟ้าคลื่นแสงที่เดินทางในระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวแต่ละวงแหวนจะอธิบายด้วยสมการที่ (2.21) สนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าทางพอร์ตอินพุต คือ E_{i1} สนามไฟฟ้าเอาต์พุต E_{t1} และ E_{t2} ที่พอร์ตส่งผ่านและพอร์ตครีโปก ได้มาโดยการหาสนามไฟฟ้าที่พอร์ตต่างๆ นั่นคือ E_1, E_2, \dots, E_8 โดยใช้ทฤษฎีการส่งผ่านแสง

เช่นเดียวกับที่ใช้อธิบายในโครงสร้างห้องวงแหวน 1 วง 2 คัปเปิลอร์ จากรูปกำหนดให้วงแหวนโครงสร้างห้องทั้งสองวงมีความยาวเท่ากันเป็น L สัมประสิทธิ์การคัปปลิงและสัมประสิทธิ์การสูญเสียคัปปลิงของคัปเปิลอร์ทั้งสามเป็น K_0, K_1, K_2 และ $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2$ ตามลำดับ

สำหรับคัปเปิลอร์ K_0 ความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าส่งผ่านและสนามไฟฟ้าอินพุตคือ

$$E_{i1} = \sqrt{1 - \gamma_0} [j\sqrt{K_0}E_4 + \sqrt{1 - K_0}E_{i1}] \quad (3.25)$$

$$E_1 = \sqrt{1 - \gamma_0} [j\sqrt{K_0}E_{i1} + \sqrt{1 - K_0}E_4] \quad (3.26)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า E_1 และ E_2 ที่ด้านปลายของครึ่งวงแหวนแรกทางขวา $\frac{L}{2}$ คือ

$$E_2 = E_1 e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n \frac{L}{2}} \quad (3.27)$$

สำหรับคัปเปิลอร์ K_1 จะได้ความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าดังนี้

$$E_3 = \sqrt{1 - \gamma_1} [j\sqrt{K_1}E_5 + \sqrt{1 - K_1}E_2] \quad (3.28)$$

$$E_8 = \sqrt{1 - \gamma_1} [j\sqrt{K_1}E_2 + \sqrt{1 - K_1}E_5] \quad (3.29)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า E_3 และ E_4 ที่เดินทางภายในครึ่งวงแหวนแรกทางซ้าย คือ

$$E_4 = E_3 e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n \frac{L}{2}} \quad (3.30)$$

นอกจากนี้ที่คัปเปิลอร์ K_1 สนามไฟฟ้าเอาท์พุทที่พอร์ต 8 ยังส่งผ่านในวงแหวนต่อไปยังพอร์ต 7 และมีความสัมพันธ์

$$E_7 = E_8 e^{-\frac{\alpha L}{2}} e^{-jk_n \frac{L}{2}} \quad (3.31)$$

ที่คัปเปิลเลอร์ K_2

$$E_6 = \sqrt{1 - \gamma_2} \left[j\sqrt{K_2} E_{i2} + \sqrt{1 - K_2} E_7 \right] \quad (3.32)$$

$$E_{i2} = \sqrt{1 - \gamma_2} \left[j\sqrt{K_2} E_7 + \sqrt{1 - K_2} E_{i2} \right] \quad (3.33)$$

$$E_5 = E_6 e^{-\frac{\alpha L}{2}} e^{-jk_n \frac{L}{2}} \quad (3.34)$$

โดยใช้สมการข้างบนและไม่คำนึงถึงการสูญเสียของการคัปปลิง จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของสนามไฟฟ้าที่พอร์ตส่งผ่านและพอร์ตครีอปเทียบกับอินพุตแต่ละตัว ดังนี้

พอร์ตส่งผ่าน :

$$\begin{aligned} E_{t1} &= \frac{-\sqrt{1 - K_0} + \sqrt{1 - K_1} e^{-\frac{\alpha}{2}L - jk_n L} + \sqrt{1 - K_0} \sqrt{1 - K_1} \sqrt{1 - K_2} e^{-\frac{\alpha}{2}L - jk_n L} - \sqrt{1 - K_2} e^{-\alpha L - j2k_n L}}{1 - \sqrt{1 - K_0} \sqrt{1 - K_1} e^{-\frac{\alpha}{2}L - jk_n L} - \sqrt{1 - K_1} \sqrt{1 - K_2} e^{-\frac{\alpha}{2}L - jk_n L} + \sqrt{1 - K_0} \sqrt{1 - K_2} e^{-\alpha L - j2k_n L}} \\ E_{i1} & \end{aligned} \quad (3.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{E_{i1}}{E_{i2}} = \frac{-j\sqrt{K_0 K_1 K_2} e^{-\frac{\alpha}{2}L - jk_n L}}{1 - \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_1} e^{-\frac{\alpha}{2}L - jk_n L} - \sqrt{1-K_1}\sqrt{1-K_2} e^{-\frac{\alpha}{2}L - jk_n L} + \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_2} e^{-\alpha L - j2k_n L}}$$

(3.36)

พอร์ตครีอ์ป :

$$\frac{E_{i2}}{E_{i1}} = \frac{-j\sqrt{K_0 K_1 K_2} e^{-\frac{\alpha}{2}L - jk_n L}}{1 - \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_1} e^{-\frac{\alpha}{2}L - jk_n L} - \sqrt{1-K_1}\sqrt{1-K_2} e^{-\frac{\alpha}{2}L - jk_n L} + \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_2} e^{-\alpha L - j2k_n L}} = \frac{E_{i1}}{E_{i2}}$$

(3.37)

$$\frac{E_{i2}}{E_{i2}} = \frac{\sqrt{1-K_2} - \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_1}\sqrt{1-K_2} e^{-\frac{\alpha}{2}L - jk_n L}}{-\sqrt{1-K_1} e^{-\frac{\alpha}{2}L - jk_n L} + \sqrt{1-K_0} e^{-\alpha L - j2k_n L}}$$

$$\frac{E_{i2}}{E_{i2}} = \frac{1 - \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_1} e^{-\frac{\alpha}{2}L - jk_n L} - \sqrt{1-K_1}\sqrt{1-K_2} e^{-\frac{\alpha}{2}L - jk_n L} + \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_2} e^{-\alpha L - j2k_n L}}{1 - \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_1} e^{-\frac{\alpha}{2}L - jk_n L} - \sqrt{1-K_1}\sqrt{1-K_2} e^{-\frac{\alpha}{2}L - jk_n L} + \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_2} e^{-\alpha L - j2k_n L}}$$

(3.38)

สำหรับ DRR ที่ใช้เป็นตัวกรองสัญญาณแเอ็ด/ครีอ์ป ที่หาฟังก์ชันถ่ายโอนของสนามไฟฟ้าโดยใช้การวิเคราะห์การแปลงแบบ Z แสดงในภาคผนวก ข

ฟังก์ชันถ่ายโอนที่พอร์ตส่งผ่าน $\frac{E_{t1}}{E_{i1}}(\phi_1, \phi_2)$ และที่พอร์ตครีอป $\frac{E_{t2}}{E_{i1}}(\phi_1, \phi_2)$ หาได้

จากพารามิเตอร์เหล่านี้คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มแสงที่สัมพันธ์กันของทั้งสองวงแหวนซึ่งแทนด้วย $\alpha_{ring1}, \alpha_{ring2}$ ตามลำดับ ความยาวรอบวงแหวนทั้งสองแทนด้วย L_{ring1} และ L_{ring2} และเทอมเฟสของแต่ละวงแหวนคือ ϕ_1, ϕ_2 ($k_n L_{ring1}, k_n L_{ring2}$) พิจารณากรณีที่ไม่มีอินพุตเข้ามาทางพอร์ตแอด ($E_{i2} = 0$) ฟังก์ชันถ่ายโอนที่พอร์ตครีอปแสดงได้ดังนี้

$$\frac{E_{t1}}{E_{i1}} = \frac{\sqrt{1-K_0K_0e} \frac{\alpha_{ring1} L_{ring1} - j\phi_1}{2} \left[\sqrt{1-K_2e} \frac{\alpha_{ring2} L_{ring2} - j\phi_2}{2} - \sqrt{1-K_1} \right]}{1 - \sqrt{1-K_0} \sqrt{1-K_1} e \frac{\alpha_{ring1} L_{ring1} - j\phi_1}{2} - \sqrt{1-K_1} \sqrt{1-K_2} e \frac{\alpha_{ring2} L_{ring2} - j\phi_2}{2} + \sqrt{1-K_0} \sqrt{1-K_2} e \frac{\alpha_{ring1} L_{ring1} - j\phi_1}{2} e \frac{\alpha_{ring2} L_{ring2} - j\phi_2}{2}}$$

(3.39)

$$\frac{E_{t2}}{E_{i1}} = \frac{-j\sqrt{K_0K_1K_2} e \frac{\alpha_{ring1} L_{ring1}}{2} \frac{\phi_1}{2} e \frac{\alpha_{ring2} L_{ring2}}{2} \frac{\phi_2}{2}}{1 - \sqrt{1-K_0} \sqrt{1-K_1} e \frac{\alpha_{ring1} L_{ring1} - j\phi_1}{2} - \sqrt{1-K_1} \sqrt{1-K_2} e \frac{\alpha_{ring2} L_{ring2} - j\phi_2}{2} + \sqrt{1-K_0} \sqrt{1-K_2} e \frac{\alpha_{ring1} L_{ring1} - j\phi_1}{2} e \frac{\alpha_{ring2} L_{ring2} - j\phi_2}{2}}$$

(3.40)

ยอดแบน (Flat Top) ของสเปกตรัมการตอบสนองการส่งผ่านของตัวกรองที่พอร์ตครีอป อธิบายด้วยค่าตัวประกอบพื้นฐาน (Shape Factor) [8], [21] ซึ่งนิยามได้ดังนี้

$$\text{shape factor} = \frac{-1 \text{ dB bandwidth}}{-10 \text{ dB bandwidth}} = \left| \frac{\frac{\phi_{E_{i2}=-1\text{dB}}}{E_{i1}} - 2\pi}{\frac{\phi_{E_{i2}=-10\text{dB}}}{E_{i1}} - 2\pi} \right| \quad (3.41)$$

นอกจากนี้ค่าตัวประกอบสัมฐานยังสามารถนิยามได้เป็นอัตราส่วนแบนด์วิดท์ที่ -5 dB ต่อแบนด์วิดท์ที่ -15 dB และไม่มีหน่วย ค่าตัวประกอบสัมฐานและอัตราส่วนเปิด-ปิดเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญในการอธิบายพฤติกรรมของตัวกรองที่ใช้โพรงสั่นพ้องวงแหวนที่มีการคับปลิงกันหลายๆวง วัตถุประสงค์ก็เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองของตัวกรองลักษณะคล้ายรูปสี่เหลี่ยม ตัวอย่างเช่นรูปร่างผลตอบสนองของตัวกรอง SRR ดังรูปที่ 4.7 ที่แสดงด้วยฟังก์ชันลอเรนต์เซียน ค่าตัวประกอบสัมฐานที่พอร์ตครีป มีค่าน้อยประมาณ 0.16 และไม่เห็นลักษณะยอดแบน

DRR กรณีที่ไม่มีความสูญเสียในท่อนำคลื่น ($\alpha_{ring1} = \alpha_{ring2} = 0$) โดยมีค่าคับปลิง $K_0 = K_2$, $L_{ring1} = L_{ring2}$ และ $\phi_1 = \phi_2 = (2m+1)\pi$ อัตราส่วนเปิด-ปิด คำนวณได้เป็น

$$\begin{aligned} & 10 \log \left(\frac{I_{i1}}{I_{i1} \phi_1 = \pi(2m+1)} \right) - 10 \log \left(\frac{I_{i2}}{I_{i1} \phi_2 = \pi(2m+1)} \right) = 10 \log \left(\left| \frac{E_{t1}}{E_{i1}} \right|^2 \right) - 10 \log \left(\left| \frac{E_{t2}}{E_{i1}} \right|^2 \right) \\ & = 20 \log \left(\frac{2\sqrt{1-K_0} + \sqrt{1-K_1}(2-K_0)}{K_0 \sqrt{K_1}} \right) \text{ dB} \end{aligned} \quad (3.42)$$

การส่งผ่านต่ำสุดขณะเกิดเรโซแนนซ์ที่พอร์ตส่งผ่าน หาได้จากสมการที่ (3.39)

$$\frac{E_{t1}}{E_{i1}} (\phi_1 = \phi_2 = 2m\pi) = 0 \quad (3.43)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงที่อยู่ตรงกลาง K_1 ของ DRR สามารถคำนวณโดยใช้สมการ (3.43) และกำหนดให้ $\alpha_{ring1} = \alpha_{ring2} = 0$, $K_o = K_2$ และ $L_{ring1} = L_{ring2}$ จะได้

$$K_1 = 1 - \left(\frac{2\sqrt{1-K_o}}{K_o - 2} \right)^2 = \frac{K_o^2}{(K_o - 2)^2} \quad (3.44)$$

การส่งผ่านที่พอร์ตครีโปกขณะเรโซแนนซ์สำหรับ DRR ดังรูปที่ 3.2 จะมีค่าเป็น 1 ซึ่งกำหนดให้ไม่มีการสูญเสียภายในวงแหวน ($\alpha_{ring1} = \alpha_{ring2} = 0$):

$$\frac{E_{t2}}{E_{i1}}(\phi_1 = \phi_2 = 2m\pi) = 1 \quad (3.45)$$

มีผลตอบสนองการกรอง 2 รูปแบบที่สามารถแสดงให้เห็นได้ด้วย DRR คือ

- 1) ผลตอบสนองของตัวกรองลอเรนซ์เซียน (Lorentzian Filter Response) และ
- 2) ผลตอบสนองของตัวกรองลักษณะคล้ายรูปสี่เหลี่ยม (Box-Like Filter Response)

สำหรับผลตอบสนองของตัวกรองลอเรนซ์เซียน สัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงที่ทำให้ได้การส่งผ่านที่พอร์ตส่งผ่านมีค่าต่ำสุดและการส่งผ่านมีค่าสูงสุดที่พอร์ตครีโปกขณะเกิดเรโซแนนซ์ คำนวณได้จากสมการที่ (3.44) สัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงสำหรับผลตอบสนองของตัวกรองลักษณะคล้ายรูปสี่เหลี่ยมที่ตัวประกอบสัญญาณและอัตราส่วนเปิด-ปิดที่ถูกกำหนด หาค่าโดยใช้สมการที่ (3.41) และ (3.42) ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายค่า ตัวอย่างเช่น DRR (รูปที่ 4.8) ที่มี $\alpha_{ring1} = \alpha_{ring2} = 0$, $K_o = K_2 = 0.5$ และ $L_{ring1} = L_{ring2}$ เพื่อให้ได้รูปร่างแถบผ่านที่คล้ายรูปสี่เหลี่ยม สัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงตัวที่อยู่ตรงกลาง อยู่ในช่วง $K_1 = 0.125 - 0.14$ ซึ่งจะได้ตัวประกอบสัญญาณที่พอร์ตครีโปกมีค่าเป็น 0.42 และอัตราส่วนเปิดปิดมีค่ามากกว่า 20 dB

