

การศึกษาสมบัติโพรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบอสมมาตรด้วยวิธีเมทริกซ์

A STUDY OF ASYMMETRIC RING RESONATORS
USING A MATRIX METHOD

นรงค์ สังกวาระ
NARONG SANGWARA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2530-3

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาสมบัติโพรงคลื่นพ้องวงแหวนแบบอสมมาตรด้วยวิธีเมทริกซ์

A STUDY OF ASYMMETRIC RING RESONATORS
USING A MATRIX METHOD

ณรงค์ สังวาระ

NARONG SANGWARA

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 63482
วัน,เดือน,ปี..... 29 ส.ค. 2549

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974 - 15 - 2530 - 3

**A STUDY OF ASYMMETRIC RING RESONATORS
USING A MATRIX METHOD**

NARONG SANGWARA

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

ISBN 974 - 15 - 2530 - 3

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาสมบัติโพรงสันห้องวงแหวนแบบอสมมาตร ด้วยวิธีเมทริกซ์
นักศึกษา	นายณรงค์ สัจวาระ
รหัสประจำตัว	46063505
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ปรีชา อุพาพิน

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของโพรงสันห้องวงแหวนคู่ที่มีรัศมีแบบสมมาตรและแบบอสมมาตร เริ่มต้นจากการออกแบบและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโพรงสันห้องวงแหวนคู่ที่มีรัศมีระดับไมโครเมตร โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบเมทริกซ์ ซึ่งผลที่ได้คือความสัมพันธ์ของฟังก์ชันการถ่ายโอนของพอร์ตส่งผ่านและพอร์ตครีโปกกับพอร์ตอินพุต ในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์สเปกตรัมของการส่งผ่านที่เป็นฟังก์ชันกับความยาวคลื่น โดยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของโพรงสันห้องวงแหวนคู่ เช่น รัศมีของวงแหวน สัมประสิทธิ์การคัปปลิงและสัมประสิทธิ์การลดทอน นอกจากนี้ยังพบว่าการปรับปรุงช่องห่างสัญญาณความยาวคลื่นสามารถทำได้โดยการใช้รัศมีแบบอสมมาตร จากผลการศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวกรองสัญญาณความยาวคลื่นแสง

Thesis Title	A Study of Asymmetric Ring Resonators Using A Matrix Method
Student	Narong Sangwara
Student ID	46063505
Degree	Master of Science
Programme	Applie Physics
Year	2005
Thesis Advisor	Assc.Prof.Dr.Preecha Yupapin

ABSTRACT

This research is a simulation of symmetric and asymmetric double ring resonator (DRR). First the micro ring resonator was designed using matrix method. This resulted in relation transfer function between throughput port and drop port. The parameters of DRR such as radius coupling factor, intensity attenuation coefficient and transmission signal spectrum in term of wavelength were analyzed. The results showed that, the free spectral range (FSR) could be improved by varying radius. Results of this study are able to be applied as Add/Drop filters for signal transmission.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก รศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณผู้ปกครองและเด็กนักเรียนบ้านต้นกล้าที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ณรงค์ สัจจวาระ

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.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 วิธีดำเนินการทำวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย.....	5
2.1 การมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสง.....	5
2.1.1 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่.....	6
2.1.2 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา.....	7
2.1.3 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น.....	7
2.2 ตัวกรองสัญญาณแสง.....	10
2.3 การแยกความยาวคลื่นโดยใช้แฟบริ-เพอโรต์ อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Fabry-Perot interferometer : FPI).....	13
2.4 ความเป็นมาของโครงสร้างโพรงวงแหวน.....	17
2.5 โครงสร้างโพรงวงแหวนเดี่ยว.....	19
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	26
3.1 โครงสร้างโพรงวงแหวนคู่ (Double ring resonator:DRR).....	26
3.1.1 โครงสร้างโพรงวงแหวนคู่ที่มีรัศมีสมมาตร.....	26
3.1.2 โครงสร้างโพรงวงแหวนคู่ที่มีรัศมีอสมมาตร.....	27
3.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างโพรงวงแหวนคู่ ที่มีรัศมีระดับไมโครเมตร.....	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายห่วงวงแหวนคู่.....	31
4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง.....	31
4.2 การเทียบสอบแบบจำลองที่ใช้ในการจำลอง.....	32
4.2.1 การจำลองโครงข่ายห่วงวงแหวนคู่แบบสมมาตร.....	32
4.2.2 การจำลองโครงข่ายห่วงวงแหวนคู่แบบอสมมาตร.....	32
4.3 การตอบสนองของโครงข่ายห่วงวงแหวนคู่แบบสมมาตรและอสมมาตร.....	34
4.3.1 การเปลี่ยนแปลงรัศมีของโครงข่ายห่วงวงแหวนคู่ แบบสมมาตร ($R_1 = R_2$) และอสมมาตร ($R_1 \neq R_2$).....	34
4.3.2 การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงแสงของโครงข่าย ห่วงวงแหวนคู่แบบอสมมาตร ($R_1 \neq R_2$).....	42
4.3.3 การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ของการลดทอนความเข้มแสงของ โครงข่ายห่วงวงแหวนคู่แบบอสมมาตร ($R_1 \neq R_2$).....	43
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	45
บรรณานุกรม.....	47
ภาคผนวก.....	49
ภาคผนวก ก.....	50
ประวัติผู้เขียน.....	67

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองระบบ.....	31
4.2 แสดงพารามิเตอร์ของตัวกรอง DRR ($R_1 = R_2$) ที่ FSR = 40 GHz.....	34
4.3 แสดงพารามิเตอร์ของตัวกรอง DRR ($R_1 \neq R_2$) ที่ FSR = 40 GHz.....	35
4.4 แสดงพารามิเตอร์ของตัวกรอง DRR ($R_1 = R_2$) ที่ FSR = 100 GHz.....	36
4.5 แสดงพารามิเตอร์ของตัวกรอง DRR ($R_1 \neq R_2$) ที่ FSR = 100 GHz.....	37
4.6 แสดงพารามิเตอร์ของตัวกรอง DRR ($R_1 = R_2$) ที่ FSR = 200 GHz.....	38
4.7 แสดงพารามิเตอร์ของตัวกรอง DRR ($R_1 \neq R_2$) ที่ FSR = 200 GHz.....	39
4.8 แสดงพารามิเตอร์ของตัวกรอง DRR ($R_1 = R_2$).....	40
4.9 แสดงพารามิเตอร์ของตัวกรอง DRR ($R_1 \neq R_2$).....	41

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของระบบสื่อสาร โทรคมนาคม.....	2
2.1 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่.....	7
2.2 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลา.....	7
2.3 แสดงรูปแบบการส่งสัญญาณ ในการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่หรือความยาวคลื่น(a) และแบบแบ่งเวลา(b) โดยที่ T คือเวลาที่มีการส่งบิตข้อมูลในการสื่อสาร.....	8
2.4 แสดงการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น เมื่อ WDM แทนการมัลติเพล็กซ์ ความยาวคลื่น และ WDD แทนการดีมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่น.....	9
2.5 เกรตติงชนิดแบนราบ.....	10
2.6 อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดแฟบริ-เพอร์โรต์.....	11
2.7 เกรตติงใยแก้วนำแสงแบบแบรกก์.....	11
2.8 การบรรจุเกรตติงที่นำคลื่นแถวลำดับ.....	12
2.9 Mach-Zehnder interferometer.....	12
2.10 แสดงการการเกิดสะท้อนกลับภายในFPI.....	13
2.11 แสดงขนาดของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการสะท้อนไปกลับภายในFPI.....	14
2.12 แสดงฟังก์ชันการส่งผ่านกำลังแสงของ FPI.....	15
2.13 แสดงการกรองสัญญาณสำหรับการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น.....	16
(a) ฟังก์ชันการส่งผ่านกำลังของตัวกรองความถี่	
(b) สัญญาณที่ถูกมัลติเพล็กซ์และส่งเข้าสู่ตัวกรอง	
(c) กำลังเอาต์พุทของสัญญาณช่องต่าง ๆ	
2.14 โพรงสั้นพ้องวงแหวนที่เป็นตัวกรองครีโปป้องสัญญาณ.....	18
2.15 (a) การคับปลิงในแนวตั้ง (b) การคับปลิงทางด้านข้าง.....	18
2.16 SRR ที่มีท่อนำคลื่น 2 ท่อ เพื่อประยุกต์ใช้เป็นตัวกรองสัญญาณแฉีก/ครีโปป.....	19
2.17 คุณสมบัติของสเปกตรัมการส่งผ่านของโพรงสั้นพ้องวงแหวนเดี่ยว.....	23
2.18 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์ x สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน α ที่กำหนด.....	24
3.1 แสดงภาพโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่ที่มีรัศมีเท่ากัน ($r_1 = r_2$).....	26
3.2 แสดงภาพโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่ที่มีรัศมีแตกต่างกัน ($r_1 \neq r_2$).....	27
3.3 แสดงทางเดินแสงของโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่.....	28
4.1 ผลการตอบสนองรูปสี่เหลี่ยมของ DRR ที่ $R_{1,2} = 134 \mu m$	32

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 DRR ที่ $R_1 = 274 \mu\text{m}$, $R_2 = 342 \mu\text{m}$, $\alpha_{\text{Ring1}} = \alpha_{\text{Ring2}} = 0.1 \text{ dB cm}^{-1}$, $\kappa_0 = \kappa_2 = 0.57$, $\kappa_1 = 0.2$ และ $\text{FSR} = 200 \text{ GHz}$	33
4.3 DRR ที่ $R_1 = 2.296 \text{ mm}$, $R_2 = 2.642 \text{ mm}$, $\alpha_{\text{Ring1}} = \alpha_{\text{Ring2}} = 0.1 \text{ dB cm}^{-1}$, $\kappa_0 = \kappa_2 = 0.35$, $\kappa_1 = 0.652$ และ $\text{FSR} = 100 \text{ GHz}$	33
4.4 ผลการตอบสนองรูปสี่เหลี่ยมของ DRR ที่ $R_{1,2} = 345 \mu\text{m}$ และ $\text{FSR} = 40 \text{ GHz}$	34
4.5 DRR ที่ $R_1 = 2422.8 \mu\text{m}$, $R_2 = 2766.8 \mu\text{m}$, $\alpha_{\text{Ring1}} = \alpha_{\text{Ring2}} = 0 \text{ dB cm}^{-1}$, $\kappa_0 = 0.5$, $\kappa_1 = 0.13$, $\kappa_2 = 0.5$ และ $\text{FSR} = 40 \text{ GHz}$	35
4.6 ผลการตอบสนองรูปสี่เหลี่ยมของ DRR ที่ $R_{1,2} = 138 \mu\text{m}$ และ $\text{FSR} = 100 \text{ GHz}$	36
4.7 DRR ที่ $R_1 = 966 \mu\text{m}$, $R_2 = 1104.5 \mu\text{m}$, $\alpha_{\text{Ring1}} = \alpha_{\text{Ring2}} = 0 \text{ dB cm}^{-1}$, $\kappa_0 = 0.5$, $\kappa_1 = 0.13$, $\kappa_2 = 0.5$ และ $\text{FSR} = 100 \text{ GHz}$	37
4.8 ผลการตอบสนองรูปสี่เหลี่ยมของ DRR ที่ $R_{1,2} = 69 \mu\text{m}$ และ $\text{FSR} = 200 \text{ GHz}$	38
4.9 DRR ที่ $R_1 = 274 \mu\text{m}$, $R_2 = 342 \mu\text{m}$, $\alpha_{\text{Ring1}} = \alpha_{\text{Ring2}} = 0 \text{ dB cm}^{-1}$, $\kappa_0 = 0.5$, $\kappa_1 = 0.13$, $\kappa_2 = 0.5$ และ $\text{FSR} = 200 \text{ GHz}$	39
4.10 ผลการตอบสนองรูปสี่เหลี่ยมของ DRR ที่ $R_{1,2} = 1 \text{ km}$	40
4.11 DRR ที่ $R_1 = 1 \text{ km}$, $R_2 = 2 \text{ km}$, $\alpha_{\text{Ring1}} = \alpha_{\text{Ring2}} = 0 \text{ dB cm}^{-1}$, $\kappa_0 = \kappa_2 = 0.5$, $\kappa_1 = 0.13$	41
4.12 ผลจำลองสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงแสง DRR $R_1 = 2422.8 \mu\text{m}$, $R_2 = 2766.8 \mu\text{m}$, $\alpha_{\text{Ring1}} = \alpha_{\text{Ring2}} = 0 \text{ dB cm}^{-1}$, $\kappa_0 = \kappa_2 = 0.5$ (a) $\kappa_1 = 0.2$, (b) $\kappa_1 = 0.4$, (c) $\kappa_1 = 0.6$	42
4.13 ผลจำลองสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงแสง DRR $R_1 = 966 \mu\text{m}$, $R_2 = 1106.5 \mu\text{m}$, $\alpha_{\text{Ring1}} = \alpha_{\text{Ring2}} = 0 \text{ dB cm}^{-1}$, $\kappa_0 = \kappa_2 = 0.5$ (a) $\kappa_1 = 0.2$, (b) $\kappa_1 = 0.4$, (c) $\kappa_1 = 0.6$	42
4.14 ผลจำลองสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงแสง DRR $R_1 = 274 \mu\text{m}$, $R_2 = 342 \mu\text{m}$, $\alpha_{\text{Ring1}} = \alpha_{\text{Ring2}} = 0 \text{ dB cm}^{-1}$, $\kappa_0 = \kappa_2 = 0.5$ (a) $\kappa_1 = 0.2$, (b) $\kappa_1 = 0.4$, (c) $\kappa_1 = 0.6$	43
4.15 ผลจำลองการลดทอนสัญญาณอินพุทของ DRR ที่ $R_1 = 2422.8 \mu\text{m}$, $R_2 = 2766 \mu\text{m}$, $\kappa_0 = \kappa_2 = 0.5$, $\kappa_1 = 0.13$ (a) $\alpha = 0 \text{ dB cm}^{-1}$ (b) $\alpha = 0.1 \text{ dB cm}^{-1}$ (c) $\alpha = 0.51 \text{ dB cm}^{-1}$	43
4.16 ผลจำลองการลดทอนสัญญาณอินพุทของ DRR ที่ $R_1 = 966 \mu\text{m}$, $R_2 = 1104.5 \mu\text{m}$, $\kappa_0 = \kappa_2 = 0.5$, $\kappa_1 = 0.13$ (a) $\alpha = 0 \text{ dB cm}^{-1}$ (b) $\alpha = 0.1 \text{ dB cm}^{-1}$ (c) $\alpha = 0.5 \text{ dB cm}^{-1}$	44

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ผลจำลองการลดทอนสัญญาณอินพุทของ DRR ที่ $R_1 = 274 \mu m$, $R_2 = 342 \mu m$, $\kappa_0 = \kappa_2 = 0.5$, $\kappa_1 = 0.13$ (a) $\alpha = 0 \text{ dB cm}^{-1}$ (b) $\alpha = 0.1 \text{ dB cm}^{-1}$ (c) $\alpha = 1 \text{ dB cm}^{-1}$	44

บทที่ 1

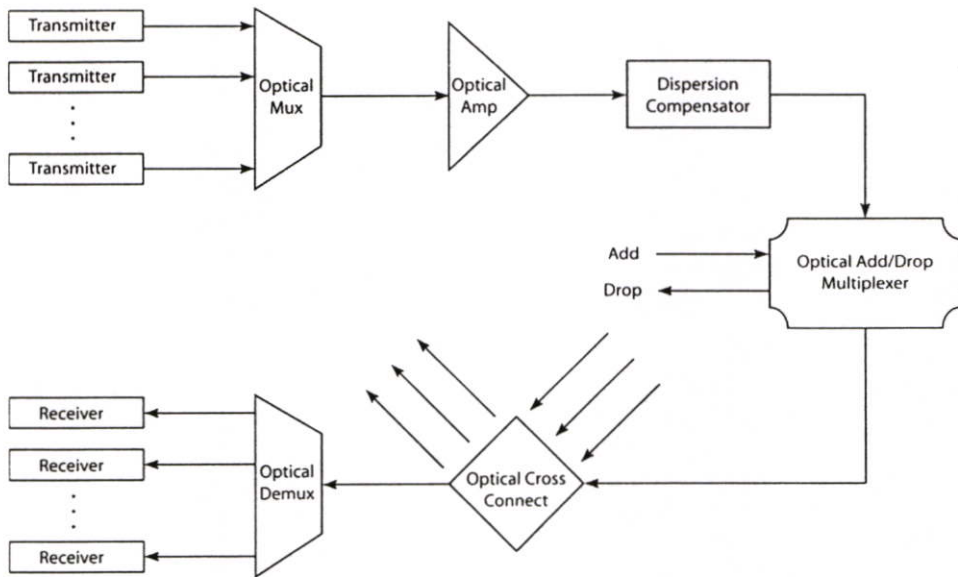
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

การรับส่งข้อมูลขนาดใหญ่กำลังเป็นที่ต้องการสำหรับสังคมที่ต้องการความเร่งรีบและธุรกิจที่มีการแข่งขันสูง จึงทำให้ระบบโครงข่ายสื่อสารในปัจจุบันและอนาคตจึงต้องให้ความสำคัญกับระบบสื่อสารทางแสงที่ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นที่หนาแน่น (Dense Wavelength Division Multiplexing : DWDM) ซึ่งพัฒนามาจากระบบสื่อสารทางแสงด้วยเส้นใยแก้วที่แต่เดิมใช้เพียงเส้นเดียวหรือแสงที่มีความยาวคลื่นที่มีเพียงค่าเดียว เรียกว่า การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing : WDM) มักนิยมใช้แสงที่มีความยาวคลื่น 1.33 หรือ 1.55 ไมโครเมตร แทนช่องสัญญาณอิสระรวมกัน ทางแสงแล้วส่งไปในเส้นใยแก้วเส้นเดียวกัน ซึ่งวิธีนี้ทำให้ไม่สามารถเพิ่มช่องสัญญาณที่อยู่ในเทอมของความยาวคลื่นแสงได้มากนัก เพราะแสงในแต่ละช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่างกันมากจะมีค่าการลดทอนสัญญาณไม่เท่ากัน ทำให้ระยะทางสูงสุดที่สามารถส่งข้อมูลได้ ไม่เท่ากันด้วย ซึ่งในระบบสื่อสารทางไกลมาก ๆ ต้องใช้สถานีทวนสัญญาณ (Repeater) แยกกันสำหรับแต่ละความยาวคลื่นเป็นผลทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น และระบบมีความยุ่งยาก การแก้ปัญหาทำได้โดยเลือกช่องสัญญาณให้มีค่าความยาวคลื่นแสงใกล้ ๆ กัน โดยเป็นแสงในช่วงของหน้าต่าง ความยาวคลื่นแสงค่าหนึ่ง เช่น ในปัจจุบัน มักจะเลือกหน้าต่างความยาวคลื่นแสงในช่วง 1.55 ไมโครเมตร และความยาวคลื่นแสงของแต่ละช่องสัญญาณจะมีช่วงห่างกัน (Channel spacing) ไม่มากอาจไม่ถึง 1 ไมโครเมตร หรือมากกว่า 1 ไมโครเมตรเล็กน้อย เช่น ระบบ DWDM ระบบหนึ่งมี 8 ช่องสัญญาณ อาจประกอบไปด้วยความยาวคลื่นแสง 1550, 1551, 1552, ..., 1557 ไมโครเมตร ซึ่งหมายถึงมีช่องห่างสัญญาณ เท่ากับ 1 ไมโครเมตร เป็นต้น การกำหนดให้ช่วงห่างสัญญาณมีค่าน้อย ๆ หมายถึงการเพิ่มโอกาสให้มีอัตราการส่งข้อมูลหรือบิตเรต (Bit Rate) เพิ่มมากขึ้นด้วย

โครงสร้างพื้นฐานโดยรวมของระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วแบบ DWDM อาจสรุปเป็นบล็อกหลัก ๆ ได้ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งเป็นระบบสื่อสารแบบทางเดียว (Simplex) เริ่มจากตัวส่งผ่าน (Transmitter) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนข้อมูลไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสงแล้วส่งเข้าเส้นใยแก้ว ตัวส่งผ่านหนึ่งชุดจะส่งแสงออกมา 1 ความยาวคลื่น ถือเป็น 1 ช่องสัญญาณ ซึ่งข้อมูลแสงหนึ่งช่องสัญญาณนี้อาจถูกมัลติเพล็กซ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ให้มีบิตเรตสูงมาก ๆ เช่น 2.5 Gb/s หรือ 10 Gb/s จากนั้นแสงทุกช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่างกัน จะถูกรวมเข้าด้วยกันโดยกระบวนการทางแสงด้วยการมัลติเพล็กซ์แสง (Optical Multiplexer : Mux) เพื่อส่งไปยังปลายทางด้านเส้นใยแก้วเพียงเส้นเดียว

ข้อมูลที่เดินทางในระหว่างเส้นทางจะถูกลดทอนสัญญาณทำให้แสงมีค่าความเข้มลดลง จึงต้องมีสถานีทวนสัญญาณที่เป็น ตัวขยายสัญญาณแสง (Optical Amplifier) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณแสงทุกช่องสัญญาณพร้อมกัน ให้มีความเข้มแสงมากพอที่จะเดินทางต่อไปไกล ๆ ได้ ข้อมูลสัญญาณที่ส่งในระบบเป็นสัญญาณข้อมูลแบบดิจิทัลในลักษณะของพัลส์ข้อมูล ซึ่งสัญญาณพัลส์ที่เดินทางในเส้นใยแก้วจะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการกระจาย (Dispersion) ทำให้สัญญาณพัลส์เกิดการบานออกผลลัพธ์คือเป็นตัวจำกัดปริมาณข้อมูลหรือบิตเรตสูงสุดของระบบลดลง ดังนั้นระบบ DWDM จึงต้องมีอุปกรณ์ตัวชดเชยการกระจาย (Dispersion Compensator) เพื่อทำหน้าที่ปรับขนาดของพัลส์ที่บานออกให้มีขนาดคงที่ตลอดการเดินทางอยู่เสมอ



รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของระบบสื่อสารโทรคมนาคม

ในระบบโครงข่ายสื่อสารขนาดใหญ่ที่มีประสิทธิภาพ นิยมใช้ระบบ SDH/SONET (Synchronous Digital Hierarchy / Synchronous Optical Network) [1] ที่ใช้เส้นใยแก้วในระบบสายส่ง ระบบนี้สามารถส่งข้อมูลด้วยความเร็วหลายระดับ โครงข่ายจะถูกจัดให้มีโครงสร้างเป็น ลูป (Loop) หรือวงแหวน (Ring) โดยในช่วงระหว่างสถานี ระบบสามารถขยายการติดต่อเข้ากับสถานีอื่นได้ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Optical Add/Drop หรือ OADM (Optical Add/Drop Multiplexer) สถานีสื่อสารบางสถานีทำหน้าที่เป็นชุมสายขนาดใหญ่ จะต้องมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตัดต่อหรือเลือกเส้นทางของทางเดินข้อมูลในระบบให้ไปสู่ปลายทางอื่น ๆ ในโครงข่ายที่ซับซ้อนได้ อุปกรณ์นี้เรียกว่า Cross Connect ซึ่งในระบบ DWDM ก็จะมีอุปกรณ์ตัวนี้เหมือนกันแต่ทำงานในเชิงแสงทั้งหมดเรียกว่า Optical Cross Connect หรือ OXC (ตัว X หมายถึง cross กัน) เมื่อข้อมูลเดินทางถึงปลายทาง สัญญาณแสงที่รวมทุกช่องสัญญาณมาก็จะถูกแยกออกให้เป็นช่องสัญญาณเดี่ยวตามความยาวคลื่นแสงด้วยอุปกรณ์เชิงแสงที่เรียกว่า Optical Demultiplexer

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่ที่มีรัศมีแบบสมมาตรและแบบอสมมาตร เริ่มต้นจากการออกแบบและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่ที่มีรัศมีระดับไมโครเมตร โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบเมทริกซ์ ซึ่งผลที่ได้คือความสัมพันธ์ของฟังก์ชันการถ่ายโอนของพอร์ตส่งผ่านและพอร์ตครีโปปเทียบกับพอร์ตอินพุต ในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์สเปกตรัมของ การส่งผ่านที่เป็นฟังก์ชันกับความยาวคลื่น โดยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่ เช่น รัศมีของวงแหวน สัมประสิทธิ์การคัปปลิงและสัมประสิทธิ์การลดทอน นอกจากนี้ยังพบว่า การปรับปรุงช่องห่างสัญญาณความยาวคลื่น สามารถทำได้โดยการเลือกใช้วงแหวนคู่ที่มีรัศมีแบบอสมมาตร จากผลการศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวกรองสัญญาณความยาวคลื่นแสง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาคุณลักษณะของโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่แบบวงแหวนคู่แบบอสมมาตร
2. เพื่อออกแบบและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่ที่มีรัศมีระดับไมโครเมตร
3. เพื่อออกแบบและกำหนดคุณลักษณะการกรองสัญญาณแสงของโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่ ด้วยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของโพรงสั้นพ้อง
4. เปรียบเทียบความสามารถในการกรองของโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนคู่ ระหว่างสมมาตรและอสมมาตร

1.3 ขอบเขตของการทำวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนคู่ที่มีรัศมีแบบสมมาตรและอสมมาตร โดยทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในรูปฟังก์ชันการถ่ายโอนของตัวกรองโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนคู่ที่มีรัศมีระดับไมโครเมตร โดยใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนความเข้มสนามไฟฟ้าที่พอร์ตส่งผ่านและพอร์ตครีโปปเทียบกับพอร์ตอินพุต ในการแสดงฟังก์ชันถ่ายโอน จะใช้การวิเคราะห์แบบเมทริกซ์ ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้เป็นตัวแสดงถึงคุณลักษณะการส่งผ่านหรือการกรองความยาวคลื่นแสงได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจหลักการพื้นฐานทางแสง การซ้อนทับของคลื่น การแทรกสอดของแสง
2. เข้าใจโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนคู่ที่มีรัศมีแบบสมมาตรและอสมมาตร

3. สามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างห้องวงแหวนคู่ให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด
4. สามารถประยุกต์โครงสร้างห้องวงแหวนคู่สำหรับงานด้านการสื่อสารได้

1.5 วิธีดำเนินการทำวิทยานิพนธ์

แผนการดำเนินการแบ่งเป็นขั้นตอน ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาหลักการพื้นฐานทางแสง การซ้อนทับกันของคลื่น การแทรกสอดของแสงรวมถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่อาศัยหลักการทางแสง
- ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาสมบัติของใยแก้วนำแสง การประยุกต์ใช้ใยแก้วนำแสงในเครือข่ายทางแสงการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น ตัวกรองสัญญาณแสง แอ็ด/ครีอ์ป
- ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาบทความที่มีการประยุกต์ใช้โครงสร้างห้องวงแหวนคู่ระดับไมโครเมตรเป็นตัวกรองสัญญาณแสง ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีเมทริกซ์
- ขั้นตอนที่ 4 ออกแบบโครงร่างโครงสร้างห้องวงแหวนคู่ที่สมมาตรและอสมมาตร หาความสัมพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปของสนามไฟฟ้าและความเข้มสนามไฟฟ้า
- ขั้นตอนที่ 5 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างห้องวงแหวนคู่ที่ได้ในขั้นตอน ที่ 4 และประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เปรียบเทียบผลที่ได้
- ขั้นตอนที่ 6 วิเคราะห์ผลที่ได้เพื่อหาคุณลักษณะการกรองที่ต้องการ
- ขั้นตอนที่ 7 สรุปการทำวิทยานิพนธ์และแนวทางในการพัฒนาต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิจัยและพื้นฐานของ
โครงข่ายไฟฟ้าที่มีรีซิสแบบสมมาตรและอสมมาตร ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการ
การมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสง ตัวกรองสัญญาณแสงการแยกความยาวคลื่น โดยใช้แฟบริ-เพอโรต์
อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ ความเป็นมาของโครงข่ายไฟฟ้าโครงข่ายไฟฟ้าโครงข่ายไฟฟ้า เพื่อสร้าง
ความเข้าใจพื้นฐานสำหรับการศึกษาในบทต่อไป

2.1 การมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสง

การมัลติเพล็กซ์เชิงแสงสำหรับกรณีทั่ว ๆ ไป เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกลงบน
อุปกรณ์รับแสง สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [2]

$$P(t) = \frac{1}{2} P_0 (1 + \cos 4\pi\nu_0 t) \quad (2.1)$$

เมื่อ t คือ เวลาที่มีหน่วยเป็นวินาที
 P_0 และ $P(t)$ คือ กำลังส่องสว่างที่ขณะเริ่มต้นและเวลาใด ๆ มีหน่วยเป็นวัตต์
 ν_0 คือ ความถี่ของแหล่งกำเนิดแสงมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์

การมัลติเพล็กซ์เป็นการผสมสัญญาณหลายสัญญาณเข้าด้วยกัน ในที่นี้พิจารณาการผสมสัญญาณแสง
สองความยาวคลื่น หรือสองความถี่ โดยที่พิจารณาแหล่งกำเนิดแสงสองความถี่เป็น ν_1 และ ν_2 แล้ว
กำหนดความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$E_1(t) = E_{01} \cos(2\pi\nu_1 t) \quad (2.2)$$

$$E_2(t) = E_{02} \cos(2\pi\nu_2 t) \quad (2.3)$$

และสัญญาณที่เกิดจากการรวมกันจากทั้งสองแหล่งที่รับได้บนอุปกรณ์รับสัญญาณเขียนได้เป็น

$$I(t) = E_{01} E_{02} \cos(2\pi(\nu_1 - \nu_2) t) \quad (2.4)$$

เมื่อกำหนดให้ที่เวลาใด ๆ

$E_1(t)$ และ $E_2(t)$	คือ	สนามไฟฟ้าของแสงที่ความถี่ที่ 1 และ
E_{01} และ E_{02}	คือ	แอมพลิจูดที่ความถี่ที่ 1 และ 2
ν_1 และ ν_2	คือ	ความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ 1 และ 2
$\nu_1 - \nu_2$	คือ	สัญญาณบีต

สำหรับกรณีที่มีการมอดูเลตสัญญาณ โดย $m(t)$ เป็นฟังก์ชันของการมอดูเลตแล้ว ความสัมพันธ์ของการมอดูเลตเชิงความเข้มเขียนได้เป็น

$$E_1(t) = m_1(t) E_{01} \cos(2\pi\nu_1 t) \quad (2.5)$$

$$E_2(t) = E_{02} \cos(2\pi\nu_2 t) \quad (2.6)$$

และสัญญาณรวมคือ

$$E_{01} E_{02} m(t) \cos(2\pi(\nu_1 - \nu_2)t) \quad (2.7)$$

ในกรณีทั่วไปของการรวมสัญญาณจะมีแหล่งกำเนิดสัญญาณเป็น n แหล่งกำเนิดที่มีความถี่ $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \dots, \nu_n$ ถ้ากำหนดให้สนามไฟฟ้าที่ i^{th} ที่เวลาใด ๆ คือ

$$E_i(t) = m_i(t) \cos(2\pi\nu_i t) \quad (2.8)$$

ความเข้มของสัญญาณแสงที่รับได้ด้วยอุปกรณ์รับแสงคือ

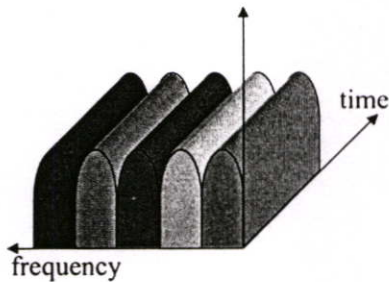
$$I(t) \propto E_i(t) E_i^*(t) \quad (2.9)$$

เมื่อ $E_i(t)$ คือค่าสนามไฟฟ้าเชิงซ้อน ซึ่งสามารถรับได้โดยใช้อุปกรณ์รับสัญญาณในระบบสื่อสารที่ต้องการส่งข่าวสารจำนวนมาก ๆ พร้อมกัน มักใช้วิธีการที่เรียกว่ามัลติเพลกซิง คือ การส่งสัญญาณข่าวสารหลาย ๆ สัญญาณภายใต้พาหะตัวเดียวกัน แบ่งเป็นหลักใหญ่ 3 แบบคือ

2.1.1 การมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความถี่

การมัลติเพลกซ์แบบแบ่งช่วงความถี่หรือเอฟดีเอ็ม (FDM: Frequency Division Multiplexing) วิธีการนี้จะอาศัยการมอดูเลตสัญญาณมาช่วยในการย้ายสเปกตรัมของสัญญาณที่ต้องการจะส่งแต่ละสัญญาณรวมกันไปในนั้นให้เลื่อนไปอยู่ในย่านความถี่ที่ไม่ซ้อนทับกันดังแสดงในรูปที่ 2.1 ทั้งนี้เพื่อให้การใช้สเปกตรัมของแต่ละสัญญาณนั้นเกิดการรบกวนซึ่งกันและกันในแกนความถี่ โดยสามารถเลือกใช้คลื่นพาหะที่มีความถี่เหมาะสมมาทำการมอดูเลตสัญญาณต่างๆ ที่ต้องการจะส่งรวมกันแต่ละสัญญาณ เพื่อให้สเปกตรัมของสัญญาณที่เกิดขึ้นจากการมอดูเลตนั้นแยกเป็นอิสระต่อกันและกันในแกนความถี่ ทำให้สามารถส่งสัญญาณเหล่านี้รวมกันไปในช่องสัญญาณเดียวกันได้ และเมื่อเราใช้วงจรกรองแถบความถี่ผ่านมาแยกสัญญาณที่รับได้ทางด้านเครื่องรับอย่าง

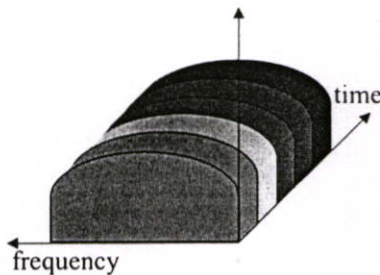
เหมาะสมแล้วจะสามารถแยกสัญญาณเหล่านั้นออกจากกันได้และเมื่อนำสัญญาณที่แยกออกมาไปทำการดีมอดูเลต ก็จะได้ข้อมูลหรือข่าวสารกลับคืนมาส่วนมาก การมัลติเพล็กซ์แบบเอฟดีเอ็มจะนิยมใช้กับการส่งสัญญาณข้อมูลแบบอนาล็อก เช่นระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคแรก ๆ [3-4]



รูปที่ 2.1 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่

2.1.2 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลาหรือทีดีเอ็ม (TDM: Time Division Multiplexing) เป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบหนึ่งที่ทำให้สามารถส่งสัญญาณข้อมูลจำนวนมากว่าหนึ่งสัญญาณไปในช่องการสื่อสารช่องเดียว โดยอาศัยการแบ่งช่วงเวลา (time slot) ในการส่งสัญญาณ ซึ่งสัญญาณข้อมูลแต่ละสัญญาณจะทำการมอดูเลตที่ความถี่เดียวกันแต่ส่งคนละช่วงเวลา จึงทำให้สามารถใช้ช่องสัญญาณช่องเดียวสื่อสารกันได้ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ระบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลานี้นิยมใช้กับการส่งสัญญาณข้อมูลแบบดิจิทัล แต่บางครั้งก็พบได้ในระบบอะนาล็อก เนื่องจากว่าขั้นตอนการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (A/D) และดิจิทัลเป็นสัญญาณอะนาล็อก (D/A) นั้นมีกระบวนการที่ไม่ยุ่งยากนัก