สำหรับตัวกรอง DRR ยังสามารถออกแบบให้มีช่องห่างช่องสัญญาณหรือ FSR ที่ขยายกว้างขึ้นได้ ซึ่งทำได้โดยการเลือกรัศมีวงแหวนของ DRR ให้มีค่าต่างกัน ($L_1 \neq L_2$) ในกรณีที่ DRR มีรัศมีวงแหวนต่างกันแสงที่ผ่านทะลุเข้าไปใน DRR และจะออกมาทางพอร์ตครีโปกได้ก็ต่อเมื่อสภาวะการเกิดเรโซแนนซ์ ของวงแหวนทั้งสองต้องสอดคล้องกัน FSR ของ DRR ที่มีรัศมีวงแหวนต่างกันแสงได้ดังนี้

$$FSR = N \cdot FSR_1 = M \cdot FSR_2 \quad (3.46)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

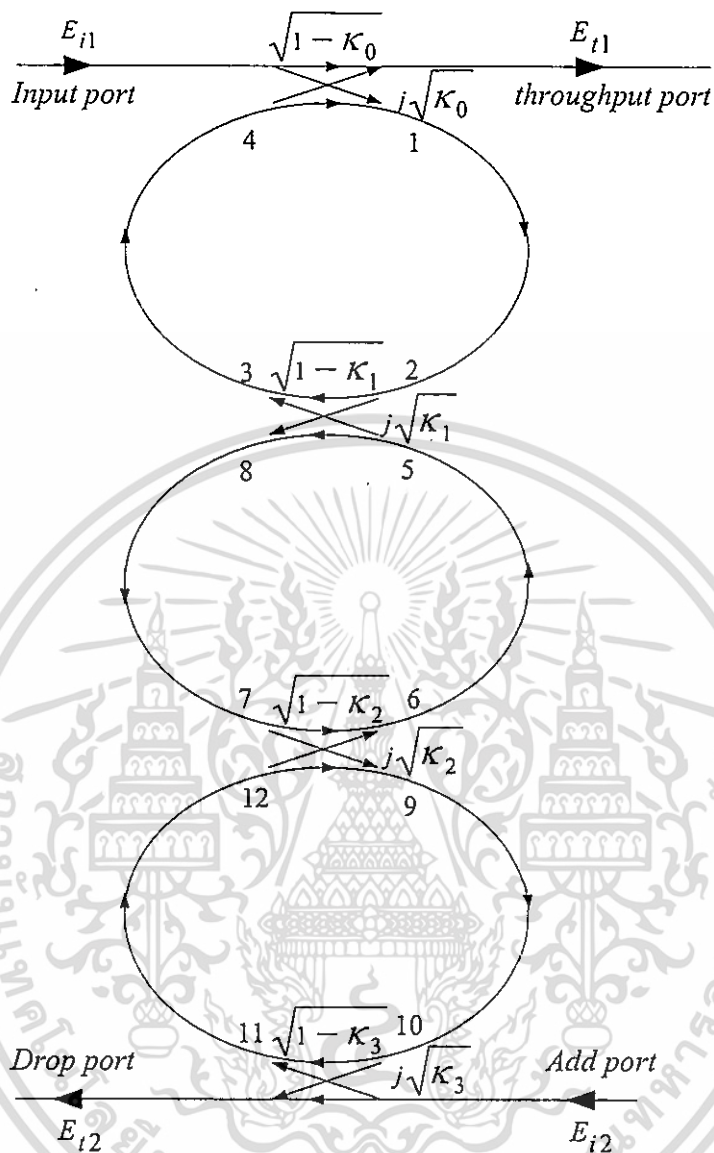
$$FSR = |M - N| \cdot \frac{FSR_1 \cdot FSR_2}{|FSR_1 - FSR_2|} \quad (3.47)$$

เมื่อ M และ N เป็นเลขจำนวนเต็ม

3.3 โครงสร้างโพรงวงแหวน 3 วง 4 คัปเปิลอร์

โครงสร้างโพรงสี่เหลี่ยมวงแหวน 3 วง (Triple Ring Resonator, TRR) ที่ใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังรูปที่ 3.3 การส่งผ่านสนามไฟฟ้าแสงจากพอร์ตหนึ่งไปสู่อีกพอร์ตหนึ่งหาได้ในทำนองเดียวกับที่อธิบายในหัวข้อ 3.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนของสนามไฟฟ้าที่ใช้การวิเคราะห์การแปลงแบบ Z แสดงในภาคผนวก ค โดยไม่ต้องคำนึงถึงความสูญเสียของการคัปปลิงของคัปเปิลอร์แต่ละตัว

และกำหนดให้วงแหวนมีความยาวเท่ากันคือ L , $y_n = \sqrt{1 - K_n}$, $x = e^{-\frac{\alpha}{2}L}$, $\phi = k_n L$



รูปที่ 3.3 โครงสร้างห้องวงแหวน 3 วง 4 คัปเปิลอร์ที่ใช้เป็นตัวกรองสัญญาณแฉีก/ครีโอป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของสนามไฟฟ้าที่พอร์ตส่งผ่านและพอร์ตรีอัมเทียบกับอินพุตแต่ละตัว ดังนี้
 พอร์ตส่งผ่าน :

$$\frac{E_{t1}}{E_{i1}} = \frac{\left(\begin{aligned} &y_0 - y_1 x e^{-j\phi} - y_0 y_1 y_2 x e^{-j\phi} + y_2 x^2 e^{-j2\phi} - y_0 y_2 y_3 x e^{-j\phi} \\ &+ y_1 y_2 y_3 x^2 e^{-j2\phi} + y_0 y_1 y_3 x^2 e^{-j2\phi} - y_3 x^3 e^{-j3\phi} \end{aligned} \right)}{\left(\begin{aligned} &1 - y_0 y_1 x e^{-j\phi} - y_1 y_2 x e^{-j\phi} + y_0 y_2 x^2 e^{-j2\phi} - y_2 y_3 x e^{-j\phi} \\ &+ y_0 y_1 y_2 y_3 x^2 e^{-j2\phi} + y_1 y_3 x^2 e^{-j2\phi} - y_0 y_3 x^3 e^{-j3\phi} \end{aligned} \right)} \quad (3.48)$$

$$\frac{E_{t1}}{E_{i2}} = \frac{x^{3/2} e^{-j\frac{3\phi}{2}} \sqrt{K_0 K_1 K_2 K_3}}{\left(\begin{aligned} &1 - y_0 y_1 x e^{-j\phi} - y_1 y_2 x e^{-j\phi} + y_0 y_2 x^2 e^{-j2\phi} - y_2 y_3 x e^{-j\phi} \\ &+ y_0 y_1 y_2 y_3 x^2 e^{-j2\phi} + y_1 y_3 x^2 e^{-j2\phi} - y_0 y_3 x^3 e^{-j3\phi} \end{aligned} \right)} \quad (3.49)$$

พอร์ตรีอัม :

$$\frac{E_{t2}}{E_{i1}} = \frac{x^{3/2} e^{-j\frac{3\phi}{2}} \sqrt{K_0 K_1 K_2 K_3}}{\left(\begin{aligned} &1 - y_0 y_1 x e^{-j\phi} - y_1 y_2 x e^{-j\phi} + y_0 y_2 x^2 e^{-j2\phi} - y_2 y_3 x e^{-j\phi} \\ &+ y_0 y_1 y_2 y_3 x^2 e^{-j2\phi} + y_1 y_3 x^2 e^{-j2\phi} - y_0 y_3 x^3 e^{-j3\phi} \end{aligned} \right)} = \frac{E_{t1}}{E_{i2}} \quad (3.50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{E_{i2}}{E_{i2}} = \frac{\begin{pmatrix} y_3 - y_0 y_1 y_3 x e^{-j\phi} - y_1 y_2 y_3 x e^{-j\phi} + y_0 y_2 y_3 x^2 e^{-j2\phi} \\ - y_2 x e^{-j\phi} + y_0 y_1 y_2 x^2 e^{-j2\phi} + y_1 x^2 e^{-j2\phi} - y_0 x^3 e^{-j3\phi} \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} 1 - y_0 y_1 x e^{-j\phi} - y_1 y_2 x e^{-j\phi} + y_0 y_2 x^2 e^{-j2\phi} - y_2 y_3 x e^{-j\phi} \\ + y_0 y_1 y_2 y_3 x^2 e^{-j2\phi} + y_1 y_3 x^2 e^{-j2\phi} - y_0 y_3 x^3 e^{-j3\phi} \end{pmatrix}} \quad (3.51)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนความเข้มสนามของ TRR ทำได้โดยนอมัลไลซ์สมการที่ (3.48-3.51)

การออกแบบตัวกรอง TRR ให้เกิดผลตอบสนองการส่งผ่านที่มียอดแบนหรือคล้ายรูปสี่เหลี่ยมคือจะใช้การเพิ่มค่าตัวประกอบฐานและอัตราส่วนเปิด-ปิดของพอร์ตส่งผ่านและพอร์ตครี๊ป การออกแบบตัวกรอง TRR จะกระทำด้วยวิธีที่คล้ายๆกับการออกแบบตัวกรอง DRR โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิง K_{0-3} ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าตัวประกอบฐานและอัตราส่วนเปิด-ปิดที่กำหนด สามารถมีได้หลายค่าเช่นเดียวกัน เพื่อให้ง่ายในการคำนวณจะกำหนดให้สัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงมีความสมมาตรกันคือ $K_0 = K_3$ สำหรับคัปเปิลอร์ด้านนอกและ $K_1 = K_2$ สำหรับคัปเปิลอร์ตรงกลาง ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวกรองทั้ง SRR, DRR และ TRR เพื่อคุณลักษณะการส่งผ่านโดยการเปลี่ยนพารามิเตอร์โพรงสั้นพ้องจะกล่าวถึงในบทที่ 4

ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์

ในบทนี้จะเป็นการจำลองผลการตอบสนองของตัวกรองสัญญาณแฉ็ค/ครีโอปที่ใช้โพรง
 สันห้องวงแหวนระดับไมโครเมตร ทั้งสามโครงร่างคือ SRR, DRR และ TRR ที่เชื่อมต่อในลักษณะ
 อันคืบกัน โดยทำการจำลองผลการตอบสนองการกรองจากฟังก์ชันถ่ายโอนของความเข้มแสงทั้งที่
 พอร์ตส่งผ่านและพอร์ตครีโอปเทียบกับพอร์ตอินพุท ดังที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 ในการออกแบบ
 เพื่อให้ได้รูปร่างคุณลักษณะการส่งผ่านของตัวกรองตามที่ต้องการ จะพิจารณาจากลักษณะรูปร่าง
 และพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญคือ 1) รูปร่างผลตอบสนองตัวกรองที่เป็นรูปสี่เหลี่ยม 2) แบนด์วิดท์ที่
 -3 dB หรือ FWHM 3) อัตราส่วนเปิด-ปิด 4) ตัวประกอบสัณฐาน 5) ช่วงห่างของช่องสัญญาณ
 หรือ FSR 6) สัมประสิทธิ์พีเนสส์ หรือ F 7) ตัวประกอบ Q 8) การลดทอนกำลังแสง
 จากคุณลักษณะดังกล่าวสามารถแสดงให้เห็นได้โดยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของโพรงสันห้อง
 เช่น สัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงแสง K สัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มแสงของวงแหวน α
 ผลจากการจำลองเบื้องต้นกับพฤติกรรมการส่งผ่านที่ต้องการ สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการ
 ออกแบบและสร้างสิ่งประดิษฐ์ตัวกรองสัญญาณแฉ็ค/ครีโอปที่เป็นท่อนำคลื่นชนิดแบนราบได้

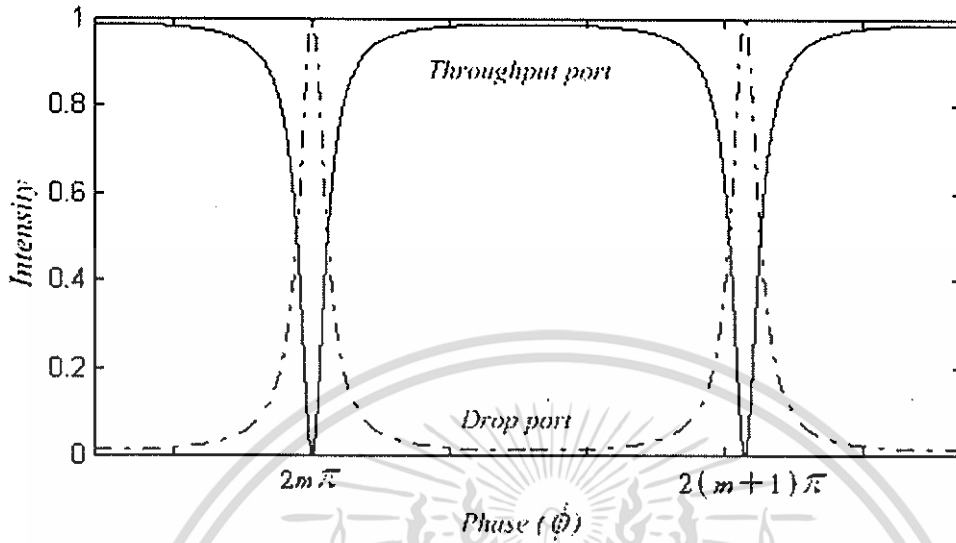
4.1 การทวนสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโพรงสันห้องวงแหวนระดับไมโครเมตร ทั้งสามโครง
 ร่างคือ SRR, DRR และ TRR ที่แสดงอยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนของสนามไฟฟ้าที่พอร์ตส่งผ่าน
 และพอร์ตครีโอปเทียบกับพอร์ตอินพุท $(\frac{E_{t1}}{E_{i1}}, \frac{E_{t2}}{E_{i1}})$ ดังที่ได้อธิบายในบทที่ 3 จากความสัมพันธ์
 เหล่านี้สามารถทวนสอบความถูกต้องได้ด้วย [8], [22] สำหรับ SRR และ [23] สำหรับ DRR

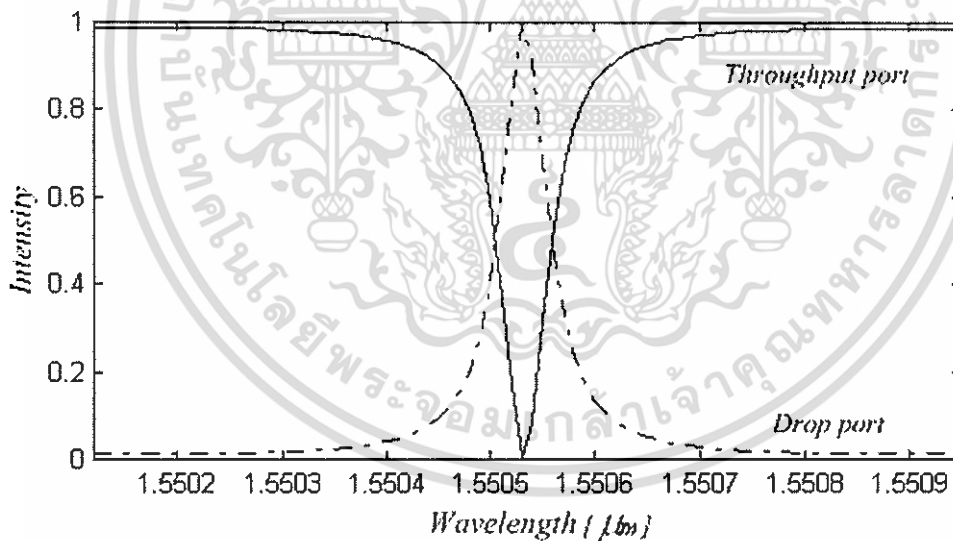
4.2 การตอบสนองกับเฟส

การศึกษาการตอบสนองต่อเฟสของ SRR แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยกำหนดให้คัปเปิลอร์ทั้ง
 สองสมมาตรกันคือ $K_1 = K_2 = 0.2$ และ $\alpha = 0$ ความเข้มสนามเอาท์พุท I_{t1} ที่พอร์ตส่งผ่าน
 (สมการที่ 3.14) จะมีค่าเป็นศูนย์ที่จุดเกิดเรโซแนนซ์กับโพรงสันห้องวงแหวนซึ่งกำหนดจาก
 $k_n L = 2m\pi$ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าความยาวคลื่นที่เกิดเรโซแนนซ์จะออก
 จากโพรงสันห้องมาทางพอร์ตครีโอปทั้งหมด ส่วนความยาวคลื่นอื่นๆที่ไม่เกิดเรโซแนนซ์ก็จะ
 ออกมาทางพอร์ตส่งผ่าน ระยะห่างระหว่างจุด 2 จุดที่เกิดเรโซแนนซ์จะห่างกันเท่ากับ 2π โดยที่
 จำนวนครั้งของการเกิดเรโซแนนซ์จะขึ้นกับความยาวของวงแหวน และช่วงของความยาวคลื่นที่ใส่
 ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าไปในวงแหวนแสดงดังรูปที่ 4.2 โพรงสั้นพ้องวงแหวนมีความยาว $150 \mu\text{m}$ จากช่วงความยาวคลื่นที่ใส่เข้าไป จะเกิดเรโซแนนซ์เพียงครั้งเดียวใกล้กับความยาว $1.5505 \mu\text{m}$



รูปที่ 4.1 การตอบสนองต่อเฟสของตัวกรอง SRR ที่มี $K_1 = K_2 = 0.2$, $\alpha = 0$

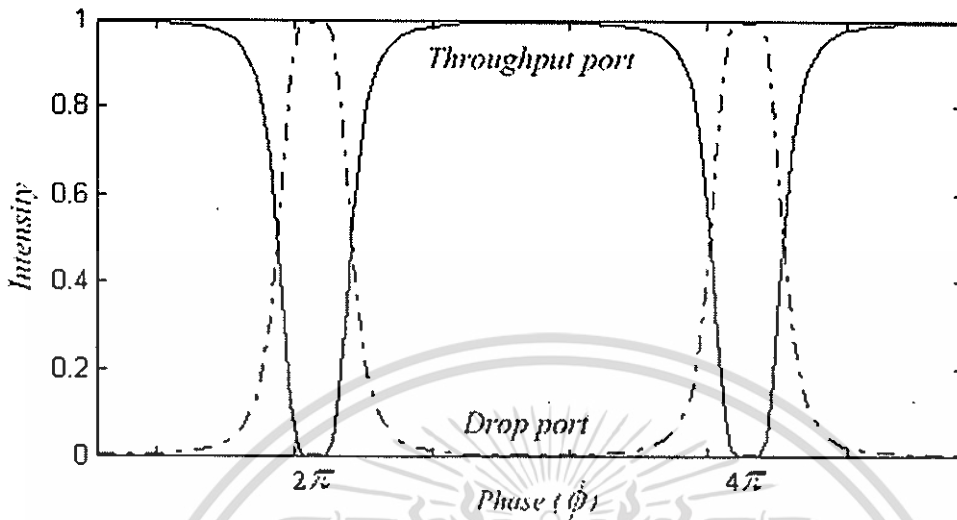


รูปที่ 4.2 สเปกตรัมการส่งผ่านของ SRR ที่มี $R = 150 \mu\text{m}$, $K_1 = K_2 = 0.2$, $\alpha = 0$

ผลการจำลองการตอบสนองต่อเฟสของตัวกรองโพรงสั้นพ้องวงแหวน 2 วง 3 คัปเปิลอร์ DRR (โครงสร้างดังรูปที่ 3.2) แสดงดังรูปที่ 4.3 โดยกำหนดให้คัปเปิลอร์ด้านนอกทั้งสองสมมาตรกันมีสัมประสิทธิ์การคัปปลิงคือ $K_0 = K_2 = 0.5$ และคัปเปิลอร์ตัวกลางมี $K_1 = 0.13$ และ

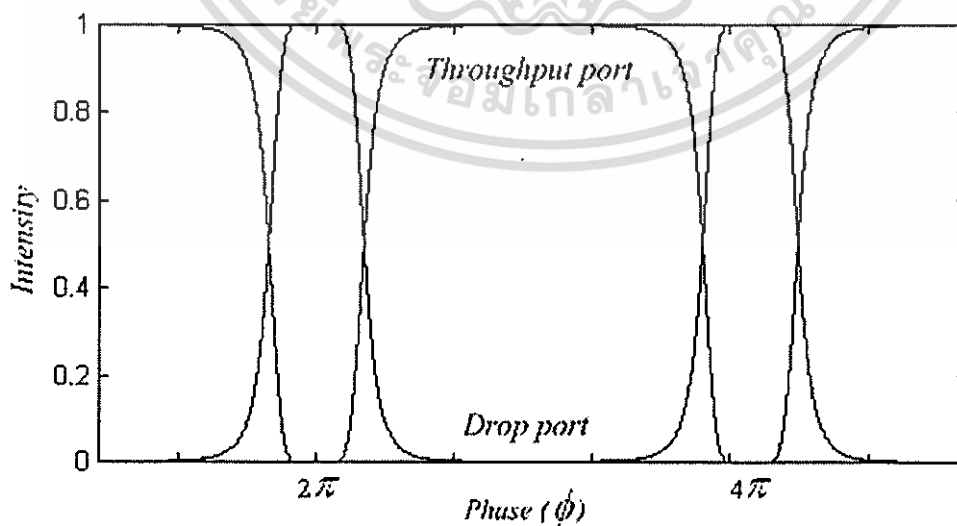
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\alpha = 0$ จะเห็นว่าขณะเรโซแนนซ์การส่งผ่านต่ำสุดที่พอร์ตส่งผ่านและการส่งผ่านมีค่าสูงสุดที่พอร์ตครีโปกเกิดขึ้นเมื่อ $\phi_1 = \phi_2 = 2m\pi$



รูปที่ 4.3 ผลจำลองการตอบสนองต่อเฟสของตัวกรอง DRR ที่มี $K_0 = K_2 = 0.5$, $K_1 = 0.13$

ตัวกรองโปรงสั้นพ้องวงแหวน 3 วง 4 คัปเปิลอร์ TRR ที่มีโครงร่างดังรูปที่ 3.3 โดยการกำหนดสัมประสิทธิ์การคัปปลิงที่สมมาตรคือ $K_0 = K_3 = 0.65$ สำหรับคัปเปิลอร์ด้านนอกทั้งสองและ $K_1 = K_2 = 0.2$ สำหรับคัปเปิลอร์ตัวกลางและมีการชดเชยความสูญเสียภายในวงแหวนทั้งหมด ($\alpha_{segment} = 0$) มีผลการจำลองการตอบสนองต่อเฟสแสดงดังรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าจุดเกิดเรโซแนนซ์ของวงแหวนโปรงสั้นพ้องทั้งสามตรงกับเฟส $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = 2m\pi$



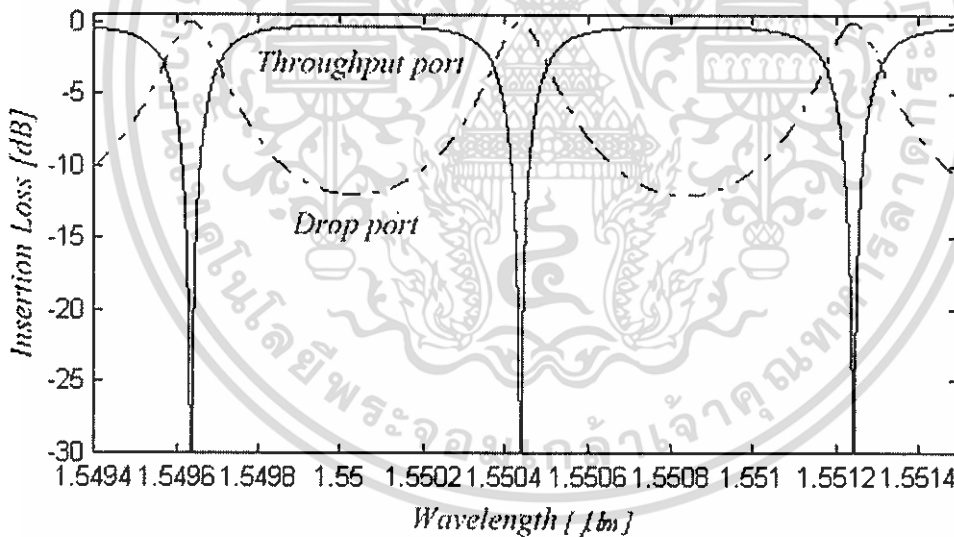
รูปที่ 4.4 การตอบสนองต่อเฟสของตัวกรอง TRR ที่มี $K_0 = K_3 = 0.65$, $K_1 = K_2 = 0.2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การตอบสนองกับความยาวคลื่น

4.3.1 การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงแสง

จากโครงสร้างของตัวกรองโพรงสั้นโพรงวงแหวนวงเดียว SRR ที่แสดงดังรูปที่ 3.1 ในหัวข้อนี้จะพิจารณากรณีที่ไม่มี การสูญเสียทางแสงภายในวงแหวน ($\alpha = 0$) ซึ่งทำได้โดยการลดความสูญเสียภายในวงแหวนทั้งหมด ในทางปฏิบัติทำได้โดยใส่ตัวขยายทางแสงสารกึ่งตัวนำ SOA และสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงของคัปเปลอร์ทั้งสองตัวมีความสมมาตรกัน ($K_1 = K_2$) คุณลักษณะสเปกตรัมการส่งผ่านที่แสดงดังรูปที่ 4.5 เป็นผลการจำลองที่พอร์ตส่งผ่านและพอร์ตครีอป SRR มีรัศมี $R = 136 \mu m$ มีสัมประสิทธิ์การคัปปลิง $K_1 = K_2 = 0.4$ โพรงสั้นโพรงวงแหวนที่ประดิษฐ์จากวัสดุ GaInAsP/InP ดัชนีหักเหกลุ่มมีค่า $n_g = 3.5$ ที่ความยาวคลื่น $\lambda = 1.55 \mu m$ จากรูปช่องห่างระหว่างช่องสัญญาณคำนวณได้เป็น $FSR = 0.8 nm$ หรือ $100 GHz$ อัตราส่วนเปิด-ปิดมีค่า $12 dB$ ซึ่งเป็นระดับที่เกิดสัญญาณไขว้แทรกระหว่างช่องสัญญาณที่อยู่ติดกัน ค่า FWHM ของ SRR คำนวณได้เป็น $0.13 nm$ ซึ่งจะได้ค่าฟินีสส์คือ $F = 6.01$ และตัวประกอบ Q มีค่า $Q = 11654$ ตัวประกอบสัญญาณที่พอร์ตครีอปมีค่าน้อยประมาณ 0.16

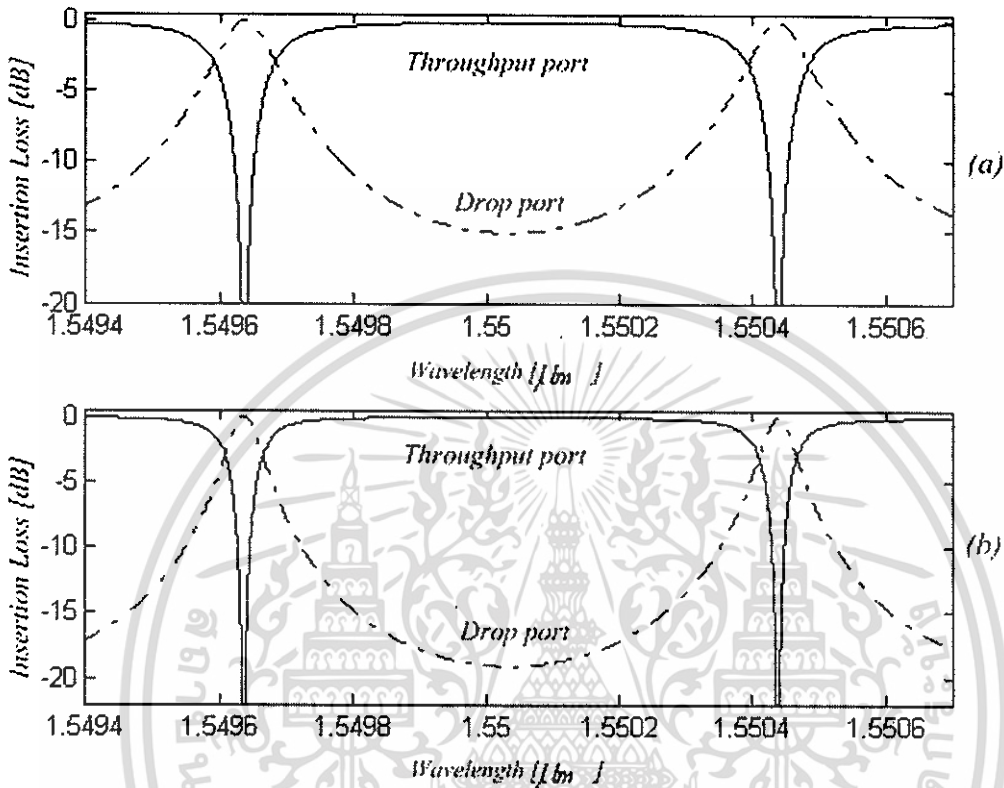


รูปที่ 4.5 สเปกตรัมการส่งผ่านของตัวกรอง SRR มี $R = 136 \mu m$, $K_1 = K_2 = 0.4$, $\alpha = 0$

ค่าอัตราส่วนเปิด-ปิด ที่มีค่าสูงขึ้นเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดสัญญาณไขว้แทรกจากช่องสัญญาณอื่น สำหรับ SRR ที่ลดความสูญเสีย ($\alpha = 0$) ทำได้โดยกำหนดสัมประสิทธิ์การคัปปลิง $K_1 = K_2$ ให้มีค่าน้อยลง ดังรูปที่ 4.6 (a) เป็นผลการจำลองการตอบสนองของ SRR ที่มีสัมประสิทธิ์การคัปปลิง $K_1 = K_2 = 0.3$ อัตราส่วนเปิด-ปิดที่ได้มีค่า $15 dB$ และรูปที่ 4.6 (b)

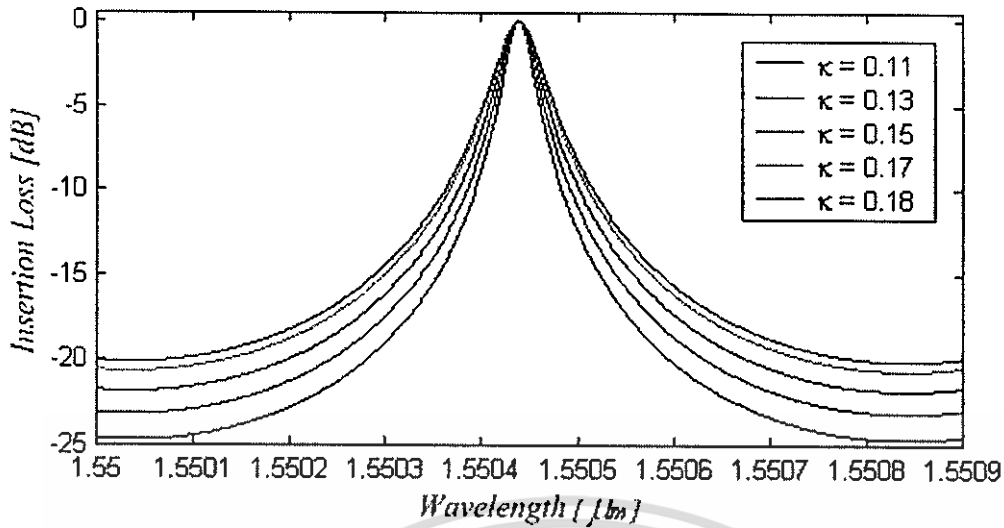
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ $K_1 = K_2 = 0.2$ อัตราส่วนเปิด-ปิดมีค่าสูงขึ้นไปเป็น 19 dB และเนื่องจากความยาวของโพรงสั้นพ้องวงแหวนไม่มีการเปลี่ยนแปลงจึงทำให้ค่าความยาวคลื่นที่เรโซแนนซ์กับโพรงสั้นพ้องยังคงเป็นความยาวคลื่นเดิม



รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองของตัวกรอง SRR ที่มี $R = 136 \text{ } \mu\text{m}$, $\alpha = 0$ สัมประสิทธิ์การคัปปลิงคือ (a) $K_1 = K_2 = 0.3$ และ (b) $K_1 = K_2 = 0.2$ ตามลำดับ

อัตราส่วนเปิด-ปิดจะมีค่ามากที่สุด $> 20 \text{ dB}$ (ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับกันในทางด้านการสื่อสาร) ได้เมื่อสัมประสิทธิ์การคัปปลิง $K_1 = K_2 < 0.2$ และยังคงมีการชดเชยความสูญเสียในวงแหวน รูปที่ 4.7 แสดงอัตราส่วนเปิด-ปิด ที่สูงขึ้นไปมากกว่า 20 dB เฉพาะที่พอร์ตหรือปเมื่อลดค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิงน้อยกว่า 0.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การคัปปลิงที่สมมาตรของตัวกรอง SRR ที่มีรัศมีวงแหวน $136 \text{ } \mu\text{m}$ ($FSR = 100 \text{ GHz}$) และ $\alpha = 0$ สรุปในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.7 ผลการจำลองของพอร์ตครีปที่แสดงให้เห็นอัตราส่วนเปิด-ปิดที่สูงกว่า 20 dB โดยที่ SRR มี $K_1 = K_2 < 0.2$

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การคัปปลิงของตัวกรอง SRR

$K_1 = K_2$	อัตราส่วนเปิด-ปิด [dB]	FWHM [nm]	ฟินีสส์ F	ตัวประกอบ Q	ตัวประกอบ สัญญาณ
0.5	9.5	0.18	4.44	8611	-
0.4	12	0.13	6.15	11923	-
0.3	15	0.092	8.69	16847	0.16
0.2	19	0.057	14.03	27192	0.165
0.17	20.6	0.048	16.67	32291	0.164
0.15	21.8	0.042	19.04	36904	0.166
0.13	23.1	0.036	22.22	43055	0.166
0.11	24.7	0.03	26.67	51666	0.166

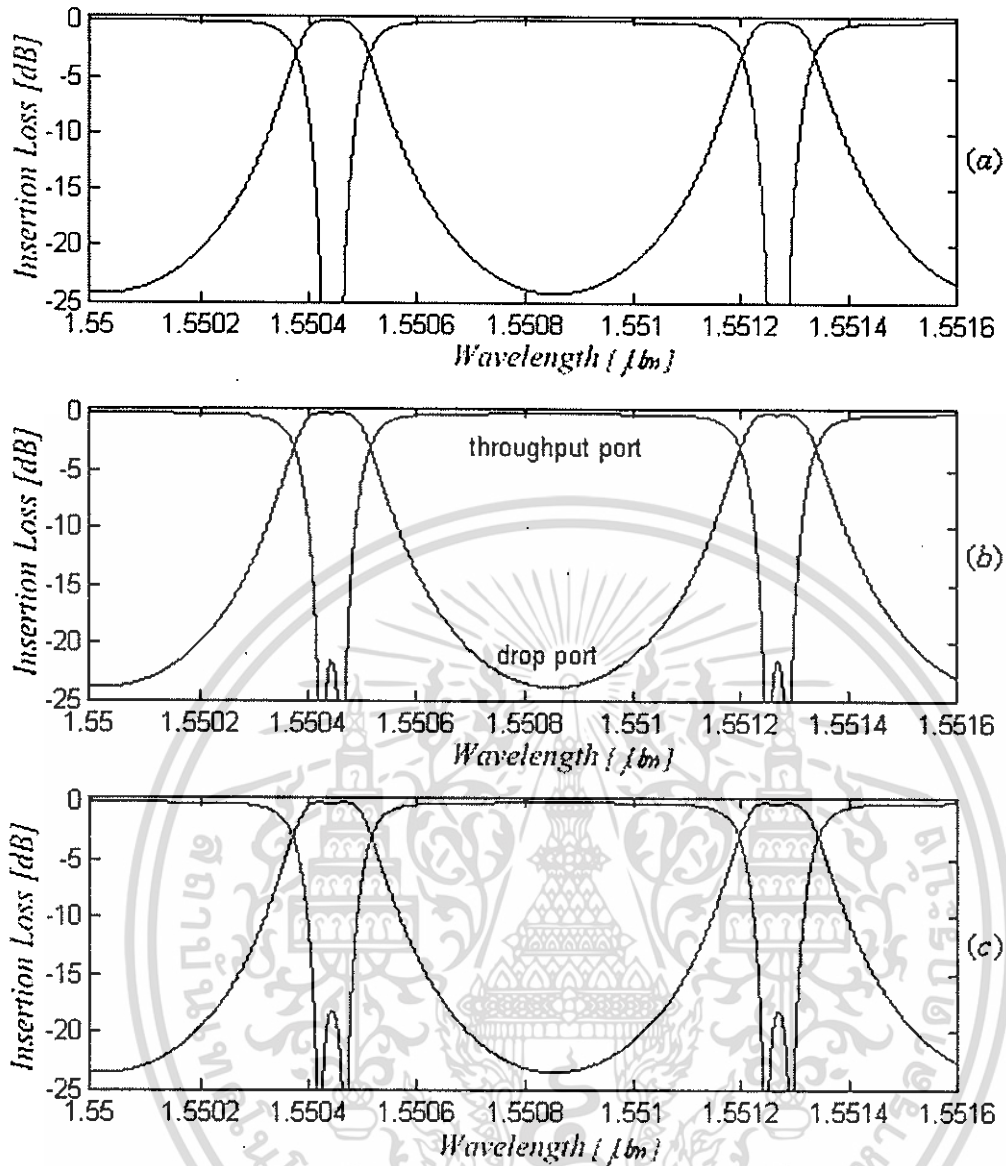
จากตารางเนื่องจากที่ค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิง $K_1 = K_2 = 0.4$ และ 0.5 มีอัตราส่วนเปิด-ปิดประมาณ 10 dB จึงไม่ต้องแสดงค่าตัวประกอบสัญญาณ การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิงนอกจากจะทำให้อัตราส่วนเปิด-ปิดเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 20 dB แล้วยังทำให้แถบผ่านมีความกว้างลดลงส่งผลให้ค่าฟินีสส์ F และตัวประกอบ Q เพิ่มขึ้น ค่าฟินีสส์ที่สูงๆจะเห็นลักษณะสเปกตรัมที่พอร์ตส่งผ่านที่จุดเกิดเรโซแนนซ์มีปลายแหลมมากขึ้น สิ่งที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการกรองสัญญาณความยาวคลื่นที่ละเอียดขึ้นเป็นเส้นความยาวคลื่น อย่างไรก็ตามเนื่องจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าเห็นว่าเป็นประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปร่างของผลตอบสนองของ SRR แสดงโดยลักษณะที่เรียกว่ารูปร่างลอเรนซ์เซียน ซึ่งตัวประกอบสัมพัทธ์มีค่าน้อยราว 0.16 และระดับสัญญาณไขว้แทรกถูกจำกัดไว้ที่ 20 dB ก็เนื่องมาจากรูปร่างลอเรนซ์เซียนที่มีปีกกว้างและไม่เกิดยอดแบน

ในการออกแบบให้เกิดรูปร่างผลตอบสนองตัวกรองที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมสามารถทำให้เห็นได้โดยการเพิ่มค่าตัวประกอบสัมพัทธ์ และการปรับปรุงค่าตัวประกอบสัมพัทธ์ก็สามารถทำได้โดยใช้ตัวกรองโพรงสั้นพ้องที่มีการเชื่อมต่อวงแหวนกันหลายวงดังเช่น DRR และ TRR ที่ได้จำลองในงานวิจัยนี้

1. รูปร่างผลตอบสนองตัวกรองที่เป็นรูปสี่เหลี่ยม

รูปที่ 4.8 แสดงผลตอบสนองตัวกรองที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมของ DRR กำหนดให้สัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงของคัปเปิลอร์ตัวนอกคือ $K_0 = 0.5$, $K_2 = 0.5$ โพรงสั้นพ้องวงแหวนทั้งสองวงมีรัศมีเท่ากันคือ $R_{1,2} = 136 \mu m$ เพื่อให้ได้ช่องว่างระหว่างช่องสัญญาณเป็น 100 GHz และให้มีการชดเชยความสูญเสียภายในทั้งหมด ($\alpha_{segment} = 0$) พบว่าสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงของคัปเปิลอร์ตัวกลางที่ทำให้เกิดรูปร่างการกรองที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมที่สเปกตรัมของแถบผ่านมีลักษณะยอดแบนและสูงชันอยู่ในช่วง $K_1 = 0.12 - 0.14$ ตัวประกอบสัมพัทธ์ที่ครีโอฟอร์ตคือ 0.42 อัตราส่วนเปิด-ปิดที่ได้มีค่าสูงมากกว่า 20 dB ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสรุปได้ดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองตัวกรองที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมของ DRR รัศมีวงแหวนคือ $R_{1,2} = 136 \mu m$,
 $\alpha_{R_1, R_2} = 0$, $K_0 = K_2 = 0.5$ คัปเปิลร์ตัวกลางมีสัมประสิทธิ์การคัปปลิงคือ
 (a) $K_1 = 0.12$, (b) $K_1 = 0.13$, และ (c) $K_1 = 0.14$ ตามลำดับ

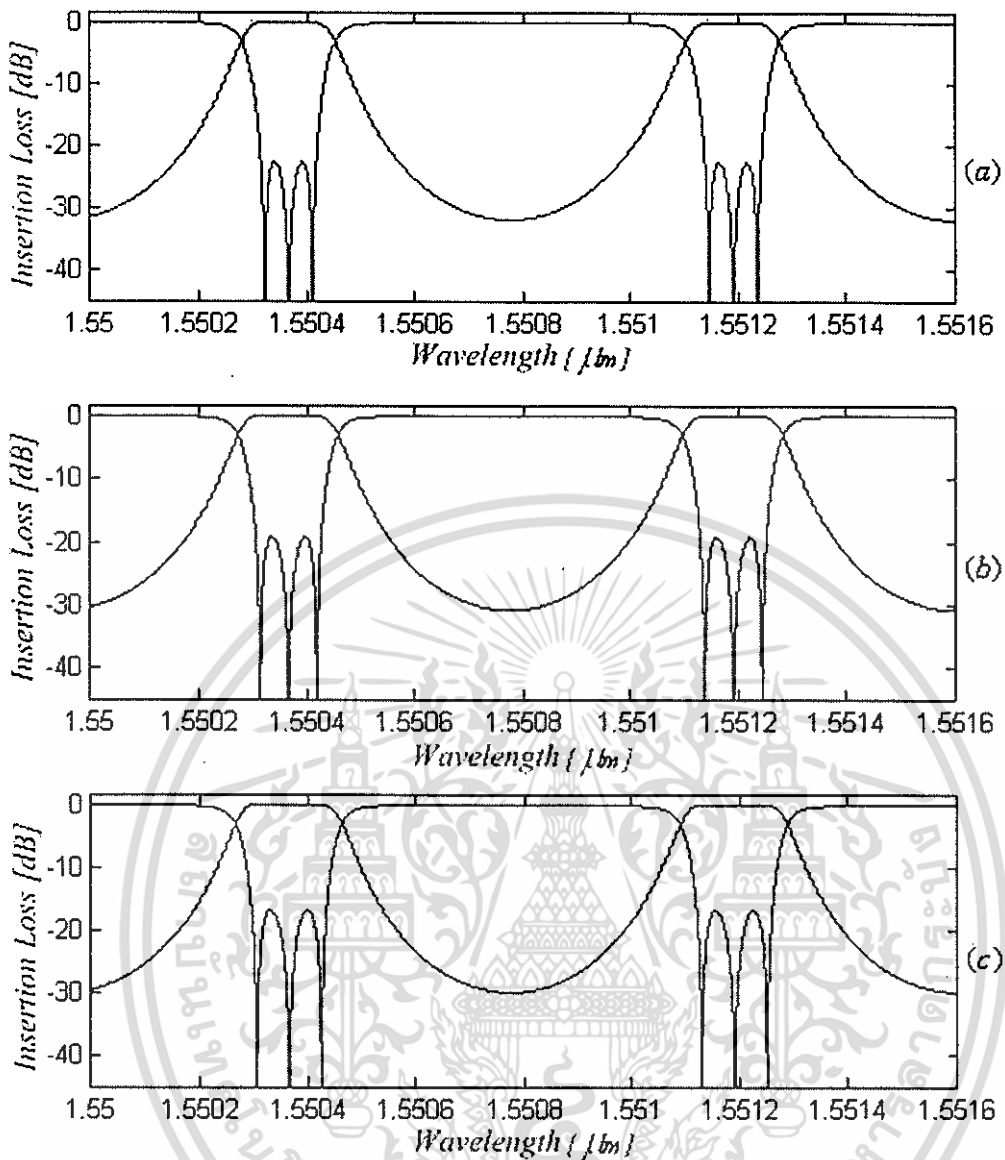
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การคัปปลิง K_1 ของ DRR

$$(K_0 = K_2 = 0.5)$$

K_1	อัตราส่วนเปิด-ปิด [dB]	FWHM [nm]	ฟินเนสส์ F	ตัวประกอบ Q	ตัวประกอบ สัมฐาน
0.12	24.25	0.13	6.15	11923	0.41
0.13	23.88	0.14	5.71	11071	0.42
0.14	23.53	0.145	5.52	10690	0.43

รูปที่ 4.9 แสดงผลตอบสนองของตัวกรองที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมของ TRR ที่มีสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงคือ $K_0 = K_3 = 0.65$ ของคัปเปลอร์ตัวนอกและ $K_1 = K_2 = 0.18 - 0.22$ ของคัปเปลอร์ตัวกลาง โพรงสั้นพ้องวงแหวนทั้งสามวงมีรัศมีเท่ากันคือ $R_{1,2,3} = 136 \mu\text{m}$ และวงแหวนโพรงสั้นพ้องไม่มีการสูญเสีย ($\alpha_{\text{segment}} = 0$) ช่องห่างระหว่างช่องสัญญาณที่ได้คือ 100 GHz จะเห็นว่าเกิดผลตอบสนองรูปร่างการกรองที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมที่แถบผ่านมีลักษณะยอดแบนและสูงชันชัดเจนขึ้น อัตราส่วนเปิด-ปิดมีค่าสูงราว 30 dB ตัวประกอบสัมฐานที่ครีโอฟอร์ตประมาณ 0.6 จากคุณลักษณะนี้ยังพบได้ภายในช่วง $K_0 = K_3 = 0.65 - 0.67$ และ $K_1 = K_2 = 0.18 - 0.22$ ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสรุปได้ดังตารางที่ 4.3