รูปที่ 2.2 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลา

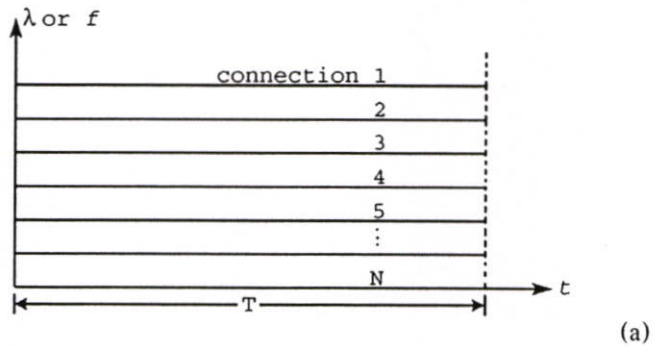
2.1.3 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (wavelength division multiplexing : WDM) คือ การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ในระบบใยแก้วนำแสง เป็นการรวมแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันจำนวนมากให้เดินทางไปในเส้นใยนำแสงหนึ่งเส้นพร้อม ๆ กันในเวลาเดียวกัน โดยสัญญาณข้อมูลจะถูกมอดูเลตเข้ากับแสงแต่ละความยาวคลื่นด้วยวิธีต่าง ๆ กัน และใช้อุปกรณ์

ทางแสงในการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ เช่น คู่ควมแสง เกรตติง ปริซึม ใช้ในการส่งข้อมูลที่มีปริมาณมาก ๆ ด้วยความเร็วสูง

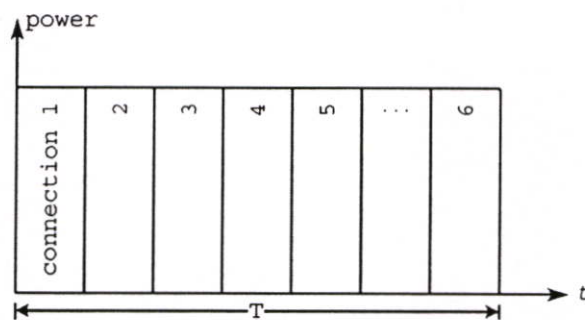
ใยแก้วนำแสงมีความกว้างความถี่สำหรับการสื่อสารสูงมาก เช่นในการสื่อสารที่ใช้ความยาวคลื่นในระดับ $1 \mu\text{s}$ พบว่าจากความสัมพันธ์

$$|\Delta f| \approx \frac{c}{\lambda^2} |\Delta \lambda| \quad (2.10)$$

หากใช้ความยาวคลื่นความกว้าง 100 nm พบว่าความกว้างความถี่ที่สามารถใช้สื่อสารได้มีค่าประมาณ $3 \times 10^{13} \text{ Hz}$ ซึ่งสามารถใช้ส่งสัญญาณโทรทัศน์สามล้านช่องพร้อมๆ กัน แต่เนื่องจากข้อจำกัดของการเกิดการกระจายของแสงและข้อจำกัดของวงจรที่ตอบสนองความถี่เหล่านั้นทำให้มีเพียงบางช่วงของความกว้างความถี่ได้เท่านั้นที่สามารถใช้ได้ การใช้ความยาวคลื่นในความถี่เหล่านั้นส่งสัญญาณไปหลาย ๆ ช่อง เรียกว่าการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น สามารถทำได้โดยการใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน ทำการส่งสัญญาณซึ่งทำการมอดูเลตข้อมูลแต่ละช่องเข้าสู่ใยแก้วในเวลาเดียวกัน

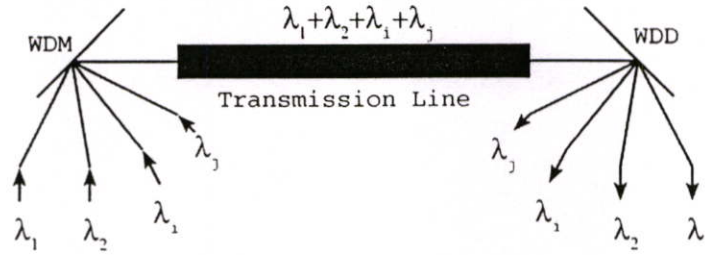


(a)



(b)

รูปที่ 2.3 แสดงรูปแบบการส่งสัญญาณในการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่หรือความยาวคลื่น(a) และแบบแบ่งเวลา(b) โดยที่ T คือเวลาที่มีการส่งบิตข้อมูลในการสื่อสาร



รูปที่ 2.4 แสดงการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น เมื่อ WDM แทนการมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่น และ WDD แทนการดีมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่น

สำหรับด้านผู้รับต้องมีอุปกรณ์สำหรับกรองความยาวคลื่นเพื่อแยกสัญญาณแต่ละช่องออกจากกันแล้วจึงส่งเข้าสู่อุปกรณ์วัดความเข้มแสงเพื่อเก็บข้อมูล หรือใช้การตรวจจับแบบออปติคัลสำหรับแปลค่าข้อมูลต่อไป

ในการมัลติเพล็กซ์เชิงเส้นแล้วส่งไปในสายส่ง สัญญาณจะเกิดการสูญเสียกำลังทางแสงที่ความยาวคลื่น λ_j ดังนี้

$$P_j = 10 \log \left(\frac{P_j}{P_0} \right) \quad (2.11)$$

เมื่อ P_j คือ กำลังแสงที่เข้าไปในสายส่ง

P_0 คือ กำลังแสงก่อนเข้าสายส่ง

P_j คือ กำลังแสงที่สูญเสียมีหน่วยเดซิเบล (dB)

สัญญาณมัลติเพล็กซ์จะมีการรบกวนทางแสงอันเนื่องมาจากผลต่างของความยาวคลื่นหรือการรบกวนทางแสง เรียกว่า “ครอสทอล์ก” โดยที่แต่ละช่องสัญญาณ D_{ij} จะเกิดการรบกวนของช่องสัญญาณ i บนช่องสัญญาณ j คือ

$$D_{ij} = 10 \log \left(\frac{P_{ij}}{P_{jj}} \right) \quad (2.12)$$

เมื่อ P_{ij} คือ กำลังแสงของช่อง j ที่ความยาวคลื่น λ_i ในช่อง j

P_{jj} คือ กำลังแสงของช่อง j ที่ความยาวคลื่น λ_j ในช่อง j

ผลรวมของการรบกวนของสัญญาณจากช่องต่าง ๆ ในช่องสัญญาณ j คือ

$$D_j = 10 \log \left(\sum_{i \neq j} \frac{P_{ij}}{P_{jj}} \right) \quad (2.13)$$

2.2 ตัวกรองสัญญาณแสง

อุปกรณ์ที่สำคัญในการควบคุมแสงในระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น WDM ก็คือตัวกรองสัญญาณแสง สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลักดังนี้

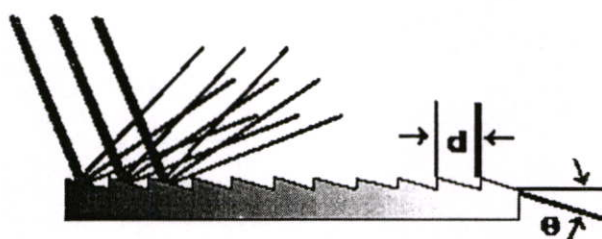
1) Finite impulse response (FIR) / moving average (MA) filters : เป็นฟิลเตอร์ฟิลเตอร์ที่มีเฉพาะลูบแสงป้อนไปข้างหน้า ไม่ต้องอาศัยการป้อนกลับเชิงกลใดๆ นั่นคือ ไม่ต้องอาศัยการสะท้อนกลับทางแสง บางครั้งจะเรียกฟิลเตอร์เหล่านี้ว่า feed-forward ตัวอย่างของฟิลเตอร์ประเภทนี้คือ ฟิลเตอร์ที่ใช้หลัก Mach-Zehnder และ waveguide grating routers (WGRs)

2) Infinite impulse response (IIR) / autoregressive (AR) filters : เป็นฟิลเตอร์ที่โดยธรรมชาติแล้ว จะอาศัยการสะท้อนกลับไปกลับมาหลายๆครั้ง ตัวอย่างของฟิลเตอร์ประเภทนี้จะรวมถึง fiber Bragg gratings (FBGs), thin film filters (TFFs) และ optical all-pass filters (APFs)

ตัวกรองสัญญาณแสงบางชนิดที่ใช้กันทั่วไปมีดังนี้

a) เกรตติงชนิดแบนราบ (plane grating)

เป็นเกรตติงที่ใช้การสะท้อนแสงเหมือนเกรตติงทั่วไป ประกอบด้วยผิวหน้ากระจกที่ถูกเจาะเป็นร่องและมีระยะร่องที่แคบมากดังรูปที่ 2.5 เมื่อมีการฉายแสง แสงจะสะท้อนจากร่องหนึ่งและแทรกสอดกับแสงที่สะท้อนจากร่องหนึ่ง โดยแสงที่สะท้อนจะมีระยะทางเดินแสงที่ต่างกัน ผลก็คือจะทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมและหักล้างกัน ความยาวคลื่นที่ขึ้นอยู่กับผลของการแทรกสอดจะใช้ในการแยกความยาวคลื่นต่างๆที่ตรวจจับได้

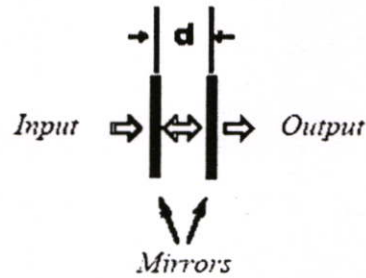


รูปที่ 2.5 เกรตติงชนิดแบนราบ

b) อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดแฟบริ-เพอร์โรต์ (Fabry-Perot interferometer)

หลักการของตัวกรองชนิดนี้เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1898 โดยนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสคือชาร์ล แฟบริ (Charls Fabry) และ อัลเฟรด เพอร์โรต์ (Alfred Perot) ลักษณะการจัดวางแสดง ดังรูปที่ 2.6 ก็คือใช้กระจก 2 แผ่นวางขนานห่างกันเล็กน้อย มีผิวด้านในที่เรียบมากและสะท้อนดีมากด้วยการสะท้อนทำได้โดยฉาบโลหะบางชนิดลงบนแผ่นแก้ว การฉายต้องให้เรียบและบางเพื่อให้แสง

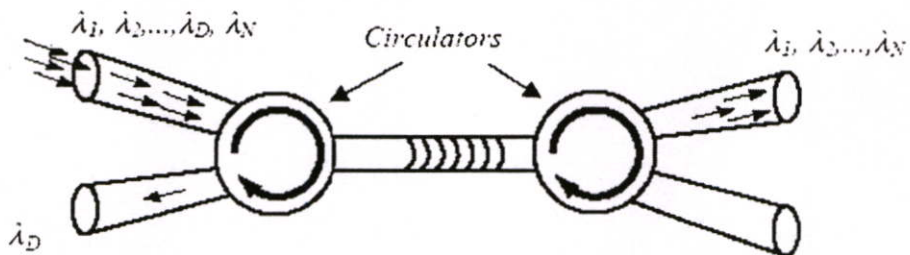
ส่งผ่านได้ด้วย แสงที่ตกกระทบกระจกแผ่นแรกจะเกิดการสะท้อน แต่ก็ยังแสงบางส่วนที่ทะลุผ่านกระจกและเดินทางอยู่ในโพรงระหว่างกระจกทั้งสองแผ่น (ซึ่งอาจจะมีการเติมสารไดอิเล็กทริกบางประเภทเช่น ผลึกเหลว) และเกิดการชนกับกระจกแผ่นที่ 2 ที่กระจกแผ่นที่ 2 นี้แสงจำนวนมากจะเกิดการสะท้อนในขณะที่บางส่วนก็เกิดการทะลุผ่าน แสงที่สะท้อนจะเดินทางย้อนกลับและชนกับกระจกแผ่นที่ 1 ซึ่งแสงบางส่วนก็จะเกิดการสะท้อนกลับและทะลุผ่านอีกครั้ง ผลที่เกิดจะขึ้นอยู่กับระยะห่างและดัชนีหักเหของสารระหว่างกระจก แสงเอาท์พุทที่เกิดจากการแทรกสอดจะเป็นผลรวมของแสงอินพุทที่ถูกหน่วงโดยจำนวนของการสะท้อนในโพรง



รูปที่ 2.6 อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดแฟบริ-เพอร์โรต์

c) เกรตติงใยแก้วนำแสงแบบแบรกก์ (fiber Bragg grating)

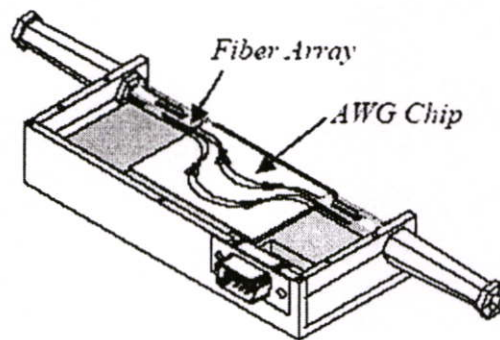
ตัวกรองชนิดนี้ (ดังรูปที่ 2.7) ประกอบด้วยบริเวณที่ดัชนีหักเหของใยแก้วเปลี่ยนแปลงเป็นช่วงๆ ระหว่างสูงและต่ำ เมื่อปล่อยแสงเลเซอร์ย่านอัลตราไวโอเลตเข้าไปในใยแก้วก็จะทำให้เกิดผลึกการแทรกสอดขึ้นเกิดเป็นแถบมืดและสว่างบนเส้นใยแก้ว จะมีแสงเฉพาะบางความยาวคลื่นเท่านั้นที่สอดคล้องกับเงื่อนไขของแบรกก์ ซึ่งที่ค่าความยาวคลื่นแบรกก์จะเกิดการสะท้อนกลับสูงมากซึ่งก็จะสัมพันธ์กับระยะห่างของเกรตติงหรือที่เรียกว่า พิตช์ (Pitch) ในขณะที่ความยาวคลื่นอื่นๆ จะทะลุผ่านหมด



รูปที่ 2.7 เกรตติงใยแก้วนำแสงแบบแบรกก์

d) เกรตติงท่อนำคลื่นแถวลำดับ (arrayed waveguide grating, AWG)

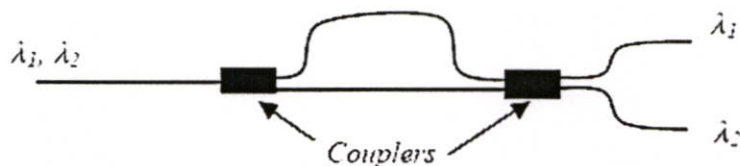
เป็นตัวกรองที่นิยมใช้กันมากในงานด้านการสื่อสารโทรคมนาคม AWG จะใช้แถวลำดับของท่อนำคลื่นชนิดโมเดเดียว โดยที่ท่อนำคลื่นที่อยู่ใกล้กันจะมีความยาวต่างกันคงที่ แสงอินพุตจากเส้นใยแก้วจะผ่านเข้าสู่ท่อนำคลื่นทุกแถวลำดับ เนื่องจากความยาวของท่อนำคลื่นที่ต่างกันเฟสของแสงที่ปลายด้านเอาต์พุตของแถวลำดับท่อนำคลื่นก็จะเปลี่ยนแปลงตามความยาวที่ต่างกันคงที่นี้ ผลของความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับหน้าเฟส (phase front) ซึ่งคล้ายกับที่เกิดในเกรตติงชนิดเบนราบ ปริมาณการแทรกสอดที่เอาต์พุตจะขึ้นกับความถี่ของแสง เมื่อคลื่นแสงผสมออกจากเกรตติง คลื่นแสงหลายความถี่จะถูกแยกออกแต่ละความถี่สู่เอาต์พุตใยแก้ว AWG สามารถใช้เป็นตัวมัลติเพล็กซ์หรือดีมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นได้



รูปที่ 2.8 การบรรจุเกรตติงท่อนำคลื่นแถวลำดับ

e) Mach-Zehnder interferometer (MZI)

ตัวกรองชนิดนี้ประกอบด้วยคัปเปิลเลอร์ 2 ตัวที่เชื่อมต่อทางเดินแสง 2 ทางที่มีความยาวไม่เท่ากัน ดังรูปที่ 2.9 การแทรกสอดของแสงทั้ง 2 ทางจะเกิดขึ้นที่คัปเปิลเลอร์ตัวที่ 2 การกระจายความเร็วกลุ่ม (group velocity dispersion) ในทางเดินทางแสงที่ยาวไม่เท่ากัน ก็จะส่งผลให้บางความยาวคลื่นส่งผ่านไปยังเอาต์พุตพอร์ตบน และอีกความยาวคลื่นส่งผ่านไปยังเอาต์พุตพอร์ตล่าง



รูปที่ 2.9 Mach-Zehnder interferometer

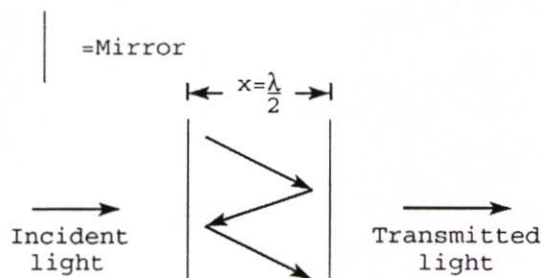
ก) ตัวกรองแทรกสอดชนิดฟิล์มบางไดอิเล็กตริก

(Thin film dielectric interference filter)

ตัวกรองแทรกสอดชนิดนี้ต้องมีการเคลือบชั้นของฟิล์มบางที่มีค่าดัชนีหักเหแตกต่างกันซ้อนกันหลาย ๆ ชั้นเพื่อที่จะสร้างตัวกรองที่มีแถบแคบๆ ตัวกรองชนิดเดียวกันนี้มีแบนด์วิดท์ $100\text{ GHz } 3\text{ dB}$ ต้องมีการเคลือบฟิล์มบางซ้อนกันมากกว่าร้อยชั้น จากการทำต้องเคลือบฟิล์มบางซ้อนกันหลายๆชั้นจึงทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มบาง จึงทำให้มีการใช้ตัวกรองชนิดนี้ลดน้อยลง ลำแสงทะลุผ่านที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกรองประกอบด้วยลำแสงย่อย ๆ จำนวนมาก แต่ละลำแสงย่อยก็จะมีเวลาในการเคลื่อนที่ที่ต่างกันน้อยๆ ซึ่งส่งผลให้เกิดการกระจายสัญญาณข้อมูลเพิ่มขึ้น

2.3 การแยกความยาวคลื่นโดยใช้แฟบริ-เพอโรต์ อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ (Fabry-Perot interferometer : FPI)

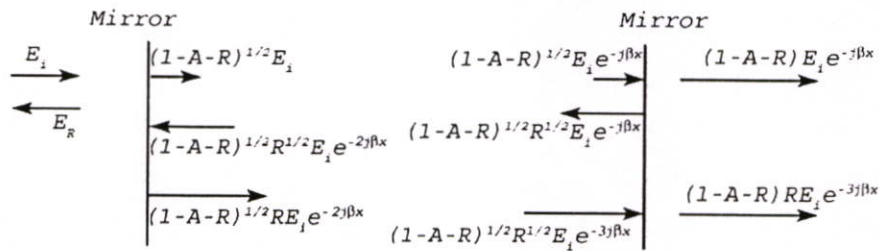
เครื่องมือชนิดนี้ใช้ฟิล์มบางที่มีผิวสองด้านขนานกันเป็นโพรงสั้นพ้อง สามารถใช้สำหรับการแยกหรือกรองความยาวคลื่นแสงออกมาได้ อุปกรณ์นี้ที่ใช้สำหรับการแยกสัญญาณในการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น การจัดวางอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 2.10 จากรูป 2.10 แสดงให้เห็นผิวฟิล์มบางซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นกระจกใส ใช้แทนกระจกสำหรับสะท้อนแสงเพื่อสะท้อนแสงให้มากขึ้น ฟิล์มบางจะติดขนานกันอยู่ทีปลายทั้งสองด้านของ FPI แสงอินพุตที่เข้าสู่ FPI เกิดการสะท้อนไป - กลับ อยู่ภายในโพรงสั้นพ้อง ความยาวโพรงสั้นพ้อง x มีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่น λ เป็น



รูปที่ 2.10 แสดงการเกิดการเกิดสะท้อนกลับภายใน FPI

$$x = \frac{i\lambda}{2n} = \frac{ic}{2nf} \quad (2.14)$$

โดยที่ n เป็นดัชนีหักเหภายในโพรงสั่นพ้อง และ $i=1, 2, 3, \dots$ จะพบว่าจำนวนครั้งของการสะท้อนไปกลับก่อนจะเกิดการลดทอนจนหมด ส่งผลต่อค่า “ฟิตเนสส์ (fitness)” ซึ่งเป็นค่าที่แสดงคุณภาพของ FPI ซึ่งจะอธิบายดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.11 แสดงขนาดของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการสะท้อนไปกลับภายใน FPI

จากรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงขนาดของสนามไฟฟ้าภายใน FPI ซึ่งสมมูลกับวงจรที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.11 โดยที่ E_i และ E_o เป็นขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตและเอาต์พุตตามลำดับ

แสงอินพุต E_i เดินทางเข้าสู่ FPI ผ่านกระจกด้านซ้ายมือ เข้าสู่ภายในซึ่งมีโครงสร้างเป็นโพรงสั่นพ้อง ทำให้เหลือสนามไฟฟ้ามีค่า $\sqrt{1-A-R} E_i$ เมื่อ R เป็นประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังแสง และ A เป็นการดูดกลืนกำลังแสงของ กระจกตามลำดับ หลังจากนั้นสัญญาณแสงส่วนนี้เดินทางเป็นระยะทางตามความยาวของโพรงสั่นพ้องคือ x ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงเฟส ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบกระจกด้านขวามีค่า $\sqrt{1-A-R} E_i e^{-j\beta x}$ สัญญาณแสงส่วนนี้แบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรกทะลุผ่านกระจกด้านขวาออกไปเป็นสัญญาณเอาต์พุต มีค่า $(1-A-R) E_i e^{-j\beta x}$ และสัญญาณอีกส่วนสะท้อนกลับทางซ้าย และเดินทางตกสู่กระจกทางซ้ายอีกครั้งด้วยขนาด $\sqrt{1-A-R} \sqrt{R} E_i e^{-j\beta x}$ เข้าสู่โพรงสั่นพ้องอีกครั้งไปสะท้อนที่กระจกด้านซ้ายอีกครั้ง การสะท้อนของแสงไป - กลับ อยู่ในโพรงสั่นพ้อง โดยการสะท้อนกลับทุกครั้งนั้น จะทำให้สนามของแสงอินพุตเปลี่ยนแปลงตามค่า \sqrt{R} นั่นเอง ผลสุดท้ายทำให้ได้สนามไฟฟ้าเอาต์พุตหลังจากสะท้อนภายในกระจกครบรอบมีค่า $\sqrt{1-A-R} R E_i e^{-3j\beta x}$ สามารถหาฟังก์ชันการส่งผ่านสนามไฟฟ้าโดยแทนค่า $\beta x = 2\pi f \tau$ โดยที่ $\tau = x/v$ ได้ผลดังนี้

$$\begin{aligned}
 H(f) &= \frac{E_o(f)}{E_i(f)} \\
 &= (1-A-R) e^{-j2\pi f \tau} \sum_{m=0}^{\infty} R^m \left[e^{-j4\pi m \tau} \right] \\
 &= \frac{1-A-R}{1-R e^{-j4\pi f \tau}} e^{-j2\pi f \tau}
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

และสำหรับฟังก์ชันการส่งผ่านกำลัง $T(f) = |H(f)|^2$ มีค่า

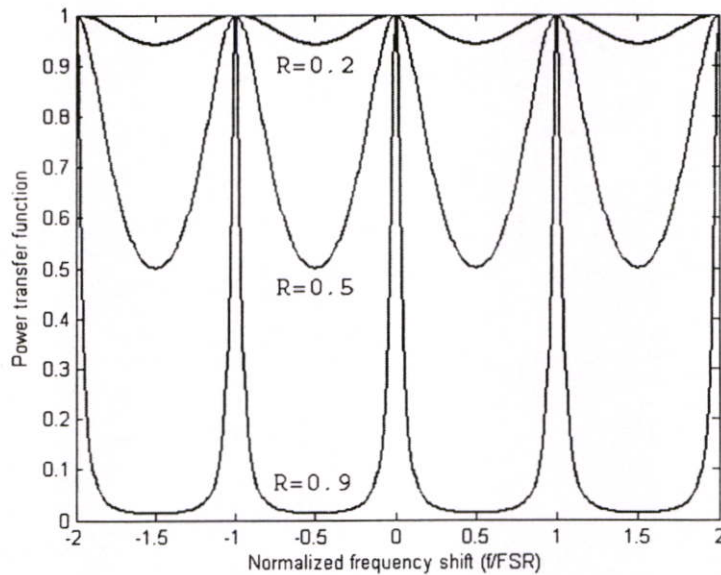
$$T(f) = \frac{(1 - A - R)^2}{1 - R^2 - 2R \cos 4\pi f \tau} \quad (2.16)$$

$$T(f) = \frac{(1 - A - R)^2}{(1 - R)^2 + R(2 \sin 2\pi f \tau)^2} \quad (2.17)$$

$$T(f) = \left(1 - \frac{A}{1 - R}\right)^2 \left[1 + \left(\frac{2\sqrt{R}}{1 - R} \sin \frac{4\pi f \tau}{2}\right)^2\right]^{-1} \quad (2.18)$$

พจน์ด้านขวาในสมการ (2.18) เรียกว่า “แอร์ฟังก์ชัน (airy function)” เมื่อทำการเขียนกราฟ ความสัมพันธ์ของสมการนี้ในรูปที่ 2.12 เป็นลักษณะของตัวกรองความถี่ กล่าวคือพบว่าจะมีบางความถี่ที่มีฟังก์ชันการส่งผ่านสูง โดยความถี่นั้นจะถูกส่งผ่านได้มาก และบางความถี่ที่ถูกส่งผ่านได้น้อย ลักษณะของความถี่ที่ถูกส่งผ่านได้มากจะมีลักษณะเป็นคาบคงที่ ซึ่งจะเรียกว่า “ย่านปลอดความถี่ (free spectral range : FSR)” ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความกว้างแถบใช้งานของตัวกรอง โดยที่

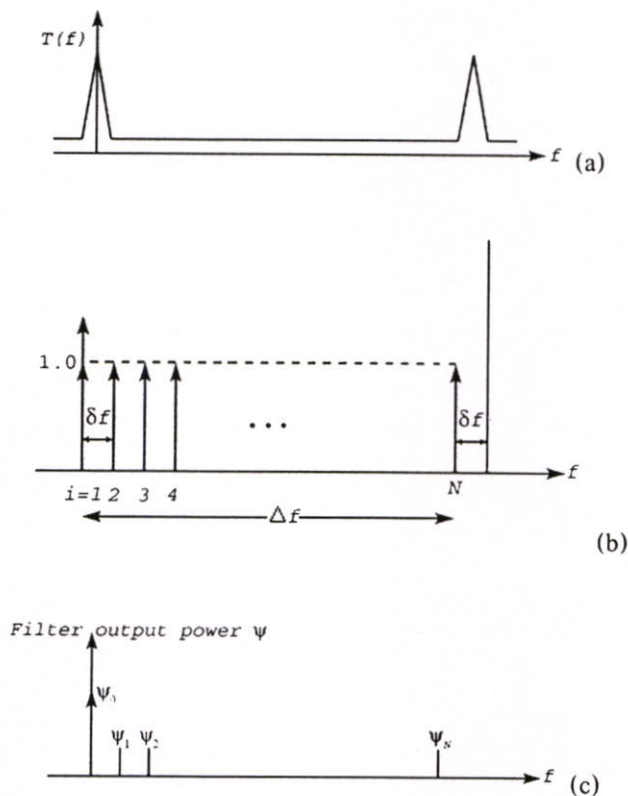
$$FSR = \frac{1}{2\tau} = \frac{c}{2nx} \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.12 แสดงฟังก์ชันการส่งผ่านกำลังแสงของ FPI สำหรับค่า $R = 0.2, 0.5$ และ 0.9 ตามลำดับ

ในการมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบแบ่งความยาวคลื่น ความยาวคลื่นที่สามารถใช้ได้ ต้องอยู่ในช่วง FSR ช่วงเดียวเพื่อไม่ให้เกิดการซ้ำซ้อนกันของสัญญาณแต่ละความยาวคลื่น ดังรูปที่ 2.13 ภาพ(a) เป็นฟังก์ชันการส่งผ่านของตัวกรองความถี่ ภาพ(b) คือสัญญาณที่ถูกมัลติเพล็กซ์ส่งมาด้วยกัน และภาพ (c) คือ สัญญาณที่ผ่านตัวกรองความถี่ ซึ่งถูกเลือกให้เหลือเพียงความถี่เดียวเท่านั้น ส่วนความถี่อื่นที่เล็ดรอดออกมาจะอยู่ในรูปของสัญญาณที่ทำให้เกิดการรบกวนข้ามช่องนั่นเอง

$$N = \Delta f / \delta f \quad (2.20)$$



รูปที่ 2.13 แสดงการกรองสัญญาณสำหรับการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น

- (a) ฟังก์ชันการส่งผ่านกำลังของตัวกรองความถี่
- (b) สัญญาณที่ถูกมัลติเพล็กซ์และส่งเข้าสู่ตัวกรอง
- (c) กำลังเอาต์พุทของสัญญาณช่องต่าง ๆ

สำหรับการหาตัวกรองที่เหมาะสมต้องมีค่า $FSR = \Delta f + \delta f$ เมื่อ Δf คือ ช่วงห่างความถี่ δf คือ ความกว้างความถี่ที่ครึ่งหนึ่งของกำลังสูงสุด (half-power bandwidth : HPBW หรือ full width at half maximum : FWHM) ซึ่งเป็นตัวกำหนดความกว้างของช่วงความถี่ส่งผ่านของตัวกรอง หาได้จาก

$$HPBW = \frac{c}{2\pi n x} \frac{1-R}{\pi \sqrt{R}} \quad (2.20)$$

และพารามิเตอร์ที่สำคัญของตัวกรองความถี่คือค่าความละเอียดหรือฟิเนสส์ (finesse : F) ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างค่า FSR และค่า HPBW ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความคมของช่วงความถี่ส่งผ่านกับความกว้างของแถบความถี่ทั้งหมดที่ใช้งานได้ และค่านี้เป็นค่าที่บอกถึงจำนวนช่องที่มากที่สุดที่สามารถใช้ตัวกรองตัวนี้สำหรับกรองความถี่นั่นเอง ค่าฟิเนสส์หาได้จาก

$$F = \frac{FSR}{HPBW} = \frac{\pi \sqrt{R}}{1-R} \quad (2.21)$$

ความสูงของยอดความถี่ส่งผ่านจะสูงที่สุดที่ความถี่สั้นพ้อง และมีฟังก์ชันการส่งผ่านเป็น

$$T(f)_{\max} = \left[1 - \frac{A}{1-R} \right]^2 \quad (2.22)$$

และความชัดเจน ซึ่งเป็นอัตราส่วนของค่าฟังก์ชันการส่งผ่านสูงสุด และต่ำสุด มีค่าดังสมการ

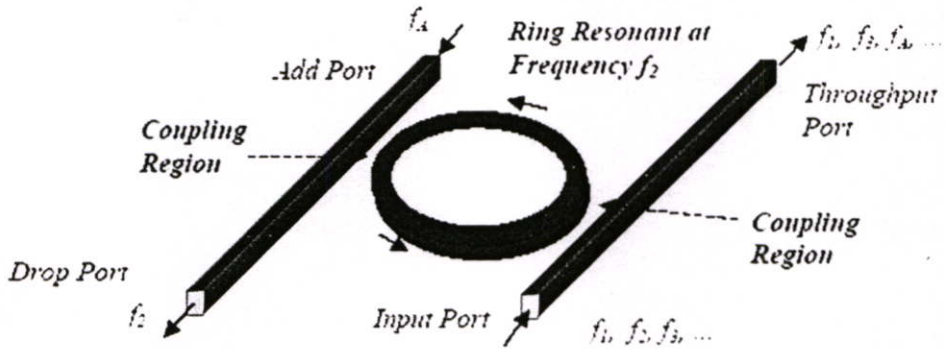
$$C = \left(\frac{1+R}{1-R} \right)^2 = \frac{(1+R)^2 F^2}{\pi^2 R} \quad (2.23)$$

จากสมการ (2.19) ยังแสดงให้เห็นว่าสามารถเพิ่มค่าฟิเนสส์ได้โดยการเพิ่มค่า R จะทำให้ค่า HPBW แคบลงมาก ๆ ซึ่งทำให้กรองความถี่ได้ละเอียดยิ่งขึ้น หรือเป็นการเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณในแถบการสื่อสารนั่นเอง

2.4 ความเป็นมาของโพรงสั้นพ้องวงแหวน

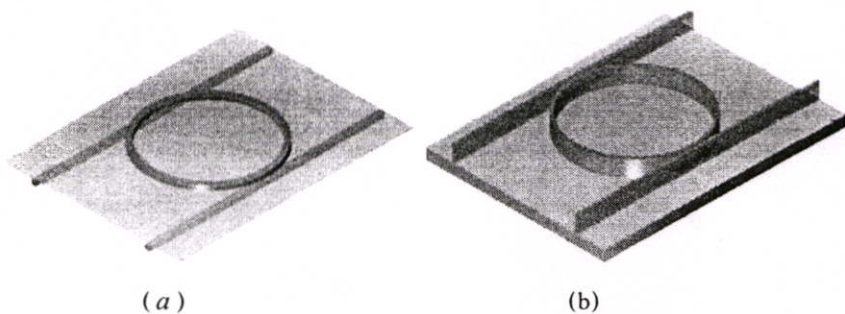
การนำเสนอที่มีการนำโพรงสั้นพ้องวงแหวนสำหรับเป็นตัวกรองสัญญาณแถบผ่าน (Band pass filter) เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1969 โดย E. A. Marcanti [4] การออกแบบตัวกรองที่ใช้ครีโปกช่องสัญญาณ (Channel dropping filter) แสดงในรูปที่ 2.14 คุณสมบัติการส่งผ่านของท่อนำคลื่นที่ใช้ประกอบด้วยท่อไดอิเล็กตริกที่มีภาคตัดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยมและห่อหุ้มด้วยชั้นไดอิเล็กตริกที่มีดัชนีหักเหต่ำกว่า [5] สถาปัตยกรรมของตัวกรองสัญญาณแสงที่เป็นท่อนำคลื่นชนิดแบนราบ