นอกจากนี้ยังพบความเป็นไปได้อื่นที่ทำให้เกิดรูปร่างการกรองที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมคือโดยใช้สัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงคือ $K_0 = K_3 = 0.5$ และ $K_1 = K_2 = 0.08 - 0.1$ จากเงื่อนไขนี้สามารถทำให้ได้อัตราส่วนเปิด-ปิดมีค่าสูงกว่า 30 dB และตัวประกอบสัมฐานที่ครีโอฟอร์ตคือ 0.6 ซึ่งสรุปค่าได้ตามตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองตัวกรองที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมของ TRR รัศมีวงแหวนคือ $R_{1,2,3} = 136 \mu\text{m}$,
 $\alpha_{R_1, R_2, R_3} = 0, K_0 = K_3 = 0.65$ กัปเปลอร์ตัวกลางมีสัมประสิทธิ์การคัปปลิงคือ
 (a) $K_{1,2} = 0.18$, (b) $K_{1,2} = 0.20$, และ (c) $K_{1,2} = 0.22$ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การคัปปลิง K_1, K_2 ของ TRR

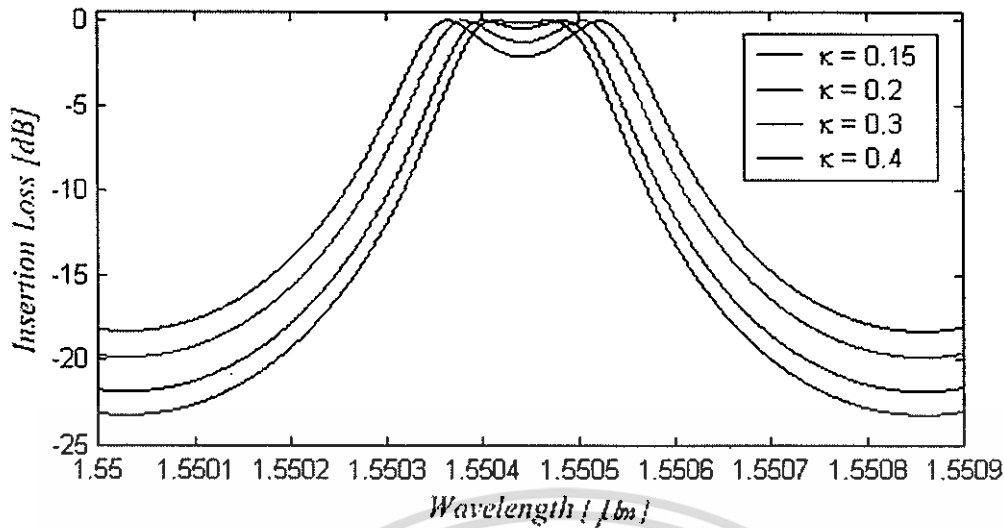
$K_1 = K_2$	อัตราส่วนเปิด-ปิด [dB]	FWHM [nm]	ฟินีสต์ F	ตัวประกอบ Q	ตัวประกอบ สัญญาณ
$K_0 = K_3 = 0.65$					
0.18	31.89	0.173	4.62	8959	0.601
0.20	30.87	0.185	4.32	8378	0.619
0.22	29.94	0.197	4.06	7868	0.633
$K_0 = K_3 = 0.67$					
0.20	30.42	0.184	4.34	8424	0.602
0.21	29.94	0.189	4.23	8201	0.608

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การคัปปลิง K_1, K_2 ของ TRR
เมื่อ $K_0 = K_3 = 0.5$

$K_1 = K_2$	อัตราส่วนเปิด-ปิด [dB]	FWHM [nm]	ฟินีสต์ F	ตัวประกอบ Q	ตัวประกอบ สัญญาณ
0.07	44.11	0.103	7.767	15049	0.586
0.08	42.91	0.112	7.14	13839	0.606
0.09	41.84	0.120	6.66	12917	0.628
0.10	40.88	0.129	6.20	12016	0.641

2. ความไม่เข้ากันของการเรโซแนนซ์

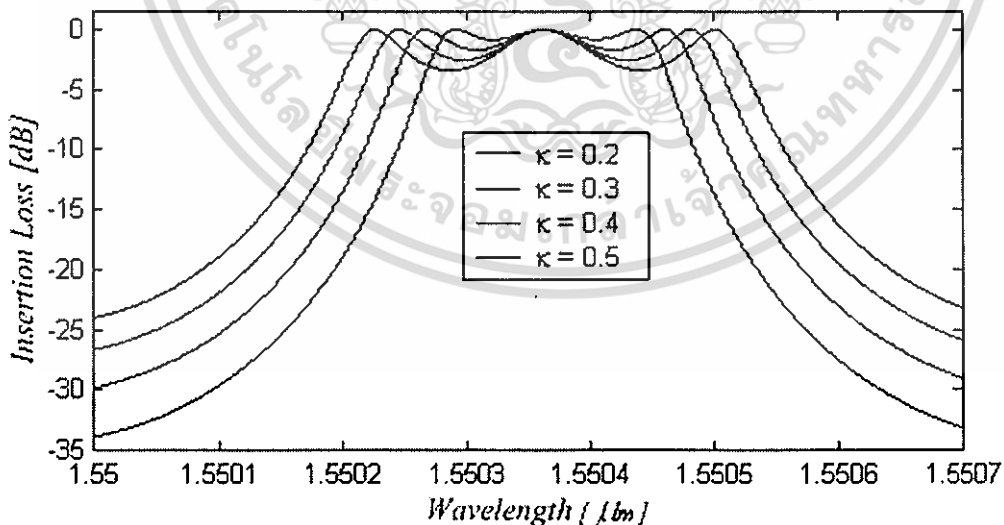
รูปที่ 4.10 เป็นผลจำลองการตอบสนองตัวกรอง DRR เมื่อให้สัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงเป็น $K_0 = K_2 = 0.5$ และ $K_1 > 0.14$ ริปเปิล 2 ริปเปิลที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากความไม่เข้ากัน (Mismatch) จากการเลื่อนตำแหน่งของการเกิดเรโซแนนซ์ระหว่างวงแหวนทั้งสองวง



รูปที่ 4.10 ความไม่เข้ากันของการเกิดเรโซแนนซ์ของ DRR รัศมีวงแหวนคือ $R_{1,2} = 136 \mu\text{m}$,

$$\alpha_{R_1, R_2} = 0, K_0 = K_2 = 0.5 \text{ คัปเปิลอร์ตัวกลางมี } K_1 > 0.14$$

ทำนองเดียวกับ DRR ความไม่เข้ากันจากการเลื่อนตำแหน่งของการเกิดเรโซแนนซ์ระหว่างวงแหวนทั้งสามวงของ TRR ทำให้เกิดริบเปิดขึ้น 3 ริบเปิด แสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นผลจำลองการตอบสนองตัวกรอง TRR ที่มีสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงเป็น $K_0 = K_3 = 0.5$ และ $K_1 = K_2 > 0.1$



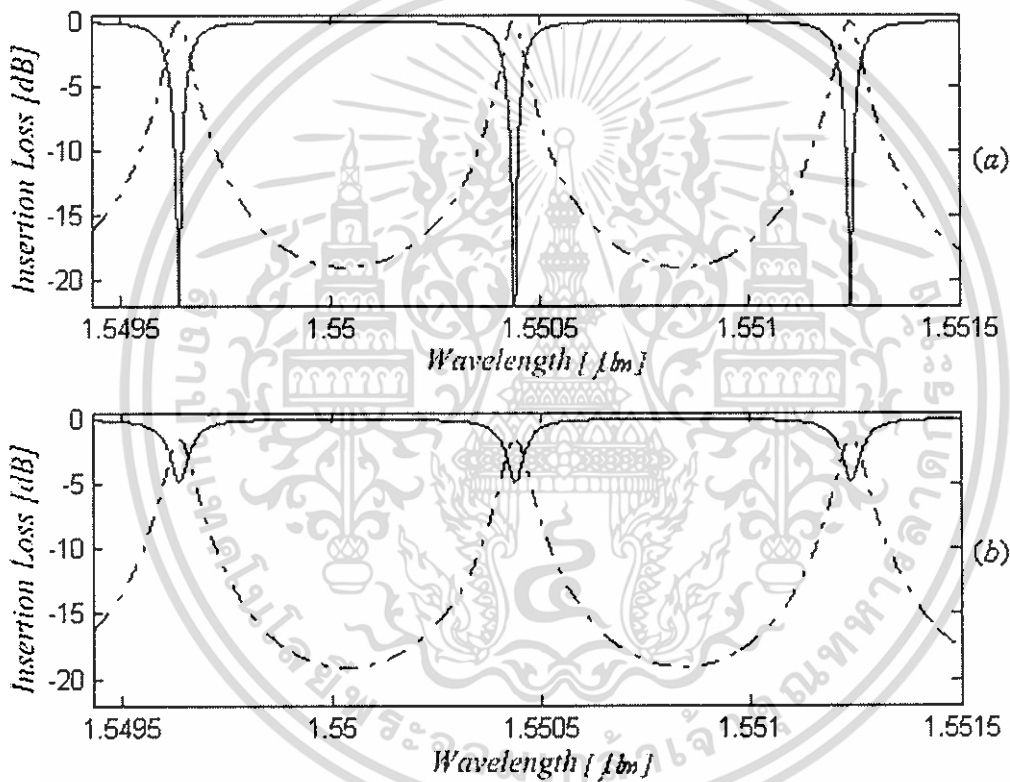
รูปที่ 4.11 ความไม่เข้ากันของการเกิดเรโซแนนซ์ของ TRR รัศมีวงแหวนคือ $R_{1,2,3} = 136 \mu\text{m}$,

$$\alpha_{R_{1,2,3}} = 0, K_0 = K_3 = 0.5 \text{ คัปเปิลอร์ตัวกลางมี } K_1 = K_2 > 0.1$$

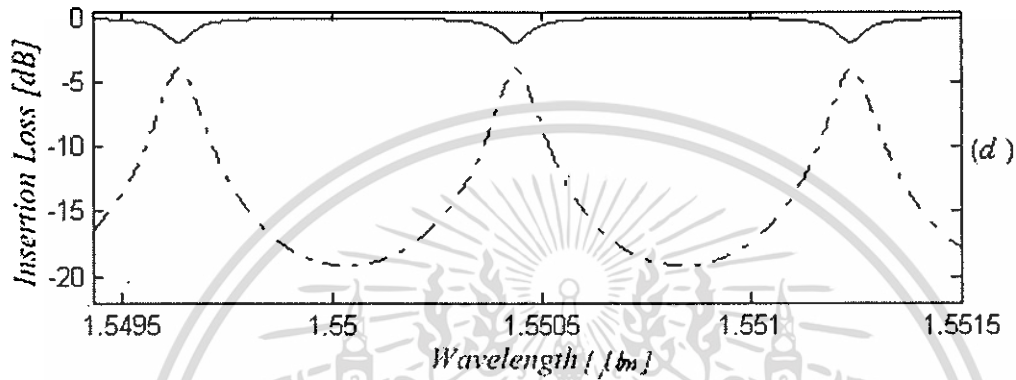
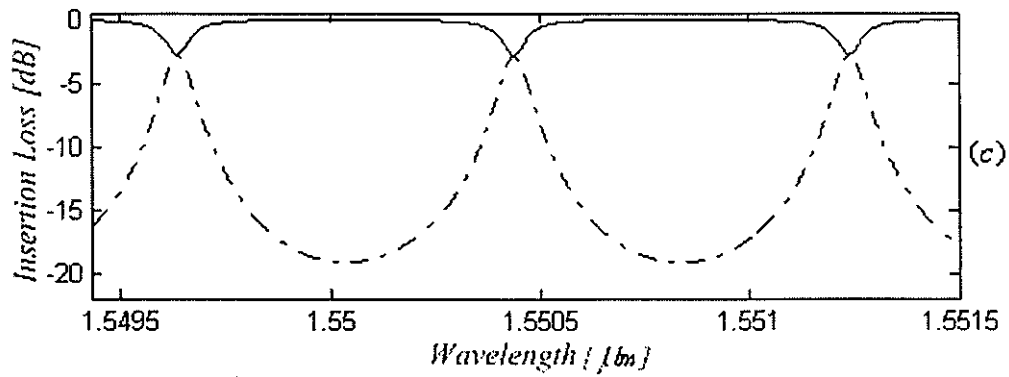
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ของการลดทอนความเข้มแสง

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาผลตอบสนองตัวกรองโพรงสั้นพ้อง SRR ที่ไม่มีการชดเชยความสูญเสียภายในวงแหวน โดยการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ของการลดทอนความเข้มแสง α รูปที่ 4.12(a)-(d) เป็นผลจำลองการตอบสนองของสัญญาณความยาวคลื่นอินพุทของ SRR ที่มีรัศมีวงแหวน $136 \mu\text{m}$ และมีสัมประสิทธิ์การคัปปลิง $K_1 = K_2 = 0.2$ เมื่อเพิ่มสัมประสิทธิ์การลดทอนเป็น $\alpha = 0, 1, 2$ และ 3 dB/cm ตามลำดับ จะเห็นว่าที่พอร์ตครีโอบเกิดการลดทอนแอมพลิจูดของสัญญาณแสงที่เดินทางอยู่ภายในวงแหวน ค่าการลดทอนความเข้มสรุปได้ดังตารางที่ 4.5 อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวไม่ส่งผลกระทบต่อระดับการเกิดสัญญาณไขว้แทรก



รูปที่ 4.12 ผลจำลองการลดทอนสัญญาณอินพุทของ SRR ที่มี $R = 136 \mu\text{m}$, $K_1 = K_2 = 0.2$ วงแหวนมีสัมประสิทธิ์การลดทอนคือ (a) $\alpha = 0$, (b) $\alpha = 1 \text{ dB/cm}$, (c) $\alpha = 2 \text{ dB/cm}$ และ (d) $\alpha = 3 \text{ dB/cm}$

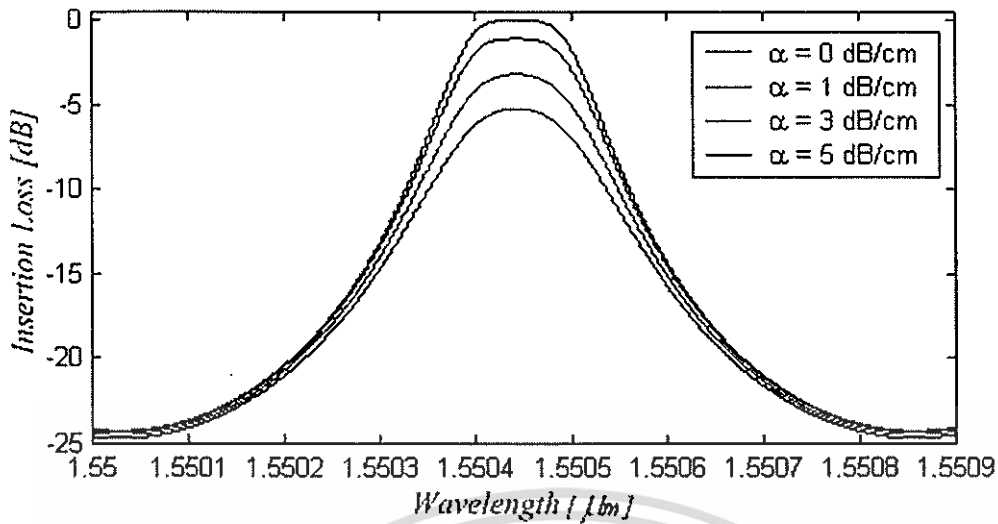


รูปที่ 4.12 (ต่อ)