(Planar waveguide) ได้มีการสาธิตเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1996 [6] ซึ่งท่อนำคลื่นที่ประดิษฐ์ขึ้นทำจากวัสดุซิลิกา SiO_2 และได้ปัดด้วยเจอร์มาเนียมเพื่อทำให้แก้วมีดัชนีหักเหตามต้องการ ในปีต่อมาตัวกรองโพรงสั้นพ้องวงแหวนเดี่ยวที่เป็นอุปกรณ์แบบพาสซีฟตามรูปที่ 2.14 ได้ทำการประดิษฐ์ด้วยระบบวัสดุ AlGaAs-GaAs [7], [8] และ Si-SiO_2 [9] และ $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ [10] รัศมีของวงแหวนที่ใช้อยู่ระหว่าง $5 \mu\text{m}$ และ $30 \mu\text{m}$ และช่วงปลอดสเปกตรัมที่เกิดขึ้นอยู่ระหว่าง 20 nm และ 30 nm



รูปที่ 2.14 โพรงสั้นพ้องวงแหวนที่เป็นตัวกรองหรือช่องสัญญาณ

ส่วนโพรงสั้นพ้องวงแหวนแบบพาสซีฟที่มีลักษณะเป็นเรซแทรค (Racetrack) ดังรูปที่ 3 ประดิษฐ์ขึ้นจากระบบวัสดุ ระหว่างธาตุหมู่ III และ V คือ GaInAsP [11] และ AlGaAs-GaAs [12] ความสามารถในการนำตัวกรองโพรงสั้นพ้องไปใช้งานมีข้อจำกัดเนื่องจากความสูญเสียจากการโค้งงอและการกระเจิงภายในโพรงสั้นพ้อง ความสูญเสียที่เกิดขึ้นสามารถที่จะชดเชยโดยใช้อุปกรณ์แบบแอคทีฟเพื่อใช้เป็นตัวขยาย

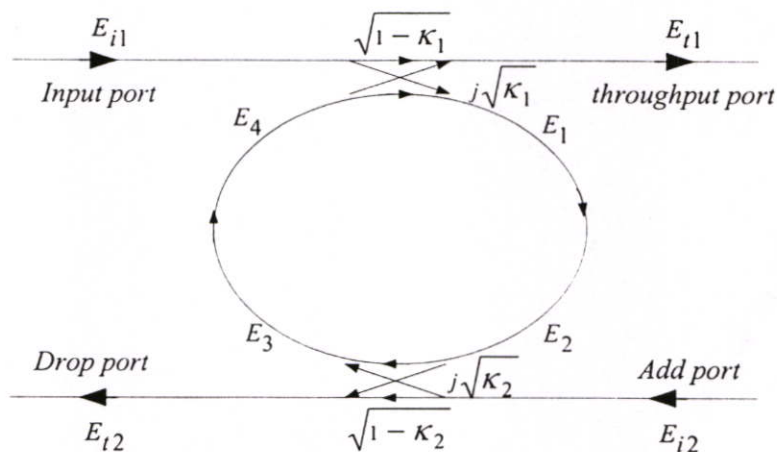


รูปที่ 2.15 (a) การคัปปลิงในแนวตั้ง (b) การคัปปลิงทางด้านข้าง

เมื่อไม่กี่ปีมานี้อุปกรณ์ทางแสงที่เป็นโพรงสั้นพ้องระดับไมโครเมตร (Microresonator) ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างมาก เพราะมีศักยภาพสูงพอที่จะทำเป็นอุปกรณ์รวมแสง (Optical integrated device) ในอนาคตและประยุกต์ใช้เป็นวงจรรวมแสงขนาดใหญ่ (Optical very large scale integrated circuit, VLSI) [13] โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำเอาวัสดุสารกึ่งตัวนำที่เกิดจากการรวมธาตุ หมู่ III และ V เข้าด้วยกันมาทำเป็นอุปกรณ์ทางแสงแบบพาสซีฟที่มีรัศมีเล็กระดับไมโครเมตร ทั้งนี้ก็เพราะว่าวัสดุธาตุหมู่ III และ V มีค่าดัชนีหักเหมากกว่า 3 โพรงสั้นพ้องระดับไมโครเมตรสามารถที่จะสร้างได้ 2 รูปแบบ คือ การคัปปลิงในแนวตั้ง (Vertical coupling) โดยที่บัสท่อนำคลื่นอยู่คนละระนาบกับโพรงสั้นพ้อง (รูปที่ 2.15a) และการคัปปลิงทางด้านข้าง (Lateral coupling) ที่บัสท่อนำคลื่นอยู่ในระนาบเดียวกันกับโพรงสั้นพ้อง (รูปที่ 2.22b) วิธีการคัปปลิงทางด้านข้างเหมาะสมสำหรับคัปปลิงผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่างกันมากดังเช่นระหว่างวัสดุธาตุหมู่ III-V กับอากาศ ซึ่งต้องทำลวดลายด้วยวิธีลิโทกราฟีด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron-beam lithography) เพราะช่วงว่างการคัปปลิงอยู่ระหว่าง 100-300 nm ในขณะที่การคัปปลิงในแนวตั้งสามารถทำลิโทกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเลต (i-line lithography)

2.5 โพรงสั้นพ้องวงแหวนเดี่ยว

โพรงสั้นพ้องวงแหวนที่ทำหน้าที่เป็นตัวกรองสัญญาณแสงแอดด์/ครีอป ที่เป็นพื้นฐานที่สุดก็คือ โพรงสั้นพ้องวงแหวนวงเดียว (Single Ring Resonator, SRR) ที่มีท่อนำคลื่น 2 ท่อวางไว้ประชิดกันเพื่อใช้คัปปลิงสัญญาณแสงเข้าและออก แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.16 SRR ที่มีท่อนำคลื่น 2 ท่อ เพื่อประยุกต์ใช้เป็นตัวกรองสัญญาณแสงแอดด์/ครีอป

จากรูปที่ 2.15 E_{i1} คือสนามไฟฟ้าเชิงซ้อนของคลื่นตกกระทบที่พอร์ตอินพุท (Input Port) E_{t1} และ E_{t2} คือสนามไฟฟ้าส่งผ่านและสนามไฟฟ้าสะท้อนที่พอร์ตส่งผ่าน (Throughput Port) และพอร์ตดรอ๊ป (Drop Port) ตามลำดับ และยังมี E_{i2} ที่เป็นสนามไฟฟ้าเชิงซ้อนของคลื่นตกกระทบที่พอร์ตแอดด์ (Add Port) E_1 และ E_2 เป็นสนามไฟฟ้าที่เดินทางอยู่ภายในครึ่งวงแหวนด้านขวา ส่วน E_3 และ E_4 เป็นสนามไฟฟ้าที่เดินทางอยู่ภายในครึ่งวงแหวนด้านซ้าย สำหรับคัปเปิลอร์ κ_1 ความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าส่งผ่านและสนามไฟฟ้าอินพุทแสดงได้ดังนี้ [14]

$$E_{t1} = \sqrt{1-\gamma_1} [j\sqrt{\kappa_1} E_4 + \sqrt{1-\kappa_1} E_{i1}] \quad (2.24)$$

$$E_1 = \sqrt{1-\gamma_1} [j\sqrt{\kappa_1} E_{t1} + \sqrt{1-\kappa_1} E_4] \quad (2.25)$$

ตามทฤษฎีการส่งผ่านแสง (Light Transmission Theory) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า E_1 และ E_2 ที่เดินทางภายในครึ่งวงแหวนแรก $\frac{L}{2}$ คือ

$$E_2 = E_1 e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n \frac{L}{2}} \quad (2.26)$$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับคัปเปิลอร์ κ_2 โดยกำหนดว่าไม่มีการป้อนสนามไฟฟ้า E_{i2} ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้า

$$E_{i2} = E_1 e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n \frac{L}{2}} \cdot j\sqrt{1-\gamma_2} \sqrt{\kappa_2} \quad \text{ที่ } E_{i2} = 0 \quad (2.27)$$

$$E_3 = E_1 e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n \frac{L}{2}} \sqrt{1-\gamma_2} \sqrt{1-\kappa_2} \quad (2.28)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า E_3 และ E_4 ที่เดินทางภายในครึ่งวงแหวนที่สอง คือ

$$E_4 = E_3 e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n \frac{L}{2}} \quad (2.29)$$

$$E_1 = \frac{E_{t1} j\sqrt{1-\gamma_1} \sqrt{\kappa_1}}{1 - \sqrt{1-\gamma_1} \sqrt{1-\kappa_1} \sqrt{1-\gamma_2} \sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n L}} \quad (2.30)$$

$$E_4 = \frac{E_{i1} j \sqrt{1-\gamma_1} \sqrt{\kappa_1}}{1 - \sqrt{1-\gamma_1} \sqrt{1-\kappa_1} \sqrt{1-\gamma_2} \sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha}{2} L - j k_n L}} \sqrt{1-\gamma_2} \sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha}{2} L - j k_n L} \quad (2.31)$$

โดยใช้สมการข้างบนจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของสนามไฟฟ้าที่พอร์ตส่งผ่าน ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{E_{t1}}{E_{i1}} &= \frac{-(1-\gamma_1)\kappa_1 \sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha}{2} L - j k_n L} + \sqrt{1-\gamma_1} \sqrt{1-\kappa_1}}{1 - \sqrt{1-\gamma_1} \sqrt{1-\kappa_1} \sqrt{1-\gamma_2} \sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha}{2} L - j k_n L}} \quad (2.32) \\ &= \frac{-\sqrt{1-\gamma_2} \sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha}{2} L - j k_n L} + \sqrt{1-\gamma_1} \sqrt{1-\kappa_1}}{1 - \sqrt{1-\gamma_1} \sqrt{1-\kappa_1} \sqrt{1-\gamma_2} \sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha}{2} L - j k_n L}} \end{aligned}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของสนามไฟฟ้าที่พอร์ตครีป คือ

$$\frac{E_{t2}}{E_{i1}} = \frac{-\sqrt{1-\gamma_1} \sqrt{1-\gamma_2} \sqrt{\kappa_1 \cdot \kappa_2} e^{-\frac{\alpha L}{2} - j k_n \frac{L}{2}}}{1 - \sqrt{1-\gamma_1} \sqrt{1-\kappa_1} \sqrt{1-\gamma_2} \sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha}{2} L - j k_n L}} \quad (2.33)$$

สำหรับ SRR ที่มีท่อนำคลื่น 2 ท่อ ที่ใช้เป็นตัวกรองสัญญาณแอ็ด/ครีป การหาฟังก์ชันถ่ายโอนของสนามไฟฟ้าทั้งที่พอร์ตส่งผ่านและพอร์ตครีปเทียบกับอินพุตแต่ละตัว สมการที่ (2.32) และ (2.33) นำมาหาความสัมพันธ์ความเข้มสนามไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\frac{I_{t1}}{I_{i1}} = \left| \frac{E_{t1}}{E_{i1}} \right|^2 = \frac{1 - (1-\gamma_1)\kappa_1 - 2\sqrt{1-\gamma_1} \sqrt{1-\kappa_1} \cdot \sqrt{1-\gamma_2} \sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha}{2} L} \cos(k_n L) + (1-\gamma_2)(1-\kappa_2) e^{-\alpha L}}{1 + (1-\gamma_1)(1-\kappa_1) \cdot (1-\gamma_2)(1-\kappa_2) e^{-\alpha L} - 2\sqrt{1-\gamma_1} \sqrt{1-\kappa_1} \cdot \sqrt{1-\gamma_2} \sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha}{2} L} \cos(k_n L)} \quad (2.34)$$

$$\frac{I_{t2}}{I_{i1}} = \left| \frac{E_{t2}}{E_{i1}} \right|^2 = \frac{(1-\gamma_1)(1-\gamma_2) \cdot \kappa_1 \kappa_2 e^{-\frac{\alpha}{2} L}}{1 + (1-\gamma_1)(1-\kappa_1) \cdot (1-\gamma_2)(1-\kappa_2) e^{-\alpha L} - 2\sqrt{1-\gamma_1} \sqrt{1-\kappa_1} \cdot \sqrt{1-\gamma_2} \sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha}{2} L} \cos(k_n L)} \quad (2.35)$$

เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณสามารถลดรูปสมการ (2.34) และ (2.35) โดยกำหนดค่าให้ไม่มีการสูญเสียเนื่องจากการคัปปลิง ($\gamma_n = 0$) และกำหนดพารามิเตอร์ใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned}
 x &= \exp\left(-\frac{\alpha}{2}L\right) \\
 y_1 &= \sqrt{1-\kappa_1} \\
 y_2 &= \sqrt{1-\kappa_2}
 \end{aligned} \tag{2.36}$$

ดังนั้นความสัมพันธ์ของความเข้มแสงตามสมการ (2.34) และ (2.35) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{I_{t1}}{I_{i1}}(\phi) = \left| \frac{E_{t1}}{E_{i1}} \right|^2 = 1 - \frac{(1-y_1^2) \cdot (1-y_2^2 x^2)}{(1-y_1 y_2 x)^2 + 4y_1 y_2 x \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \tag{2.37}$$

$$\frac{I_{t2}}{I_{i1}}(\phi) = \left| \frac{E_{t2}}{E_{i1}} \right|^2 = \frac{(1-y_1^2) \cdot (1-y_2^2) \cdot x}{(1-y_1 y_2 x)^2 + 4y_1 y_2 x \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \tag{2.38}$$

แบนด์วิดท์ที่ -3 dB หรือ FWHM สำหรับตัวกรอง SRR ดังรูปที่ 3.1 กำหนดได้เป็น

$$\delta\phi = 2 \frac{1-y_1 y_2 x}{\sqrt{y_1 y_2 x}} \tag{2.39}$$

สัมประสิทธิ์ฟิเนสส์ F สำหรับกรณีนี้กำหนดได้เป็น

$$F = \frac{2\pi}{\delta\phi} = \frac{\pi\sqrt{y_1 y_2 x}}{1-y_1 y_2 x} \tag{2.40}$$

การส่งผ่านสูงสุดและต่ำสุดคำนวณได้ดังนี้
สำหรับช่อง พอร์ตส่งผ่าน :

$$T_{max} = \frac{(y_1 + y_2 x)^2}{(1 + y_1 y_2 x)^2} \tag{2.41}$$

$$T_{min} = \frac{(y_1 - y_2 x)^2}{(1 - y_1 y_2 x)^2} \tag{2.42}$$

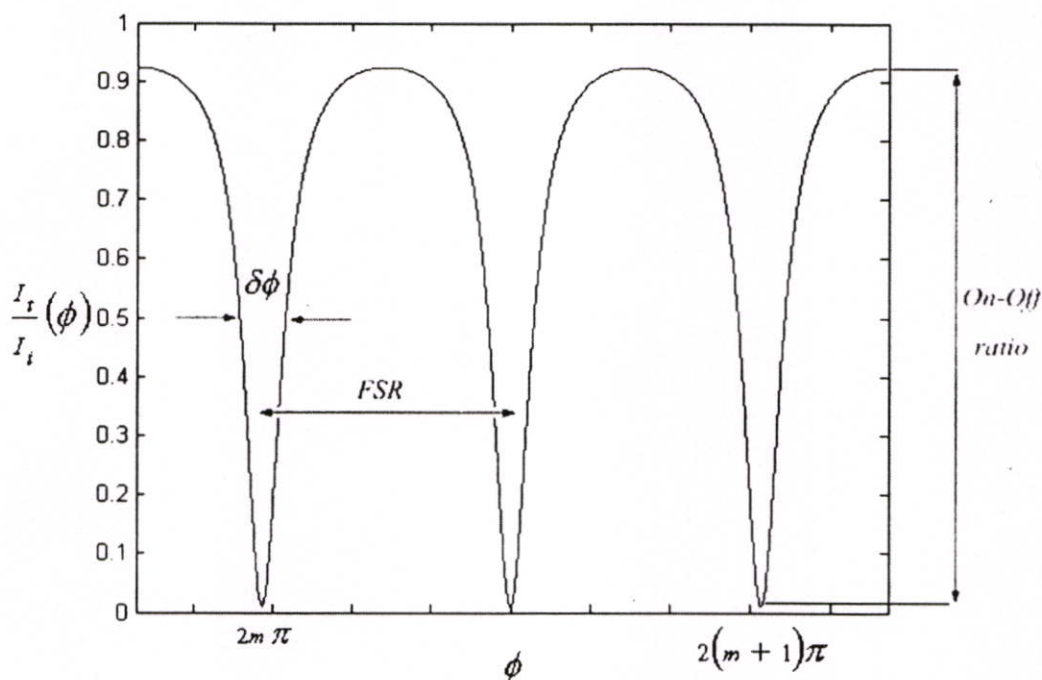
สำหรับช่อง พอร์ตครีโอล :

$$T_{max} = \frac{(1-y_1^2) \cdot (1-y_2^2) \cdot x}{(1-y_1 y_2 x)^2} \tag{2.43}$$

$$T_{min} = \frac{(1 - y_1^2) \cdot (1 - y_2^2) \cdot x}{(1 + y_1 y_2 x)^2} \quad (2.44)$$

อัตราส่วนเปิด-ปิด สามารถคำนวณโดยใช้สมการ (2.41) และ (2.44) ซึ่งมีค่าเป็น

$$\frac{T_{max(throughput\ port)}}{T_{min(drop\ port)}} = \frac{(y_1 + y_2 x)^2}{(1 - y_1^2) \cdot (1 - y_2^2) \cdot x} \quad (2.45)$$



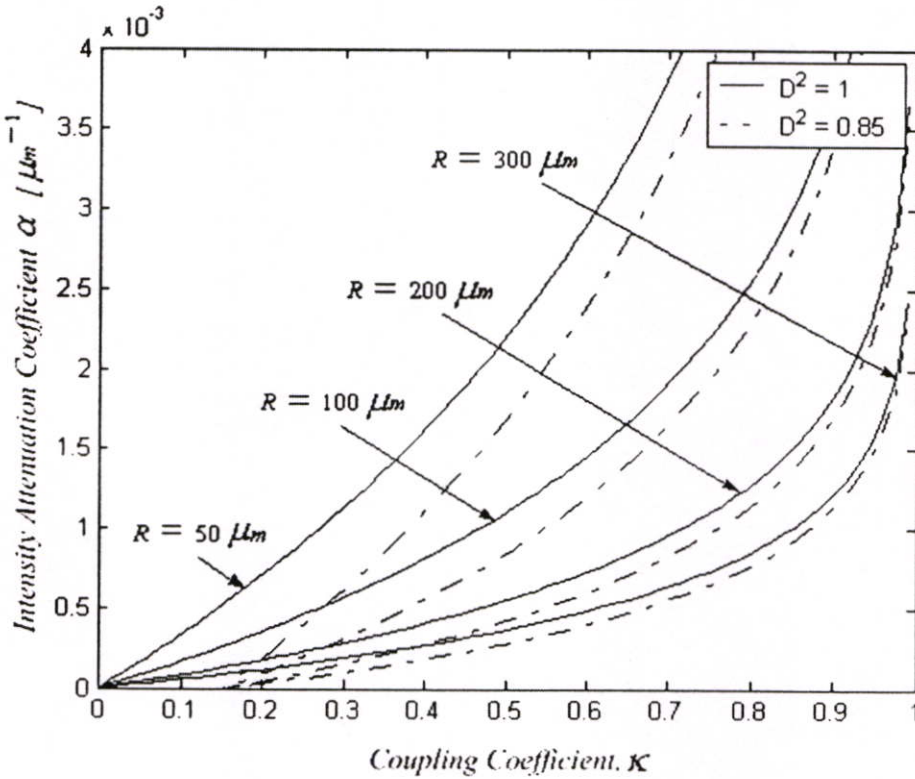
รูปที่ 2.17 คุณลักษณะของสเปกตรัมการส่งผ่านของโพรงสั่นพ้องวงแหวนเดี่ยว

อัตราส่วนเปิด-ปิดในหน่วยเดซิเบล dB กรณีที่ $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa$ และ $\alpha = 0$ กำหนดได้ดังนี้

$$10 \log \left(\frac{4(1 - \kappa)}{\kappa^2} \right) (dB) \quad (2.46)$$

ความเข้มแสงเอาท์พุท I_{t1} ที่พอร์ตส่งผ่านดังสมการที่ (2.37) จะมีค่าเป็นศูนย์ที่จุดซึ่งเกิดเรโซแนนซ์ ($k_n L = 2m\pi$) สิ่งนี้ชี้ให้เห็นว่าความยาวคลื่นที่เรโซแนนซ์กับโพรงสั่นพ้องวงแหวนจะออกมาทางพอร์ตครีโอปทั้งหมด กรณีที่คัปเปิลเลอร์ทั้งสองสมมาตรกันคือ $\kappa_1 = \kappa_2$ และ $\alpha = 0$ ค่า $\alpha = 0$ สามารถทำได้โดยใช้ตัวขยายสารกึ่งตัวนำ SOA (Semiconductor Optical Amplifier) เข้าไปในโพรงสั่นพ้องวงแหวนเพื่อชดเชยความสูญเสียที่นำคลื่น ในโพรงสั่นพ้องวงแหวนแบบพาสซีฟ (Passive Fiber Ring Resonator) ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มแสงของ

วงแหวน α จะกำหนดให้มีค่าคงที่คั่นนั้นความเป็นไปได้ที่เอาที่พูดจะมีความเข้มต่ำสุด $\left(\frac{I_{11}}{I_{11}} = 0\right)$ ที่จุดเกิดเรโซแนนซ์ของสเปกตรัมการส่งผ่าน I_{11} ที่พอร์ตส่งผ่านทำได้โดยการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิง κ_1, κ_2 ในสมการ (2.31) ใหม่ดังนี้ ลักษณะโครงร่างโพรงสั้นพ้อง วงแหวนรูปแบบอื่นๆ ที่มี κ_1 และ κ_2 ก็สามารถคำนวณได้จากสมการนี้ ตัวอย่างเช่น ถ้าสัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มแสง α ของโพรงสั้นพ้องที่มีโครงร่างดังรูปที่ 2.15 มีค่าเป็น



รูปที่ 2.18 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์ κ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน α ที่กำหนด

$$\begin{aligned} \frac{E_{11}}{E_{11}(k_n, l=2mm)} &= \frac{-\sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha}{2}l} + \sqrt{1-\kappa_1}}{1 - \sqrt{1-\kappa_1} \sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha}{2}l}} = 0 & (2.47) \\ &\Rightarrow -\sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha}{2}l} + \sqrt{1-\kappa_1} = 0 \\ &\Rightarrow e^{-\frac{\alpha}{2}l} = \frac{\sqrt{1-\kappa_1}}{\sqrt{1-\kappa_2}} \end{aligned}$$

$\alpha = 0.0005 \mu\text{m}^{-1}$, $R = 100 \mu\text{m}$ และเลือก κ_2 ให้มีค่าเป็น $\kappa_2 = 0.2$ ดังนั้นค่า κ_1 ที่คำนวณได้จากสมการ (2.47) มีค่าเป็น $\kappa_1 = 0.42$ ในการกำหนดให้สัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงทั้ง κ_1 และ κ_2

มีค่าต่างกัน เมื่อเกิดเรโซแนนซ์จะทำให้เอาต์พุตการส่งผ่านที่พอร์ตส่งผ่านมีค่าต่ำสุดหรือที่พอร์ตครีโอมมีค่าสูงสุด

การทำให้เห็นได้จริงในทางปฏิบัตินั้นยากมากเพราะว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มแสง α และสัมประสิทธิ์การคัปปลิง κ_1, κ_2 ไม่สามารถวัดให้มีความแม่นยำสูงได้ ดังนั้นคำตอบหนึ่งที่เป็นไปได้คือใช้คัปเปิลเลอร์ที่ปรับค่าได้ ในการออกแบบเพื่อให้ได้คุณลักษณะการส่งผ่านของตัวกรองลักษณะคล้ายรูปสี่เหลี่ยมจะใช้โพรงสั้นพ้องวงแหวน 2 วง

บทที่ 3

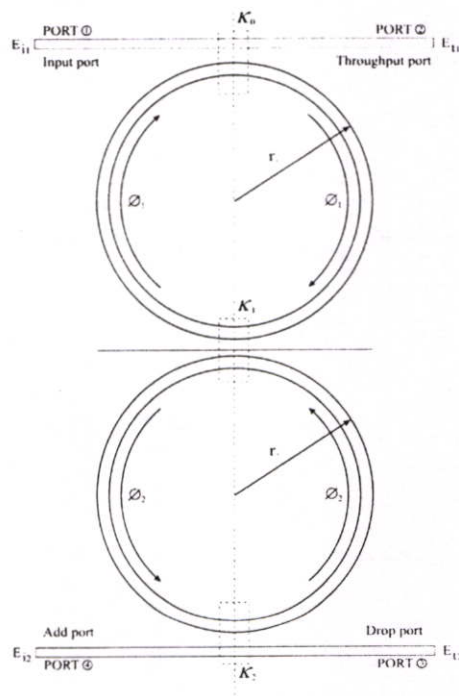
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนคู่ในงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่ที่มีรัศมีสมมาตรและอสมมาตร เริ่มต้นจากการออกแบบและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่ที่มีรัศมีระดับไมโครเมตร โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบเมทริกซ์

3.1 โพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่ (Double ring resonator:DRR)

3.1.1 โพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่ที่มีรัศมีสมมาตร

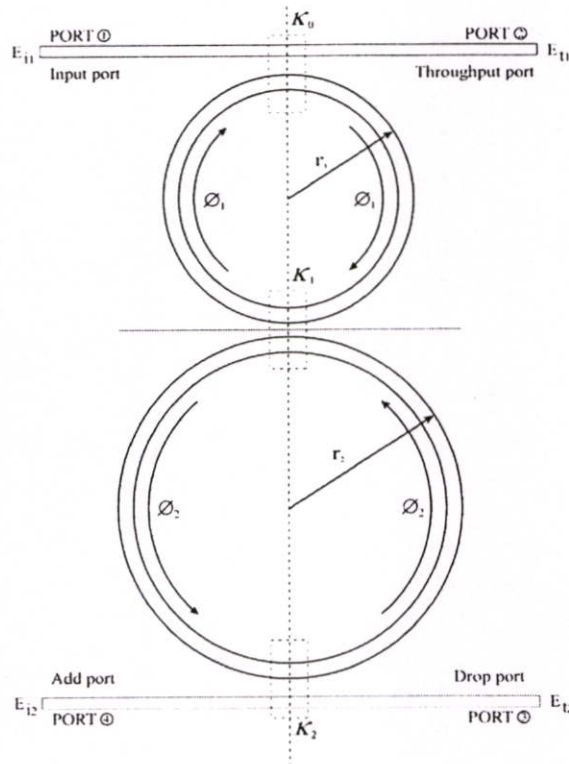
แผนภาพแสดงโครงร่างของโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่ 3 คัปเปิลอร์ที่มีรัศมีเท่ากัน ($r_1 = r_2$) แสดงดังภาพที่ 3.1 สนามไฟฟ้าอินพุต E_{i1} จะถูกส่งเข้าไปยังพอร์ตอินพุต สนามไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จะเกิดขึ้นที่พอร์ตส่งผ่าน E_{i1} หรือที่พอร์ตดรอ๊ป E_{i2} สามารถป้อนสนามไฟฟ้าอินพุตได้ที่พอร์ต E_{i2} ของโพรงสั้นพ้อง



รูปที่ 3.1 แสดงภาพโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่ที่มีรัศมีเท่ากัน ($r_1 = r_2$)

3.1.2 โพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่ที่มีรัศมีสมมาตร

แผนภาพแสดงโครงร่างของโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่ 3 คัปเปิลอร์ที่มีรัศมีแตกต่างกัน ($r_1 \neq r_2$) แสดงดังภาพที่ 3.1 สนามไฟฟ้าอินพุต E_{i1} จะถูกส่งเข้าไปยังพอร์ตอินพุต สนามไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จะเกิดขึ้นที่พอร์ตส่งผ่าน E_{t1} หรือที่พอร์ตครีป E_{t2} สามารถป้อนสนามไฟฟ้าอินพุตได้ที่พอร์ต E_{i2} ของโพรงสั้นพ้อง



รูปที่ 3.2 แสดงภาพโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่ที่มีรัศมีแตกต่างกัน ($r_1 \neq r_2$)

3.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่ที่มีรัศมีระดับไมโครเมตร

รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างของโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่แบบอสมมาตร โพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่ประกอบด้วยวงแหวนสองวงที่รัศมีของวงแหวนไม่เท่ากัน มีคัปเปิลอร์ 3 ตัว คือ K_1 , K_2 และ K_3 สัญญาณคลื่นแสงจะเข้าสู่คัปเปิลอร์ช่องทางที่ 1 และจะส่งผ่านไปยังช่องทางที่ 4 โพรงสั้นพ้องของวงแหวนแต่ละวงจะมีค่าพลอดสเปกตรัมต่างกัน ขึ้นอยู่กับรัศมีในแต่ละวง ดังสมการที่ 3.1

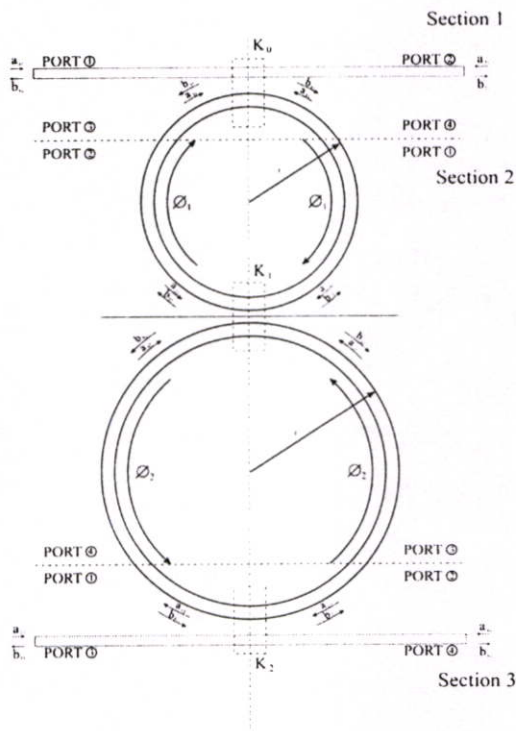
$$FSR_i = \frac{c}{2\pi nr_i} \quad (i = 1, 2) \quad (3.1)$$

- เมื่อ FSR คือ ช่องห่างสัญญาณ
- c คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ
- n คือ ดัชนีหักเหของท่อนำคลื่น

สำหรับตัวกรอง DRR สามารถออกแบบให้มีช่องห่างสัญญาณหรือ FSR ที่ขยายกว้างขึ้นได้ ซึ่งทำได้โดยการเลือกรัศมีวงแหวน DRR ให้มีค่าแตกต่าง ($r_1 \neq r_2$) ในกรณีที่ DRR มีรัศมีวงแหวนต่างกันแสงที่ทะลุผ่านเข้าไปใน DRR และจะออกมาทางพอร์ตหรือไปได้ก็ต่อเมื่อสภาวะการเกิดเรโซแนนซ์ ของวงแหวนทั้งสองต้องสอดคล้องกัน FSR ของ DRR ที่มีรัศมีวงแหวนต่างกันแสงได้ดังนี้

$$FSR = N.FSR_1 = M.FSR_2 \quad (3.2)$$

เมื่อ M และ N เป็นเลขจำนวนเต็ม



รูปที่ 3.3 แสดงทางเดินแสงของโพรงสั่นพ้องวงแหวนคู่

การออกแบบโครงส่นพ้องวงแหวนคู่ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบเมทริกซ์ จากรูปที่ 3.3 DRR แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ในที่นี้กำหนดให้คลื่นแสงของอินพุตและเอาต์พุต เป็นดังนี้ a_{ij} และ b_{ij} เมื่อ i คือ พอร์ต และ j คือ ส่วน

ในที่นี้กำหนดให้คัปเปอร์ไม่มีการสูญเสียค่าคัปปลิงและไม่มีการสะท้อนกลับของแสง เป็นไปตามสมการดังนี้

$$\begin{aligned} a_{21} &= a_{41} = a_{22} = a_{42} = a_{23} = a_{43} = b_{11} \\ &= b_{31} = b_{12} = b_{32} = b_{13} = b_{33} = 0 \end{aligned} \quad (3.3)$$

จากสมการที่ (3.3) แอมพลิจูดของคลื่นแสงของ b_{21} และ b_{41} ในส่วนที่ 1 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$b_{21} = \sqrt{1-K_1^2} a_{11} - jK_1 a_{31} \quad (3.4)$$

$$b_{41} = \sqrt{1-K_1^2} a_{31} - jK_1 a_{11} \quad (3.5)$$

จากสมการที่ (3.4) และ (3.5) สามารถเขียนด้วยเมทริกซ์ S ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \\ b_{41} \end{bmatrix} = [S]K = K_0 \cdot \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ a_{31} \\ a_{41} \end{bmatrix} = [S]K = K_0 \cdot \begin{bmatrix} a_{11} \\ 0 \\ a_{31} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

เมื่อ S คือ

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{1-K^2} & 0 & -jK \\ \sqrt{1-K^2} & 0 & -jK & 0 \\ 0 & -jK & 0 & \sqrt{1-K^2} \\ -jK & 0 & \sqrt{1-K^2} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

a_{31} เป็นความสัมพันธ์ที่ได้จาก b_{22}

$$a_{31} = b_{22} e^{-j\phi} \quad (3.8)$$

จากสมการที่ (3.8) ϕ คือ การหน่วงของเฟสในครึ่งรอบของโครงส่นพ้องวงแหวน สามารถแสดง ดังนี้

$$\phi_i = (\beta - j\alpha) \cdot \pi r, \quad (i = 1, 2) \quad (3.9)$$

เมื่อ i คือ 1 และ 2

β คือ ค่าคงที่ของการแพร่

α คือ สัมประสิทธิ์การลดทอน (มีหน่วยเป็น $length^{-1}$)

จากส่วนที่ 1 เราสามารถเขียนสมการการส่งผ่านสำหรับส่วนที่ 2 และ 3 ด้วยวิธีเมทริกซ์ S ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} b_{12} \\ b_{22} \\ b_{32} \\ b_{42} \end{bmatrix} = [S]K = K_1 \cdot \begin{bmatrix} a_{12} \\ a_{22} \\ a_{32} \\ a_{42} \end{bmatrix} = [S]K = K_1 \cdot \begin{bmatrix} b_{41}e^{-j\phi_1} \\ 0 \\ b_{23}e^{-j\phi_2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

และ

$$\begin{bmatrix} b_{13} \\ b_{23} \\ b_{33} \\ b_{43} \end{bmatrix} = [S]K = K_2 \cdot \begin{bmatrix} a_{13} \\ a_{23} \\ a_{33} \\ a_{43} \end{bmatrix} = [S]K = K_2 \cdot \begin{bmatrix} b_{42}e^{-j\phi_2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

สมการการส่งผ่านของ DRR จากพอร์ต 1 ถึง พอร์ต 4 สามารถเขียนได้ดังนี้

พอร์ตครีโอล :

$$\left| \frac{b_{43}}{a_{11}} \right|^2 = \left| \frac{jK_1^2 K_2 e^{-j(\phi_1 + \phi_2)}}{1 - \sqrt{(1-K_1^2)(1-K_2^2)}(e^{-j2\phi_1} + e^{-j2\phi_2}) + (1-K_1^2)e^{-j2(\phi_1 + \phi_2)}} \right|^2 \quad (3.12)$$