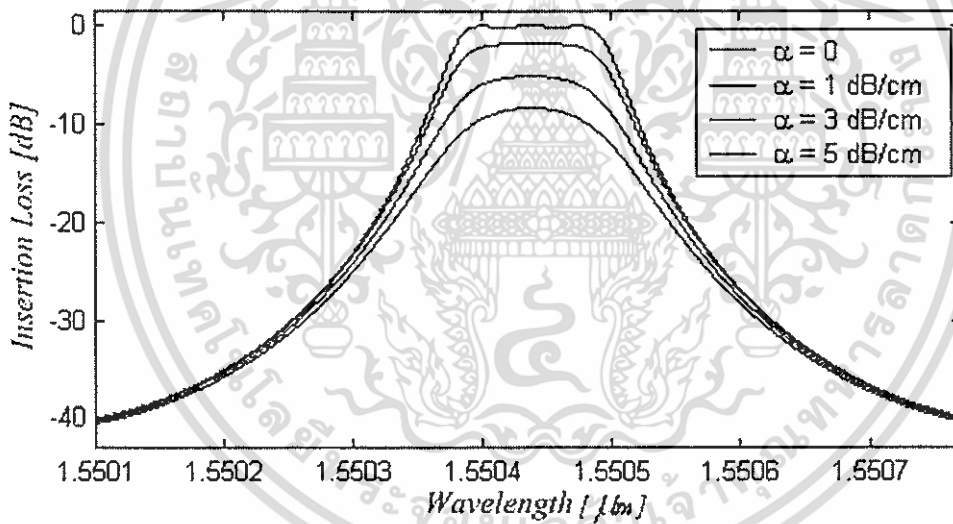
ตารางที่ 4.5 การลดทอนความเข้มสัญญาณความยาวคลื่นแสงอินพุทของตัวกรอง SRR

สัมประสิทธิ์ของการลดทอนความเข้มแสง α dB/cm	การลดทอนความเข้มแสงอินพุท dB
1	1.53
2	2.83
3	3.96
4	4.97
5	5.88

ทำนองเดียวกันกับ SRR สำหรับโพรงสี่เหลี่ยม DRR และ TRR ที่มีความสูญเสียภายในวงแหวน จะเห็นว่าเมื่อวงแหวนทั้งสองมีสัมประสิทธิ์ของการลดทอนสูงขึ้น ที่พอร์ตครีโปกจะเกิดการลดทอนแอมพลิจูดของสัญญาณแสงและการลดลงของตัวประกอบสัญญาณส่งผลให้รูปร่างผลตอบสนองที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมลดลงไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.13 และ รูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 ผลจำลองการตอบสนองของตัวกรอง DRR ที่มี $K_0 = K_2 = 0.5$ และ $K_1 = 0.12$ เมื่อวงแหวนมีสัมประสิทธิ์การลดทอนคือ $\alpha = 0, 1, 3$, และ 5 dB/cm ตามลำดับ

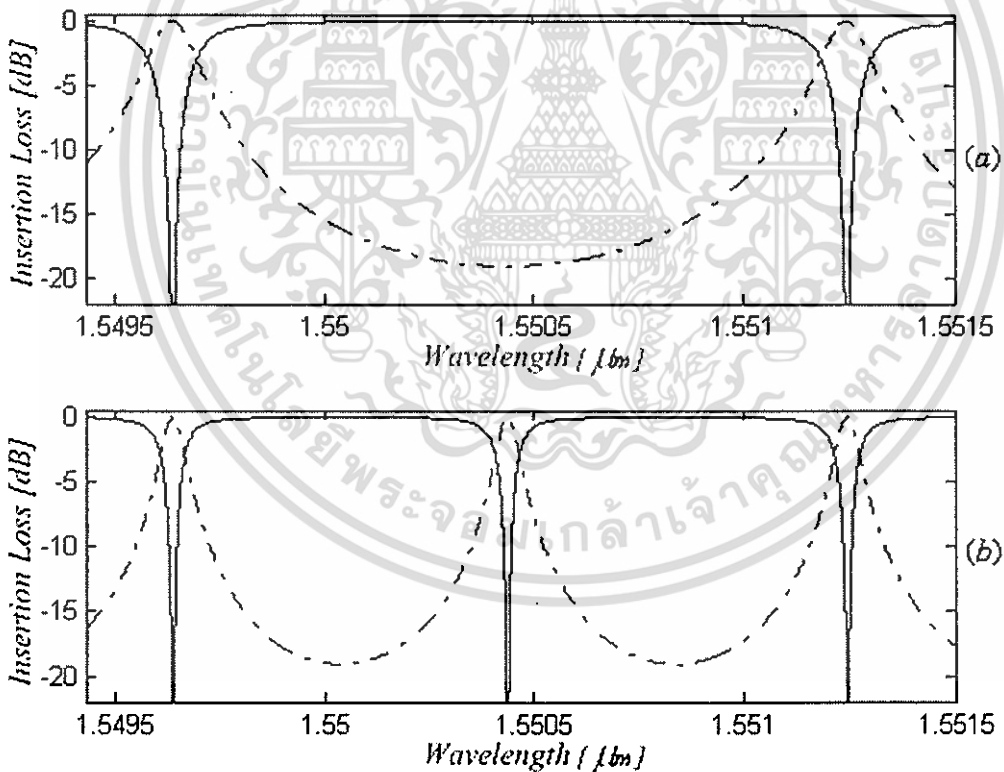


รูปที่ 4.14 ผลจำลองการตอบสนองของตัวกรอง TRR ที่มี $K_0 = K_2 = 0.5$ และ $K_1 = K_2 = 0.1$ วงแหวนมีสัมประสิทธิ์การลดทอนคือ $\alpha = 0, 1, 3$, และ 5 dB/cm ตามลำดับ

4.3.3 การเปลี่ยนแปลงรัศมีวงแหวนโพรงสั้นพ้อง

ในระบบ DWDM สามารถเพิ่มความจุข้อมูลด้วยการลดช่วงห่างของช่องสัญญาณ FSR ให้แคบลงกว่าเดิม ในการออกแบบ FSR ของตัวกรองสัญญาณแฉก/ครีโพล SRR ทำได้โดยควบคุมรัศมีของวงแหวน ผลตอบสนองของตัวกรอง SRR ที่มีสัมประสิทธิ์การคัปปลิง $K_1 = K_2 = 0.2$ และ $\alpha = 0$ แสดงดังรูปที่ 4.15 (a)-(d) เมื่อเปลี่ยนแปลงรัศมีวงแหวนเป็น $R = 68, 136, 273$ และ $544 \mu\text{m}$ ตามลำดับ จะเห็นว่าที่พอร์ตครีโพลเมื่อรัศมีวงแหวนยาวขึ้นจะทำให้ความยาวคลื่นที่เกิดเรโซแนนซ์ในช่วงแบนด์วิดท์หนึ่งมีจำนวนเพิ่มขึ้น รูปร่างลอเรนซ์เขียนจะสูงขึ้นและมีแถบผ่านที่แคบลง แต่ตัวประกอบสัดส่วนเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 4.6 ค่าพีเนสส์ของตัวกรอง SRR นี้มีค่าประมาณ 14 ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่คำนวณได้และเป็นไปตามสมการ 3.17 และกำหนด $x = 1$ กรณีขาดเซกความสูญเสียทั้งหมดและ $y_1 = y_2$ เราจะได้

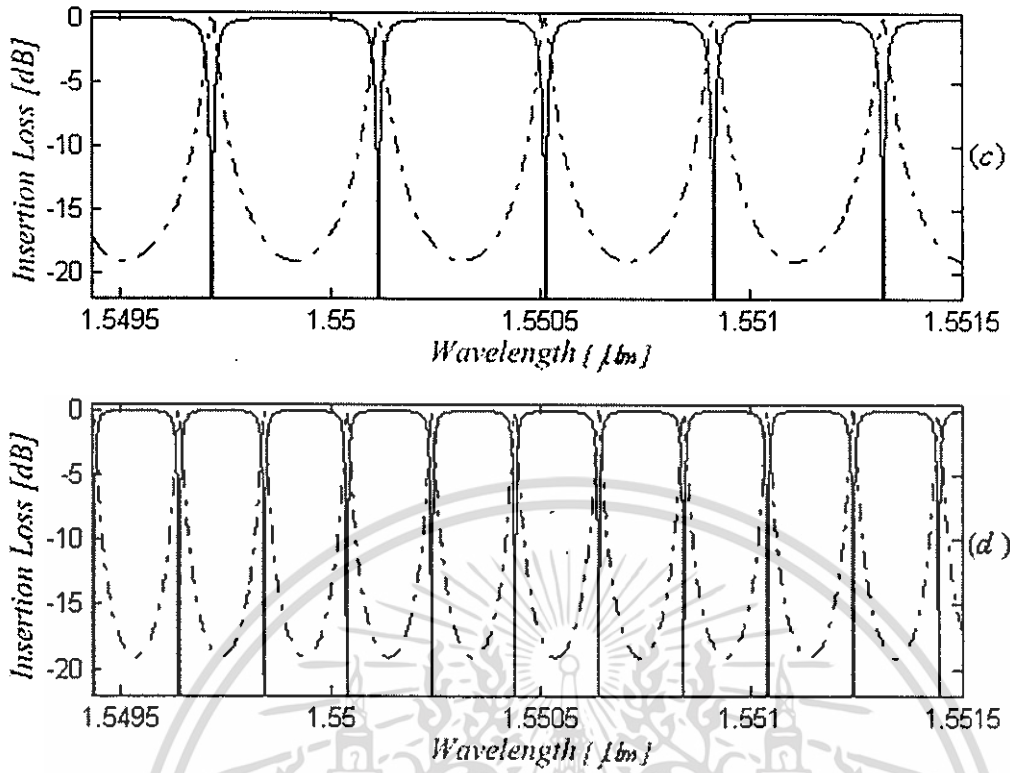
$$F = \frac{2\pi}{\Delta\phi} = \frac{\pi\sqrt{y_1 y_2 x}}{1 - y_1 y_2 x} \Big|_{x=1, y_1=y_2=y} = \frac{\pi y}{1 - y^2} \Big|_{K_{1,2}=0.2} = 14.05$$



รูปที่ 4.15 ผลจำลองการลดทอนสัญญาณอินพุตของ SRR ที่มี $K_1 = K_2 = 0.2$, $\alpha = 0$

วงแหวนมีรัศมีคือ (a) $R = 68 \mu\text{m}$, (b) $R = 136 \mu\text{m}$, (c) $R = 273 \mu\text{m}$ และ
(d) $R = 544 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 (ต่อ)

ตารางที่ 4.6 การควบคุมช่วงห่างช่องสัญญาณ FSR ของตัวกรอง SRR

รัศมีวงแหวน (μm)	ช่วงห่างช่องสัญญาณ FSR nm (GHz)	ตัวประกอบสัดส่วน	FWHM [nm]
68	1.6 (200)	0.166	0.11
136	0.8 (100)	0.165	0.057
273	0.4 (50)	0.172	0.029
544	0.2 (25)	0.159	0.014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและแนวทางในการพัฒนา

ในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของ โครงสร้างโพรงวงแหวนที่ต่ออันดับกันเพื่อประยุกต์ใช้งานเป็นตัวกรองสัญญาณทางแสง โดยจำลองโพรงสัณฐานที่ประดิษฐ์ขึ้นจากระบบวัสดุระว่างหมู่ที่ 3 และ 5 คือ GaInAsP/InP โดยที่วัสดุ GaInAsP ทำหน้าที่เป็นแกนเพื่อเป็นทางเดินแสงมีดัชนีหักเหกลุ่ม $n_{gr} \approx 3.5$ ที่ความยาวคลื่น 1.55 nm และวัสดุ InP ทำหน้าที่เป็นแคลคดิงมีดัชนีหักเหกลุ่มคือ 3.17

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. โครงสร้างโพรงวงแหวน 1 วง 2 คัปเปิลเลอร์ SRR

- โดยการกำหนดให้คัปเปิลเลอร์ด้านนอกทั้งสองสมมาตรกัน ($K_1 = K_2$) ความยาวคลื่นแสงอินพุตที่เกิดเรโซแนนซ์กับโพรงสัณฐานเกิดขึ้นเมื่อเฟส $\phi = k_n L = 2m\pi$ เมื่อ m เป็นเลขจำนวนเต็ม
- อัตราส่วนเปิด-ปิดมีค่ามากที่สุด $> 20 \text{ dB}$ เมื่อสัมประสิทธิ์การคัปปลิง $K_1 = K_2 < 0.2$ และมีการชดเชยความสูญเสียภายในวงแหวนโพรงสัณฐาน
- รูปร่างของผลตอบสนองของ SRR ที่แสดงด้วยฟังก์ชันลอเรนต์เขียน ตัวประกอบสัณฐานมีค่าน้อยราว 0.16
- โพรงสัณฐานที่มีการสูญเสียภายในวงแหวนจะทำให้เกิดการลดทอนแอมพลิจูดของสัญญาณแสงเอาต์พุต
- ช่องห่างระหว่างช่องสัญญาณที่แคบลงสามารถทำได้โดยการเพิ่มรัศมีวงแหวนโพรงสัณฐาน

2. โครงสร้างโพรงวงแหวน 2 วง 3 คัปเปิลเลอร์ DRR

- DRR ที่มีรัศมีวงแหวนทั้งสองเท่ากันและคัปเปิลเลอร์ด้านนอกที่สมมาตรกัน ($K_0 = K_2$) ความยาวคลื่นแสงอินพุตที่เกิดเรโซแนนซ์กับโพรงสัณฐานเกิดขึ้นเมื่อ $\phi_1 = \phi_2 = k_n L = 2m\pi$ เมื่อ m เป็นเลขจำนวนเต็ม
- DRR ที่มีสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงคือ $K_0 = K_2 = 0.5$ และ $K_1 = 0.12 - 0.14$ และไม่มี การสูญเสียในวงแหวน จะได้ตัวประกอบสัณฐานที่เพิ่มขึ้นคือประมาณ 0.4 ทำให้เกิดรูปร่างการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรองที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมที่สเปกตรัมของแถบผ่านมีลักษณะยอดแบนและสูงชัน อัตราส่วนเปิด-ปิดที่ได้มีค่าสูงมากกว่า 20 dB

- โพรงสั้นพ้องที่มีการสูญเสียภายในวงแหวนนอกจากจะเกิดการลดทอนแอมพลิจูดของสัญญาณแสงเอาที่พุดแล้วยังลดรูปร่างผลตอบสนองที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมด้วย
- สัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงของ DRR ที่มี $K_0 = K_2 = 0.5$ และ $K_1 > 0.14$ จะเกิดริบเปิด 2 ริบเปิดขึ้นเป็นผลมาจากความไม่เข้ากันจากการเลื่อนตำแหน่งของการเกิดเรโซแนนซ์ระหว่างวงแหวนทั้งสองวง

3. โพรงสั้นพ้องวงแหวน 3 วง 4 คัปเปิลอร์ TRR

- TRR ที่มีรัศมีวงแหวนทั้งสามเท่ากัน ขณะเรโซแนนซ์การส่งผ่านต่ำสุดที่พอร์ตส่งผ่านและการส่งผ่านมีค่าสูงสุดที่พอร์ตรีฟลิกซ์เกิดขึ้นเมื่อ $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = k_n L = 2m\pi$
- เกิดผลตอบสนองรูปร่างการกรองที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมที่แถบผ่าน มีลักษณะยอดแบนและสูงชันชัดเจนขึ้น เนื่องจากตัวประกอบพื้นฐานที่รีฟลิกซ์สูงถึง 0.6 อัตราส่วนเปิด-ปิดที่สูงกว่า 30 dB จากคุณลักษณะนี้เกิดขึ้นในช่วงสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิง $K_0 = K_3 = 0.65 - 0.67$, $K_1 = K_2 = 0.18 - 0.22$ และ $K_0 = K_3 = 0.5$, $K_1 = K_2 = 0.08 - 0.1$
- ผลตอบสนองของ TRR ที่เกิดริบเปิด 3 ริบเปิดขึ้นเป็นผลมาจากความไม่เข้ากันจากการเลื่อนตำแหน่งของการเกิดเรโซแนนซ์ระหว่างวงแหวนทั้งสามวง

จากผลสรุปของตัวกรองโพรงสั้นพ้องแต่ละประเภทข้างบน จะเห็นว่าความสามารถในการกรองของตัวกรองโพรงสั้นพ้องวงแหวนจะถูกจำกัดด้วยความสูญเสียที่มีอยู่ในวงแหวน ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้งานจริงจะมีการชดเชยความสูญเสียด้วยการใส่ SOA การแสดงให้เห็นรูปร่างผลตอบสนองที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมและอัตราส่วนเปิด-ปิดที่สูงกว่า 30 dB เพื่อแยกช่องสัญญาณออกจากกันโดยไม่เกิดสัญญาณไขว้แทรกจากช่องสัญญาณอื่น จำเป็นต้องใช้โพรงสั้นพ้องวงแหวนที่มีการต่ออันดับกันหลายๆวงดังเช่น DRR และ TRR โดยเปรียบเทียบความสามารถการกรองของตัวกรองทั้งสามประเภทได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบความสามารถการกรองของตัวกรองโพรงสั้นพ้องวงแหวน

อันดับตัวกรอง	SRR	DRR	TRR
อัตราส่วนเปิด-ปิด	> 20 dB	> 20 dB	> 30 dB
ตัวประกอบพื้นฐาน	0.16	0.4	0.6
Box-like shape	No	Yes	Yes

5.2 แนวทางในการพัฒนา

เนื่องจากภายในท่อนำคลื่นของโพรงชั้นพ้องระดับไมโครเมตรมีปรากฏการณ์การส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแสง ผลที่เกิดขึ้นโดยตรงที่เกี่ยวกับความก้าวหน้าทางเทคนิคการสร้างสิ่งประดิษฐ์ระดับนาโนก็คือโมเดลที่มีความถูกต้องแม่นยำ เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์เหล่านี้ การสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขจึงเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ที่ต้นทุนต่ำและสามารถออกแบบคุณลักษณะที่ดีที่สุดก่อนที่จะประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานจริง ดังนั้นการพัฒนาต่อไปในอนาคตจะเป็นการออกแบบและจำลองพฤติกรรมของโพรงชั้นพ้องระดับไมโครเมตรที่ประยุกต์ใช้เป็นตัวกรองทางแสงนี้ในเชิงตัวเลข โดยวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา (Finite-Difference Time Domain: FDTD) ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณที่มีความแม่นยำสามารถทำให้เข้าใจรายละเอียดปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่ซับซ้อนในท่อนำคลื่น เช่นการคำนวณหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแสงที่กระจายอยู่ในโครงสร้างท่อนำคลื่น โดยการแก้ปัญหาจากสมการแมกซ์เวลล์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา



เอกสารอ้างอิง

- [1] International Telecommunication Union. ITU-T. G.692. October 1998.
- [2] John M. Senior. **Optical Fiber Communication, Principles and Practice.**, 2nd Ed. Prentice Hall International Series. 1992.
- [3] Govind P. Agrawal. **Fiber-Optic Communication Systems.** 2nd Ed. New York: John Wiley&Sons, Inc. 2002.
- [4] ปรีชา ยูพาพิน. **วิศวกรรมใยแก้วนำแสง.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ส.ส.ท. 2544.
- [5] อธิคม ฤกษ์บุตร. **เส้นใยแก้วและการประยุกต์ใช้งานเบื้องต้น.** พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น. 2546.
- [6] C. K. Madsen and J. H. Zhao. "A General Planar Waveguide Autoregressive Optical Filter." **IEEE J. Lightwave Technol.**, vol. 14, no. 3, March 1996. pp. 437-447
- [7] B. Moslehi et al.. "Fiber-Optic Lattice Signal Processing." **Proc. IEEE**, vol. 72, no. 7, July 1984. , pp. 909-930
- [8] D. G. Rabus, M. Hamacher, U. Troppenz, and H. Heidrich. "Optical Filters Based on Ring Resonators With Integrated Semiconductor Optical Amplifiers In GaInAsP-InP." **IEEE J.**, vol. 8, no. 6, November 2002. pp. 1405-1411
- [9] E. A. J. Marcatili. "Bends in Optical Dielectric Guides." **Bell. Syst. Tech. J.**, vol. 48, 1969. pp. 2103-2132.
- [10] E. A. J. Marcatili. "Dielectric Rectangular Waveguide and Directional Coupler for Integrated Optics." **Bell. Syst. Tech. J.**, vol. 48, 1969. pp. 2071-2101.
- [11] C. K. Madsen and J. H. Zhao. "A General Planar Waveguide Autoregressive Optical Filter." **IEEE J. Lightwave Tech.**, vol. 14, no. 3, March 1996. pp. 437-447
- [12] S. C. Hagness et al.. "FDTD Microcavity Simulations: Design and Experimental Realization of Waveguide-Coupled Single-Mode Ring and Whispering-Gallery-Mode Disk Resonators," **IEEE J. Lightwave Tech.**, vol. 15, no. 11, November 1997. pp. 2145-2165
- [13] D. Rafizadeh et al.. "Waveguide-coupled AlGaAs/GaAs microcavity ring and disk resonators with high finesse and 21.6 nm free spectral range." **Opt. Lett.**, vol. 22, no. 16, August 1997. pp. 1244-1246
- [14] B. E. Little et al.. "Ultra-Compact Si-SiO₂ Microring resonator Optical Channel Dropping Filters." **IEEE Photon. Techn. Lett.**, vol. 10, no. 4, April 1998. pp. 549-551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

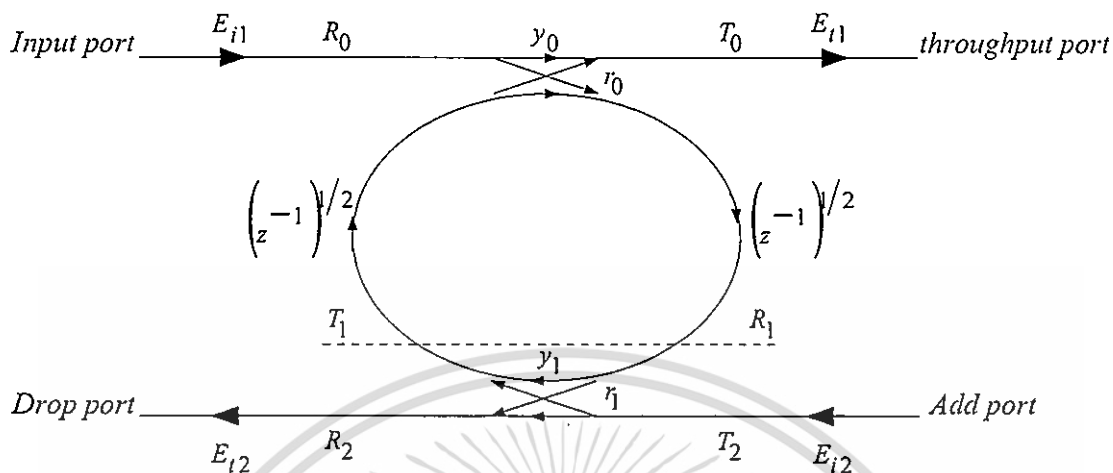
- [15] D. J. W. Klunder et al., "Vertically and laterally waveguide-coupled cylindrical microresonators in Si_3N_4 on SiO_2 technology." *Appl. Phys. B* **73**, November 2001. pp. 603-608
- [16] B. Vanderhaegen et al.. "High Q GaInAsP ring resonator filters." *ECIO'99*, Torino Italy, April 1999. pp. 381-384
- [17] M. K. Chin et al.. "GaAs Microcavity Channel-Dropping Filter based on a Race-Track Resonator," *IEEE Photon. Techn. Lett.*, vol. 11, no. 12, December 1999. pp. 1620-1622
- [18] R. Grover et al.. "A Tunable GaInAsP-InP Optical Microring Notch Filter." *IEEE Phot. Tech. Lett.*, vol. 16, no. 2, February 2004. pp. 467-469
- [19] R. Grover et al., "Vertically coupled GaInAsP-InP microring resonators," *Opt. Lett.*, vol. 26, no. 8, April 2001. pp. 506-508
- [20] A. Yariv. "Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides." *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 4, February 2000. pp. 321-322
- [21] Y. Yanagase, S. Suzuki, Y. Kokubun, and S. T. Chu. "Box-like filter response and expansion of FSR by a vertically triple coupled microring resonator filter." *J. Lightwave Technol.*, vol. 20, no. 8, 2002. pp. 1524-1529
- [22] D. G. Rabus, M. Hamacher, and H. Heidrich. "Active and Passive Microring Resonator Filter Applications in GaInAsP/InP." *13th IPRM*, Nara Japan, May 2001. pp. 477-480
- [23] J. Yang et al.. "Characteristics of optical bandpass filters employing series-cascaded double-ring resonators." *Optics Communications*, Sept 2003. pp. 91-98



ภาคผนวก ก
การคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอนของ SRR ด้วยการแปลงแบบ Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอนของ SRR ด้วยการแปลงแบบ Z



ในที่นี้ $N = 1$ จะได้ว่า

ที่ซึ่ง $\phi_{tot} = \sum_{n=1}^N \phi_n$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\phi_{tot} = \sum_{n=1}^1 \phi_n = \phi_1$$

และ $\sigma_N = \prod_{n=0}^N K_n$ จะได้ว่า

$$\sigma_1 = \prod_{n=0}^1 K_n = K_0 K_1$$

Φ_{N0} เป็นผลคูณเมตริกซ์ $\Phi_{N0} = \prod_{n=0}^N \Phi_n$ และแต่ละเทอมในเมตริกซ์การส่งผ่าน N อันดับ

สามารถแสดงในเทอมของ 2 พหุนามคือ

$$\Phi_{N0} = \begin{bmatrix} A_N(z) & B_N^R(z) \\ e^{j\phi_{N+1}} z^{-1} B_N(z) & e^{j\phi_{N+1}} z^{-1} A_N^R(z) \end{bmatrix} \quad (1)$$

จากสูตร $\Phi_n = \begin{bmatrix} 1 & -y_n \\ y_n e^{j\phi_{n+1}} z^{-1} & -e^{j\phi_{n+1}} z^{-1} \end{bmatrix}$ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Phi_0 = \begin{bmatrix} 1 & -y_0 \\ y_0 e^{j\phi_1} z^{-1} & -e^{j\phi_1} z^{-1} \end{bmatrix}, \quad \Phi_1 = \begin{bmatrix} 1 & -y_1 \\ y_1 e^{j\phi_2} z^{-1} & -e^{j\phi_2} z^{-1} \end{bmatrix}$$

$$\Phi_{10} = \Phi_1 \Phi_0 = \begin{bmatrix} 1 & -y_1 \\ y_1 e^{j\phi_2} z^{-1} & -e^{j\phi_2} z^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -y_0 \\ y_0 e^{j\phi_1} z^{-1} & -e^{j\phi_1} z^{-1} \end{bmatrix}$$

$$\Phi_{10} = \begin{bmatrix} 1 - y_0 y_1 e^{j\phi_1} z^{-1} & -y_0 + y_1 e^{j\phi_1} z^{-1} \\ y_1 e^{j\phi_2} z^{-1} - y_0 e^{j(\phi_1 + \phi_2)} z^{-2} & -y_0 y_1 e^{j\phi_2} z^{-1} + e^{j(\phi_1 + \phi_2)} z^{-2} \end{bmatrix}$$

$$\Phi_{10} = \begin{bmatrix} 1 - y_0 y_1 e^{j\phi_1} z^{-1} & -y_0 + y_1 e^{j\phi_1} z^{-1} \\ e^{j\phi_2} z^{-1} \left(y_1 - y_0 e^{j\phi_1} z^{-1} \right) & e^{j\phi_2} z^{-1} \left(-y_0 y_1 + e^{j\phi_1} z^{-1} \right) \end{bmatrix}$$

เทียบพหุนามกับรูปทั่วไปของเมตริกซ์การส่งผ่าน N อันดับ ในสมการที่ (1) จะได้

$$A_1(z) = 1 - y_0 y_1 e^{j\phi_1} z^{-1}, \quad B_1(z) = y_1 - y_0 e^{j\phi_1} z^{-1}$$

$$A_1^R(z) = -y_0 y_1 + e^{j\phi_1} z^{-1}, \quad B_1^R(z) = -y_0 + y_1 e^{j\phi_1} z^{-1}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของอินพุต E_{i1} และไม่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส คือ พอร์ตส่งผ่าน :

$$H_{12}(z) = \frac{E_{t1}}{E_{i1}} = \frac{-B_N^R(z)}{A_N(z)}$$

$$\frac{E_{t1}}{E_{i1}} = \frac{-B_1^R(z)}{A_1(z)} = \frac{y_0 - y_1 z^{-1}}{1 - y_0 y_1 z^{-1}}$$

$$= \frac{\sqrt{1 - K_0} - \sqrt{1 - K_1} z^{-1}}{1 - \sqrt{1 - K_0} \sqrt{1 - K_1} z^{-1}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอร์ตครีอป :

$$H_{22}(z) = \frac{E_{t2}}{E_{i1}} = \frac{j^{N+1} z^{-N/2} \sqrt{\sigma_N}}{A_N(z)}$$

$$\frac{E_{t2}}{E_{i1}} = \frac{-z^{-1/2} \sqrt{K_0 K_1}}{A_1(z)} = \frac{-z^{-1/2} \sqrt{K_0 K_1}}{1 - y_0 y_1 e^{j\phi_1} z^{-1}}$$

$$= \frac{-z^{-1/2} \sqrt{K_0 K_1}}{1 - \sqrt{1-K_0} \sqrt{1-K_1} z^{-1}}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
การคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอนของ DRR ด้วยการแปลงแบบ Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่นี้ $N=2$ จะได้ว่า

$$\phi_{tot} = \sum_{n=1}^2 \phi_n = \phi_1 + \phi_2$$

$$\sigma_2 = \prod_{n=0}^2 K_n = K_0 K_1 K_2$$

$$\Phi_0 = \begin{bmatrix} 1 & -y_0 \\ y_0 e^{j\phi_1} z^{-1} & -e^{j\phi_1} z^{-1} \end{bmatrix}, \quad \Phi_1 = \begin{bmatrix} 1 & -y_1 \\ y_1 e^{j\phi_2} z^{-1} & -e^{j\phi_2} z^{-1} \end{bmatrix}, \quad \Phi_2 = \begin{bmatrix} 1 & -y_2 \\ y_2 e^{j\phi_3} z^{-1} & -e^{j\phi_3} z^{-1} \end{bmatrix}$$

$$\Phi_{20} = \Phi_2 \Phi_1 \Phi_0 = \begin{bmatrix} 1 & -y_2 \\ y_2 e^{j\phi_3} z^{-1} & -e^{j\phi_3} z^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -y_1 \\ y_1 e^{j\phi_2} z^{-1} & -e^{j\phi_2} z^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -y_0 \\ y_0 e^{j\phi_1} z^{-1} & -e^{j\phi_1} z^{-1} \end{bmatrix}$$

$$\Phi_{20} = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 - y_0 y_1 e^{j\phi_1} z^{-1} - y_1 y_2 e^{j\phi_2} z^{-1} \\ + y_0 y_2 e^{j(\phi_1 + \phi_2)} z^{-2} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} -y_0 + y_1 e^{j\phi_1} z^{-1} + y_0 y_1 y_2 e^{j\phi_2} z^{-1} \\ -y_2 e^{j(\phi_1 + \phi_2)} z^{-2} \end{pmatrix} \\ e^{j\phi_3} z^{-1} \begin{pmatrix} y_2 - y_0 y_1 y_2 e^{j(\phi_1)} z^{-1} \\ -y_1 e^{j(\phi_2)} z^{-1} + y_0 e^{j(\phi_1 + \phi_2)} z^{-2} \end{pmatrix} & e^{j\phi_3} z^{-1} \begin{pmatrix} -y_0 y_2 + y_1 y_2 e^{j(\phi_1)} z^{-1} \\ + y_0 y_1 e^{j(\phi_2)} z^{-1} - e^{j(\phi_1 + \phi_2)} z^{-2} \end{pmatrix} \end{bmatrix}$$