พอร์ตส่งผ่าน :

$$\left| \frac{b_{21}}{a_{11}} \right|^2 = \left| \frac{1}{\sqrt{1-K_1^2}} \left[1 - \frac{K_1^2 \{1 - \sqrt{(1-K_1^2)(1-K_2^2)} K_2 e^{-j(\phi_1 + \phi_2)}\}}{1 - \sqrt{(1-K_1^2)(1-K_2^2)}(e^{-j2\phi_1} + e^{-j2\phi_2}) + (1-K_1^2)e^{-j2(\phi_1 + \phi_2)}} \right] \right|^2 \quad (3.13)$$

บทที่ 4

ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ของโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่

ในบทนี้จะกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองและผลที่ได้จากการจำลอง โดยผลที่ได้จะแสดงให้เห็นการขยายช่องห่างสัญญาณ ของโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่แบบสมมาตรและอสมมาตร สามารถแสดงได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของโพรงสั้นพ้องของวงแหวน เช่น รัศมีของวงแหวน สัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงแสง สัมประสิทธิ์การลดทอนของวงแหวน สำหรับตัวกรองสัญญาณแสงวงแหวนคู่ยังสามารถออกแบบให้ช่องห่างช่องสัญญาณที่ขยายกว้างขึ้นได้ ซึ่งทำได้โดยการเลือกรัศมีวงแหวนที่ต่างกัน

4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

ในส่วนนี้จะทำการแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่ที่ใช้ในการจำลองทางคณิตศาสตร์ของโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่ที่มีรัศมีระดับไมโครเมตร ที่แสดงอยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนของสนามไฟฟ้าที่พอร์ตส่งผ่านและพอร์ตครีโปกเทียบกับพอร์ตอินพุต $\left(\left| \frac{b_{21}}{a_{11}} \right|, \left| \frac{b_{43}}{a_{11}} \right| \right)$ ดังที่ได้อธิบายในบทที่ 3

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองระบบ

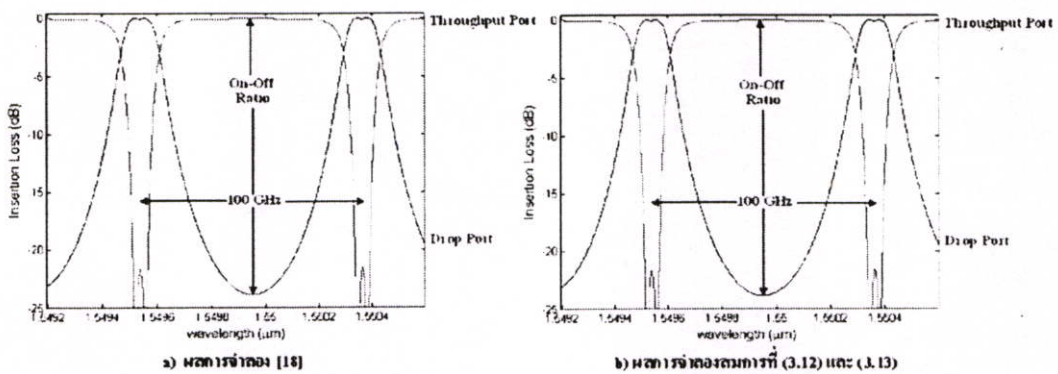
Parameter	
The effective index	n
Radius	R
Intensity Attenuation Coefficient	α
Coupling Factor	κ
Free Spectral Range	FSR
Resonant Numbers	M
Resonant Numbers	N

4.2 การสอบเทียบแบบจำลองที่ใช้ในการจำลอง

แบบจำลองที่ใช้ในการจำลองโครงสร้างพ้องวงแหวนคู่ ในรูปที่ 3.3 ซึ่งสมการการส่งผ่านของ DRR ของพอร์ตครีโปก (3.12) และพอร์ตส่งผ่าน (3.13) ซึ่งในการจำลองระบบจะอ้างอิงกับงานวิจัยของโครงสร้างพ้องวงแหวนคู่แบบสมมาตรและอสมมาตร

4.2.1 การจำลองโครงสร้างพ้องวงแหวนคู่แบบสมมาตร

พิจารณากรณีที่มีการสูญเสียทางแสงภายในวงแหวน $\alpha_{Ring1} = \alpha_{Ring2} = 0 \text{ dB cm}^{-1}$ และสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงของคัปเปลอร์ $\kappa_0 = \kappa_2 = 0.5$ และ $\kappa_1 = 0.13$ มีรัศมี $R_{1,2} = 134 \mu\text{m}$ และช่องห่างสัญญาณ FSR = 100 GHz [18]



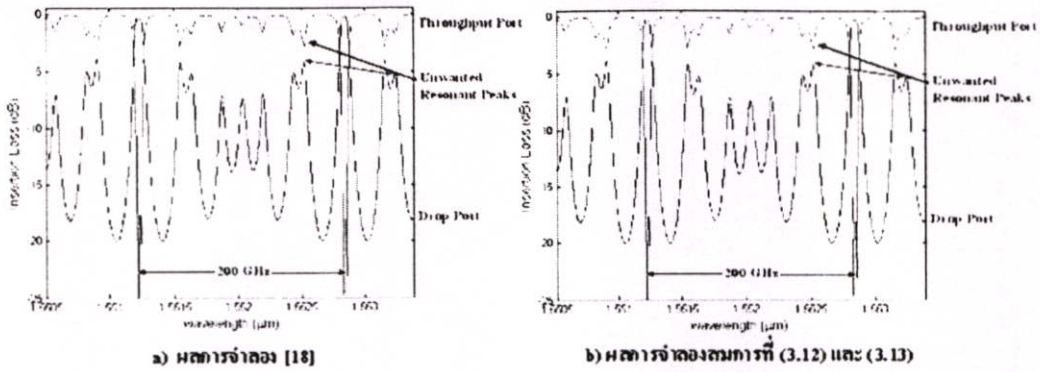
รูปที่ 4.1 ผลการตอบสนองรูปสี่เหลี่ยมของ DRR ที่ $R_{1,2} = 134 \mu\text{m}$

a) ผลการจำลอง [18] b) ผลการจำลองสมการที่ (3.12) และ (3.13)

ผลการตอบสนองตัวกรองที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมของ DRR การจำลองทั้งสองมีความสอดคล้องกัน ดังรูปที่ 4.1 (a) และ (b) ซึ่งผลที่ได้ คือ ช่องห่างสัญญาณ และอัตราส่วนเปิด - ปิด มีความสัมพันธ์กัน แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมที่เขียนขึ้นสามารถทำนายผลที่เกิดขึ้นได้

4.2.2 การจำลองโครงสร้างพ้องวงแหวนคู่แบบอสมมาตร

พิจารณากรณีที่มีการสูญเสียทางแสงภายในวงแหวน $\alpha_{Ring1} = \alpha_{Ring2} = 0.1 \text{ dB cm}^{-1}$ และสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงของคัปเปลอร์ $\kappa_0 = \kappa_2 = 0.57$ และ $\kappa_1 = 0.2$ มีรัศมี $R_1 = 274 \mu\text{m}$, $R_2 = 342 \mu\text{m}$ ช่องห่างสัญญาณ FSR = 200 GHz [18]



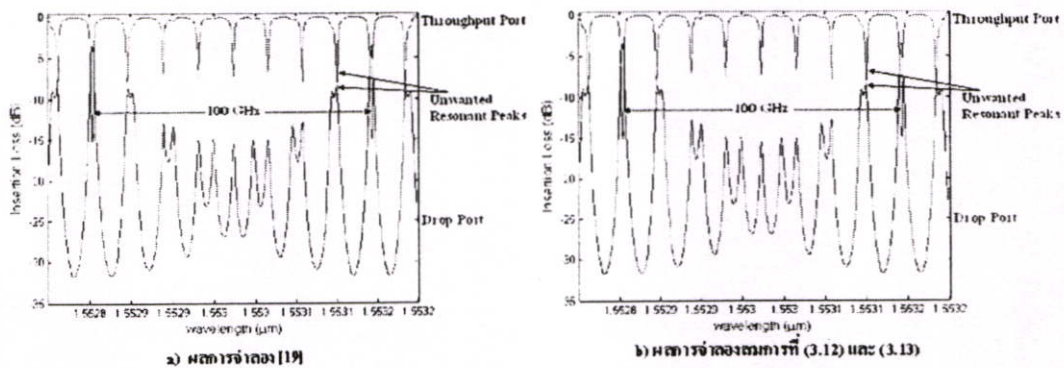
รูปที่ 4.2 DRR ที่ $R_1 = 274 \mu\text{m}$, $R_2 = 342 \mu\text{m}$, $\alpha_{\text{Ring1}} = \alpha_{\text{Ring2}} = 0.1 \text{ dB cm}^{-1}$,

$$\kappa_0 = \kappa_2 = 0.57, \kappa_1 = 0.2 \text{ และ FSR} = 200 \text{ GHz}$$

a) ผลการจำลอง [18] b) ผลการจำลองสมการที่ (3.12) และ (3.13)

ผลการตอบสนองตัวกรองของ DRR แบบสมมาตร การจำลองทั้งสองมีความสอดคล้องกัน ดังรูปที่ 4.2 (a) และ (b) ซึ่งผลที่ได้ คือ ช่องห่างสัญญาณ มีความสัมพันธ์กันซึ่งสามารถขยายช่องห่างสัญญาณได้ แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมที่เขียนขึ้นสามารถทำนายผลที่เกิดขึ้นได้

พิจารณากรณีที่มีการสูญเสียทางแสงภายในวงแหวน $\alpha_{\text{Ring1}} = \alpha_{\text{Ring2}} = 0.1 \text{ dB cm}^{-1}$ และสัมประสิทธิ์ของการคับปลิงของคัปเปลอร์ $\kappa_0 = \kappa_2 = 0.35$ และ $\kappa_1 = 0.652$ มีรัศมี $R_1 = 2.296 \text{ mm}$, $R_2 = 2.642 \text{ mm}$ ช่องห่างสัญญาณ $\text{FSR} = 100 \text{ GHz}$ [19]



รูปที่ 4.3 DRR ที่ $R_1 = 2.296 \text{ mm}$, $R_2 = 2.642 \text{ mm}$, $\alpha_{\text{Ring1}} = \alpha_{\text{Ring2}} = 0.1 \text{ dB cm}^{-1}$,

$$\kappa_0 = \kappa_2 = 0.35, \kappa_1 = 0.652 \text{ และ FSR} = 100 \text{ GHz}$$

a) ผลการจำลอง [19] b) ผลการจำลองสมการที่ (3.12) และ (3.13)

ผลการตอบสนองตัวกรองของ DRR แบบสมมาตร การจำลองทั้งสองมีความสอดคล้องกัน ดังรูปที่ 4.3 (a) และ (b) ซึ่งผลที่ได้ คือ ช่องห่างสัญญาณ มีความสัมพันธ์กันซึ่งสามารถขยายช่องห่างสัญญาณได้ แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมที่เขียนขึ้นสามารถทำนายผลที่เกิดขึ้นได้

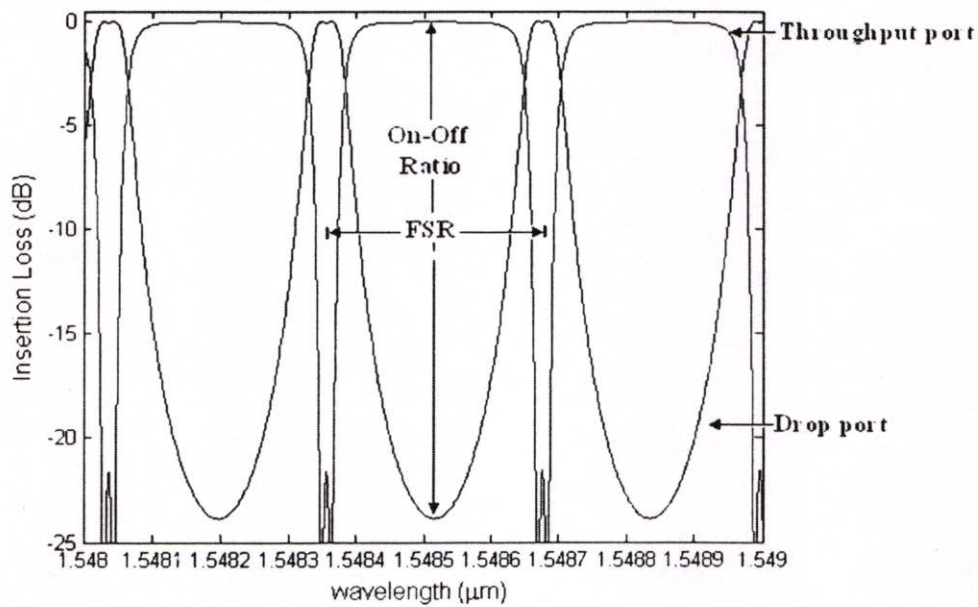
4.3 การตอบสนองโพรงสั่นพ้องวงแหวนคู่แบบสมมาตรและอสมมาตร

4.3.1 การเปลี่ยนแปลงรัศมีของโพรงสั่นพ้องวงแหวนคู่แบบสมมาตร ($R_1 = R_2$) และอสมมาตร ($R_1 \neq R_2$)

4.3.1.1 ช่องห่างสัญญาณที่ $FSR = 40 \text{ GHz}$

ตารางที่ 4.2 แสดงพารามิเตอร์ของตัวกรอง DRR ($R_1 = R_2$) ที่ $FSR = 40 \text{ GHz}$

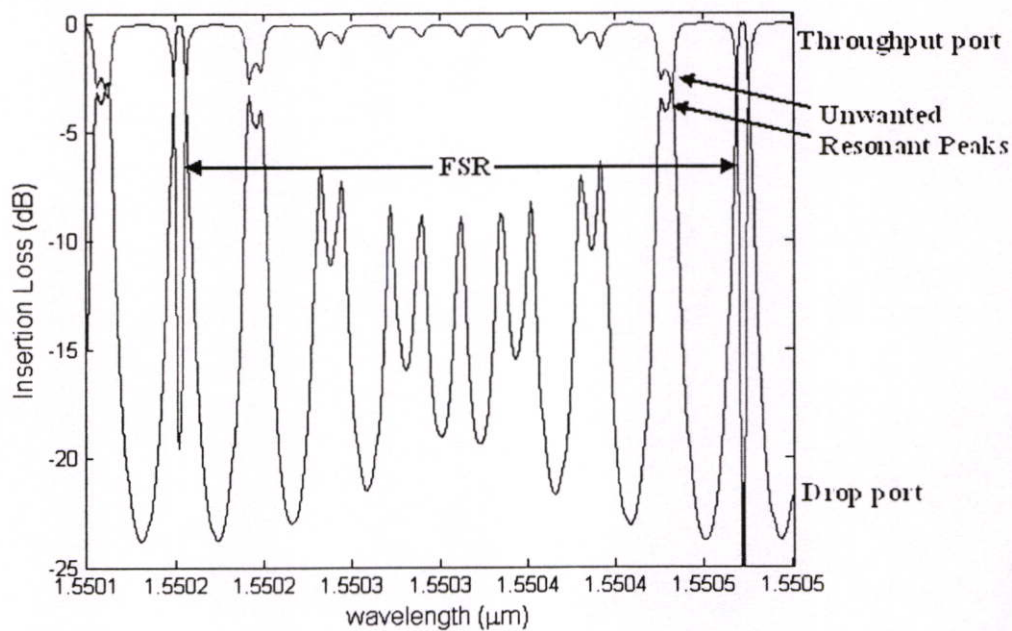
Parameter	Value
The effective index	3.46
Radius 1	345 μm
Radius 2	345 μm
Intensity Attenuation Coefficient	0
Coupling Factor (κ_0)	0.5
Coupling Factor (κ_1)	0.13
Coupling Factor (κ_2)	0.5



รูปที่ 4.4 ผลการตอบสนองรูปสี่เหลี่ยมของ DRR ที่ $R_{1,2} = 345 \mu\text{m}$ และ $FSR = 40 \text{ GHz}$

ตารางที่ 4.3 แสดงพารามิเตอร์ของตัวกรอง DRR ($R_1 \neq R_2$) ที่ FSR = 40 GHz

Parameter	Value
The effective index	3.46
Radius 1	2422.8 μm
Radius 2	2766.8 μm
Intensity Attenuation Coefficient	0 dB cm^{-1}
Coupling Factor (κ_0)	0.5
Coupling Factor (κ_1)	0.13
Coupling Factor (κ_2)	0.5
Free Spectral Range 1 (FSR ₁)	5.7 GHz
Free Spectral Range 2 (FSR ₂)	4.99 GHz
Resonant Numbers (M)	8
Resonant Numbers (N)	7