เทียบพหุนามกับรูปทั่วไปของเมตริกซ์การส่งผ่าน N อันดับ Φ_{N0} ในภาคผนวก ก จะได้

$$A_2(z) = 1 - y_0 y_1 e^{j\phi_1} z^{-1} - y_1 y_2 e^{j\phi_2} z^{-1} + y_0 y_2 e^{j(\phi_1 + \phi_2)} z^{-2}$$

$$B_2(z) = y_2 - y_0 y_1 y_2 e^{j(\phi_1)} z^{-1} - y_1 e^{j(\phi_2)} z^{-1} + y_0 e^{j(\phi_1 + \phi_2)} z^{-2}$$

$$A_2^R(z) = -y_0 y_2 + y_1 y_2 e^{j(\phi_1)} z^{-1} + y_0 y_1 e^{j(\phi_2)} z^{-1} - e^{j(\phi_1 + \phi_2)} z^{-2}$$

$$B_2^R(z) = -y_0 + y_1 e^{j\phi_1} z^{-1} + y_0 y_1 y_2 e^{j\phi_2} z^{-1} - y_2 e^{j(\phi_1 + \phi_2)} z^{-2}$$

และจาก $y_n = \sqrt{1-K_n} \Rightarrow y_0 = \sqrt{1-K_0}, y_1 = \sqrt{1-K_1}, y_2 = \sqrt{1-K_2}$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของอินพุต E_{j1} และไม่มี การเปลี่ยนแปลงเฟส คือ

พอร์ตส่งผ่าน :

$$\frac{E_{t1}}{E_{i1}} = \frac{-B_2^R(z)}{A_2(z)} = \frac{\sqrt{1-K_0} - \sqrt{1-K_1}z^{-1} - \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_1}\sqrt{1-K_2}z^{-1} + \sqrt{1-K_2}z^{-2}}{1 - \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_1}z^{-1} - \sqrt{1-K_1}\sqrt{1-K_2}z^{-1} + \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_2}z^{-2}}$$

พอร์ตครีอป :

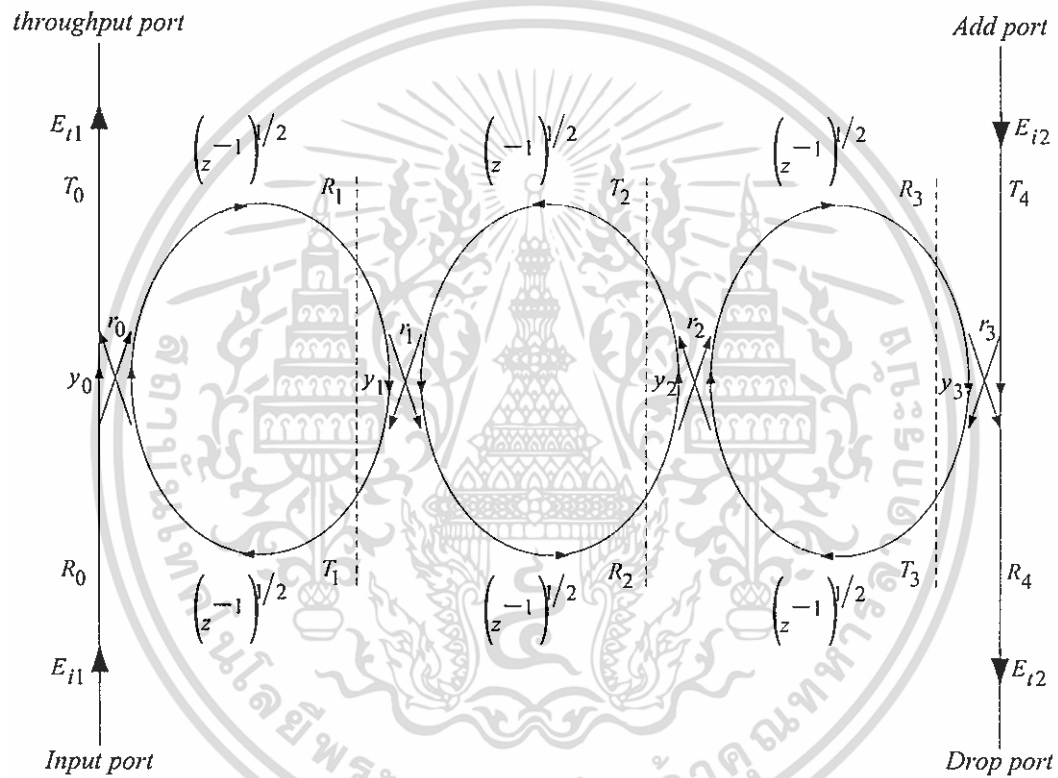
$$\frac{E_{t2}}{E_{i1}} = \frac{-jz^{-1}\sqrt{K_0K_1K_2}}{1 - \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_1}z^{-1} - \sqrt{1-K_1}\sqrt{1-K_2}z^{-1} + \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_2}z^{-2}}$$



ภาคผนวก ค
การคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอนของ TRR ด้วยการแปลงแบบ Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอนของ TRR ด้วยการแปลงแบบ Z



ในที่นี้ $N = 3$ จะได้ว่า

$$\phi_{tot} = \sum_{n=1}^3 \phi_n = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3$$

$$\sigma_3 = \prod_{n=0}^3 K_n = K_0 K_1 K_2 K_3$$

$$\Phi_0 = \begin{bmatrix} 1 & -y_0 \\ y_0 e^{j\phi_1 z^{-1}} & -e^{j\phi_1 z^{-1}} \end{bmatrix}, \quad \Phi_1 = \begin{bmatrix} 1 & -y_1 \\ y_1 e^{j\phi_2 z^{-1}} & -e^{j\phi_2 z^{-1}} \end{bmatrix}$$

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} 1 & -y_2 \\ y_2 e^{j\phi_3 z^{-1}} & -e^{j\phi_3 z^{-1}} \end{bmatrix}, \quad \Phi_3 = \begin{bmatrix} 1 & -y_3 \\ y_3 e^{j\phi_4 z^{-1}} & -e^{j\phi_4 z^{-1}} \end{bmatrix}$$

$$\Phi_{30} = \Phi_3 \Phi_2 \Phi_1 \Phi_0 = \begin{bmatrix} 1 & -y_3 \\ y_3 e^{j\phi_4 z^{-1}} & -e^{j\phi_4 z^{-1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -y_2 \\ y_2 e^{j\phi_3 z^{-1}} & -e^{j\phi_3 z^{-1}} \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} 1 & -y_1 \\ y_1 e^{j\phi_2 z^{-1}} & -e^{j\phi_2 z^{-1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -y_0 \\ y_0 e^{j\phi_1 z^{-1}} & -e^{j\phi_1 z^{-1}} \end{bmatrix}$$

$$\Phi_{30} = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 - y_0 y_1 e^{j\phi_1 z^{-1}} - y_1 y_2 e^{j\phi_2 z^{-1}} \\ + y_0 y_2 e^{j(\phi_1 + \phi_2) z^{-2}} - y_2 y_3 e^{j\phi_3 z^{-1}} \\ + y_0 y_1 y_2 y_3 e^{j(\phi_1 + \phi_3) z^{-2}} + y_1 y_3 e^{j(\phi_2 + \phi_3) z^{-2}} \\ - y_0 y_3 e^{j(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3) z^{-3}} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} -y_0 + y_1 e^{j\phi_1 z^{-1}} + y_0 y_1 y_2 e^{j\phi_2 z^{-1}} \\ - y_2 e^{j(\phi_1 + \phi_2) z^{-2}} + y_0 y_2 y_3 e^{j\phi_3 z^{-1}} \\ - y_1 y_2 y_3 e^{j(\phi_1 + \phi_3) z^{-2}} - y_0 y_1 y_3 e^{j(\phi_2 + \phi_3) z^{-2}} \\ + y_3 e^{j(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3) z^{-3}} \end{pmatrix} \\ e^{j\phi_4 z^{-1}} \begin{pmatrix} y_3 - y_0 y_1 y_3 e^{j\phi_1 z^{-1}} \\ - y_1 y_2 y_3 e^{j\phi_2 z^{-1}} + y_0 y_2 y_3 e^{j(\phi_1 + \phi_2) z^{-2}} \\ - y_2 e^{j\phi_3 z^{-1}} + y_0 y_1 y_2 e^{j(\phi_1 + \phi_3) z^{-2}} \\ + y_1 e^{j(\phi_2 + \phi_3) z^{-2}} - y_0 e^{j(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3) z^{-3}} \end{pmatrix} & e^{j\phi_4 z^{-1}} \begin{pmatrix} -y_0 y_3 + y_1 y_3 e^{j\phi_1 z^{-1}} \\ + y_0 y_1 y_2 y_3 e^{j\phi_2 z^{-1}} - y_2 y_3 e^{j(\phi_1 + \phi_2) z^{-2}} \\ + y_0 y_2 e^{j\phi_3 z^{-1}} - y_1 y_2 e^{j(\phi_1 + \phi_3) z^{-2}} \\ - y_0 y_1 e^{j(\phi_2 + \phi_3) z^{-2}} + e^{j(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3) z^{-3}} \end{pmatrix} \end{bmatrix}$$

เทียบพหุนามกับรูปทั่วไปของเมตริกซ์การส่งผ่าน N อันดับ Φ_{N0} ในภาคผนวก ก จะได้

$$A_3(z) = 1 - y_0 y_1 e^{j\phi_1 z^{-1}} - y_1 y_2 e^{j\phi_2 z^{-1}} + y_0 y_2 e^{j(\phi_1 + \phi_2) z^{-2}} - y_2 y_3 e^{j\phi_3 z^{-1}} + y_0 y_1 y_2 y_3 e^{j(\phi_1 + \phi_3) z^{-2}} \\ + y_1 y_3 e^{j(\phi_2 + \phi_3) z^{-2}} - y_0 y_3 e^{j(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3) z^{-3}}$$

$$B_3(z) = y_3 - y_0 y_1 y_3 e^{j\phi_1} z^{-1} - y_1 y_2 y_3 e^{j\phi_2} z^{-1} + y_0 y_2 y_3 e^{j(\phi_1 + \phi_2)} z^{-2} - y_2 e^{j\phi_3} z^{-1} + y_0 y_1 y_2 e^{j(\phi_1 + \phi_3)} z^{-2} \\ + y_1 e^{j(\phi_2 + \phi_3)} z^{-2} - y_0 e^{j(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3)} z^{-3}$$

$$A_3^R(z) = -y_0 y_3 + y_1 y_3 e^{j\phi_1} z^{-1} + y_0 y_1 y_2 y_3 e^{j\phi_2} z^{-1} - y_2 y_3 e^{j(\phi_1 + \phi_2)} z^{-2} + y_0 y_2 e^{j\phi_3} z^{-1} - y_1 y_2 e^{j(\phi_1 + \phi_3)} z^{-2} \\ - y_0 y_1 e^{j(\phi_2 + \phi_3)} z^{-2} + e^{j(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3)} z^{-3}$$

$$B_3^R(z) = -y_0 + y_1 e^{j\phi_1} z^{-1} + y_0 y_1 y_2 e^{j\phi_2} z^{-1} - y_2 e^{j(\phi_1 + \phi_2)} z^{-2} + y_0 y_2 y_3 e^{j\phi_3} z^{-1} - y_1 y_2 y_3 e^{j(\phi_1 + \phi_3)} z^{-2} \\ - y_0 y_1 y_3 e^{j(\phi_2 + \phi_3)} z^{-2} + y_3 e^{j(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3)} z^{-3}$$

และจาก $y_n = \sqrt{1 - K_n} \Rightarrow y_0 = \sqrt{1 - K_0}, y_1 = \sqrt{1 - K_1}, y_2 = \sqrt{1 - K_2}, y_3 = \sqrt{1 - K_3}$
ฟังก์ชันถ่ายโอนของอินพุท E_{i1} และไม่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสคือ

พอร์ตส่งผ่าน :

$$\frac{E_{i1}}{E_{il}} = \frac{\left(\begin{aligned} &\sqrt{1-K_0} - \sqrt{1-K_1}z^{-1} - \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_1}\sqrt{1-K_2}z^{-1} + \sqrt{1-K_2}z^{-2} - \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_2}\sqrt{1-K_3}z^{-1} \\ &+ \sqrt{1-K_1}\sqrt{1-K_2}\sqrt{1-K_3}z^{-2} + \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_1}\sqrt{1-K_3}z^{-2} - \sqrt{1-K_3}z^{-3} \end{aligned} \right)}{\left(\begin{aligned} &1 - \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_1}z^{-1} - \sqrt{1-K_1}\sqrt{1-K_2}z^{-1} + \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_2}z^{-2} - \sqrt{1-K_2}\sqrt{1-K_3}z^{-1} \\ &+ \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_1}\sqrt{1-K_2}\sqrt{1-K_3}z^{-2} + \sqrt{1-K_1}\sqrt{1-K_3}z^{-2} - \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_3}z^{-3} \end{aligned} \right)}$$

พอร์ตครีโอล :

$$\frac{E_{i2}}{E_{il}} = \frac{z^{-3/2} \sqrt{K_0 K_1 K_2 K_3}}{\left(\begin{aligned} &1 - \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_1}z^{-1} - \sqrt{1-K_1}\sqrt{1-K_2}z^{-1} + \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_2}z^{-2} - \sqrt{1-K_2}\sqrt{1-K_3}z^{-1} \\ &+ \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_1}\sqrt{1-K_2}\sqrt{1-K_3}z^{-2} + \sqrt{1-K_1}\sqrt{1-K_3}z^{-2} - \sqrt{1-K_0}\sqrt{1-K_3}z^{-3} \end{aligned} \right)}$$

ประวัติผู้เขียน

นายประจักษ์ แซ่เอ็ง เกิดวันที่ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2517 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ในปีการศึกษา 2540 หลังจากการศึกษาเข้าทำงานในบริษัทเอกชนได้ 5 ปี ก็เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พร้อมกับทำงานควบคู่ไปด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้