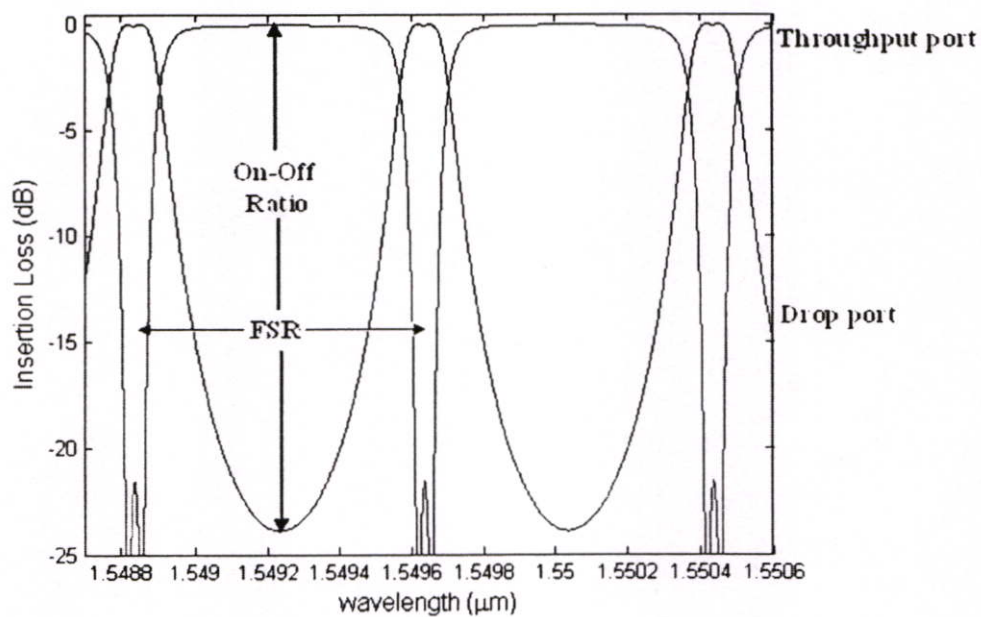


รูปที่ 4.5 DRR ที่ $R_1 = 2422.8 \mu\text{m}$, $R_2 = 2766.8 \mu\text{m}$, $\alpha_{\text{Ring1}} = \alpha_{\text{Ring2}} = 0 \text{ dB cm}^{-1}$,
 $\kappa_0 = \kappa_2 = 0.5$, $\kappa_1 = 0.13$ และ FSR = 40 GHz

4.3.1.2 ช่องห่างสัญญาณที่ $FSR = 100 \text{ GHz}$

ตารางที่ 4.4 แสดงพารามิเตอร์ของตัวกรอง DRR ($R_1 = R_2$) ที่ $FSR = 100 \text{ GHz}$

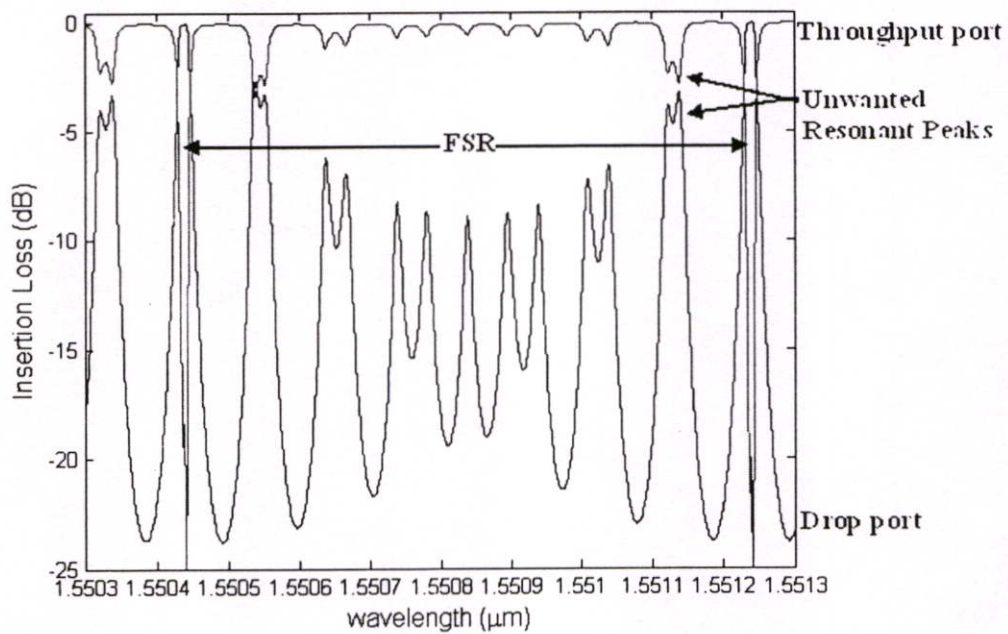
Parameter	Value
The effective index	3.46
Radius 1	138 μm
Radius 2	138 μm
Intensity Attenuation Coefficient	0
Coupling Factor (κ_0)	0.5
Coupling Factor (κ_1)	0.13
Coupling Factor (κ_2)	0.5



รูปที่ 4.6 ผลการตอบสนองรูปสี่เหลี่ยมของ DRR ที่ $R_{1,2} = 138 \mu\text{m}$ และ $FSR = 100 \text{ GHz}$

ตารางที่ 4.5 แสดงพารามิเตอร์ของตัวกรอง DRR ($R_1 \neq R_2$) ที่ $FSR = 100$ GHz

Parameter	Value
The effective index	3.46
Radius 1	966 μm
Radius 2	1104.5 μm
Intensity Attenuation Coefficient	0 dB cm^{-1}
Coupling Factor (κ_0)	0.5
Coupling Factor (κ_1)	0.13
Coupling Factor (κ_2)	0.5
Free Spectral Range 1 (FSR_1)	14.29 GHz
Free Spectral Range 2 (FSR_2)	12.50 GHz
Resonant Numbers (M)	8
Resonant Numbers (N)	7



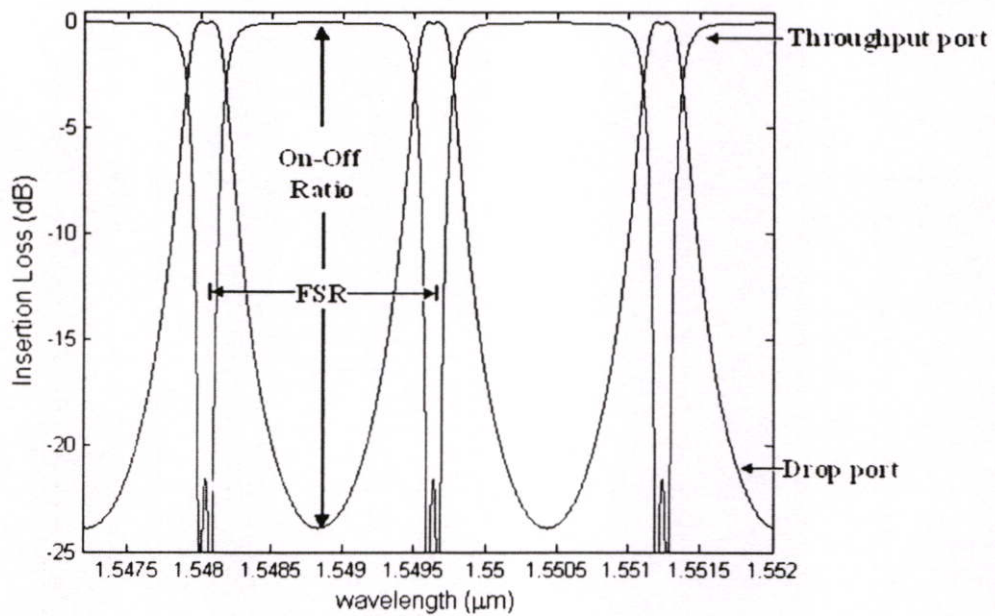
รูปที่ 4.7 DRR ที่ $R_1 = 966 \mu m$, $R_2 = 1104.5 \mu m$, $\alpha_{Ring1} = \alpha_{Ring2} = 0$ dB cm^{-1} ,

$$\kappa_0 = \kappa_2 = 0.5, \kappa_1 = 0.13 \text{ และ } FSR = 100 \text{ GHz}$$

4.3.1.3 ช่องห่างสัญญาณที่ $FSR = 200 \text{ GHz}$

ตารางที่ 4.6 แสดงพารามิเตอร์ของตัวกรอง DRR ($R_1 = R_2$) ที่ $FSR = 200 \text{ GHz}$

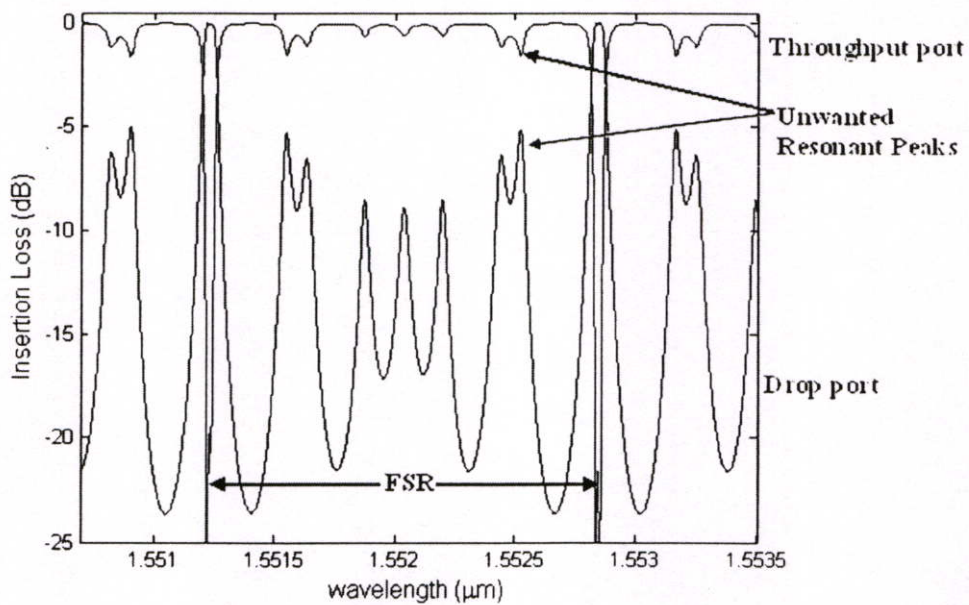
Parameter	Value
The effective index	3.46
Radius 1	$69 \mu\text{m}$
Radius 2	$69 \mu\text{m}$
Intensity Attenuation Coefficient	0
Coupling Factor (κ_0)	0.5
Coupling Factor (κ_1)	0.13
Coupling Factor (κ_2)	0.5



รูปที่ 4.8 ผลการตอบสนองรูปสี่เหลี่ยมของ DRR ที่ $R_{1,2} = 69 \mu\text{m}$ และ $FSR = 200 \text{ GHz}$

ตารางที่ 4.7 แสดงพารามิเตอร์ของตัวกรอง DRR ($R_1 \neq R_2$) ที่ $FSR = 200$ GHz

Parameter	Value
The effective index	3.46
Radius 1	274 μm
Radius 2	342 μm
Intensity Attenuation Coefficient	0 dB cm^{-1}
Coupling Factor (κ_0)	0.5
Coupling Factor (κ_1)	0.13
Coupling Factor (κ_2)	0.5
Free Spectral Range 1 (FSR_1)	50 GHz
Free Spectral Range 2 (FSR_2)	40 GHz
Resonant Numbers (M)	5
Resonant Numbers (N)	4

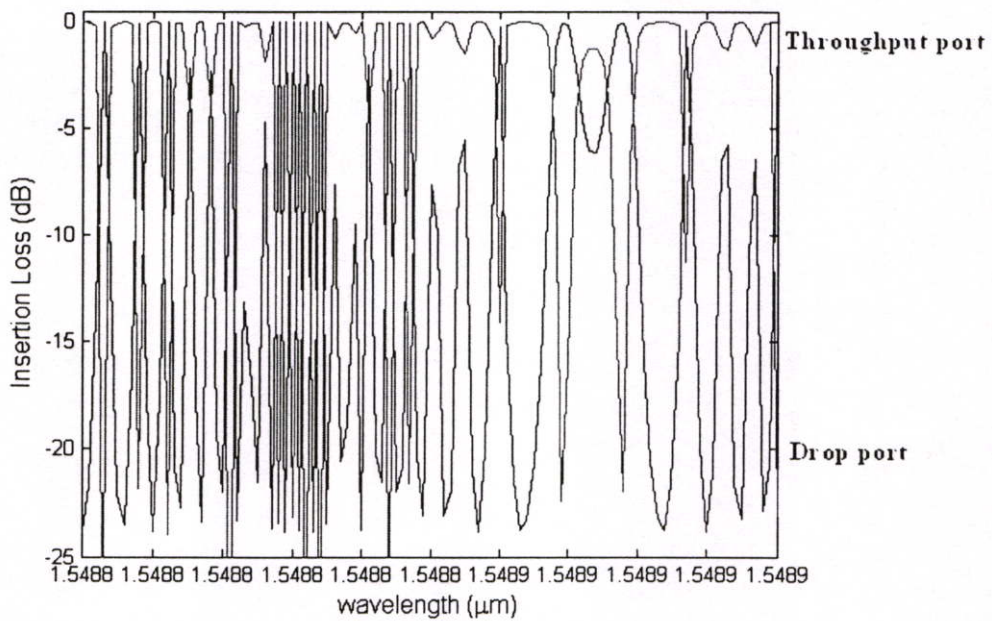


รูปที่ 4.9 DRR ที่ $R_1 = 274 \mu m$, $R_2 = 342 \mu m$, $\alpha_{Ring1} = \alpha_{Ring2} = 0$ dB cm^{-1} ,
 $\kappa_0 = \kappa_2 = 0.5$, $\kappa_1 = 0.13$ และ $FSR = 200$ GHz

4.3.1.4 ขนาดรัศมีระดับกิโลเมตร

ตารางที่ 4.8 แสดงพารามิเตอร์ของตัวกรอง DRR ($R_1 = R_2$)

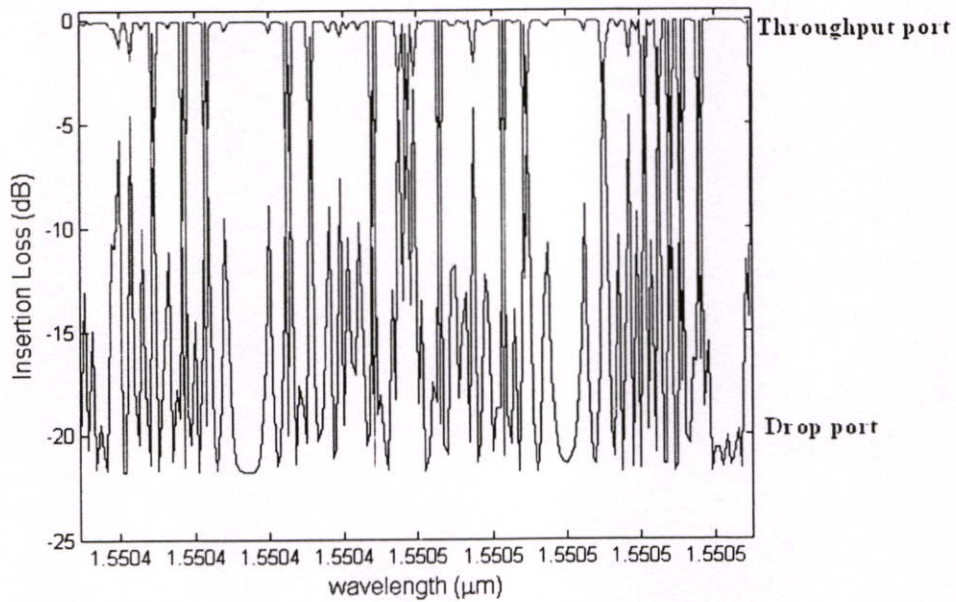
Parameter	Value
The effective index	3.46
Radius 1	1 km
Radius 2	1 km
Intensity Attenuation Coefficient	0
Coupling Factor (κ_0)	0.5
Coupling Factor (κ_1)	0.13
Coupling Factor (κ_2)	0.5



รูปที่ 4.10 ผลการตอบสนองรูปสี่เหลี่ยมของ DRR ที่ $R_{1,2} = 1$ km

ตารางที่ 4.9 แสดงพารามิเตอร์ของตัวกรอง DRR ($R_1 \neq R_2$)

Parameter	Value
The effective index	3.46
Radius 1	1 km
Radius 2	2 km
Intensity Attenuation Coefficient	0 dB cm^{-1}
Coupling Factor (κ_0)	0.5
Coupling Factor (κ_1)	0.13
Coupling Factor (κ_2)	0.5
Free Spectral Range 1 (FSR_1)	1.39 kHz
Free Spectral Range 2 (FSR_2)	3.45 kHz
Resonant Numbers (M)	5
Resonant Numbers (N)	2

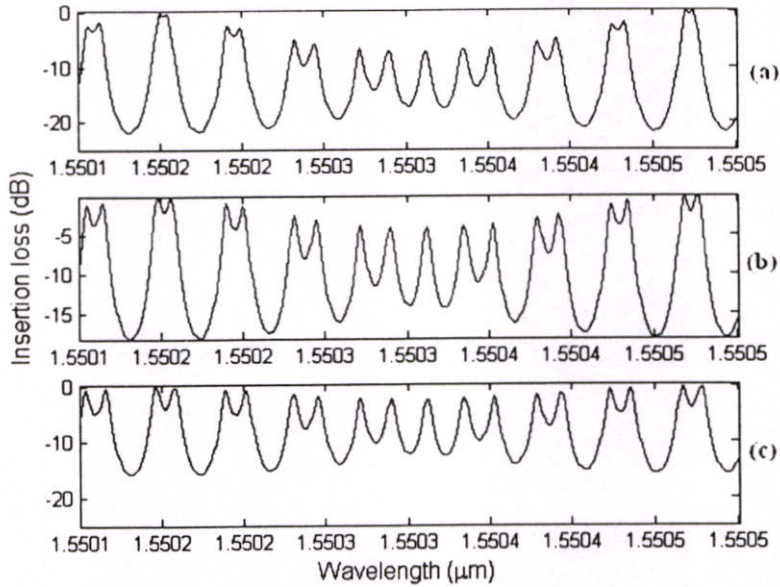


รูปที่ 4.11 DRR ที่ $R_1 = 1$ km, $R_2 = 2$ km, $\alpha_{Ring1} = \alpha_{Ring2} = 0$ dB cm^{-1} ,
 $\kappa_0 = \kappa_2 = 0.5$, $\kappa_1 = 0.13$

4.3.2 การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงแสงของโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่

แบบอสมมาตร ($R_1 \neq R_2$)

4.3.2.1 ช่องห่างสัญญาณที่ $FSR = 40 \text{ GHz}$

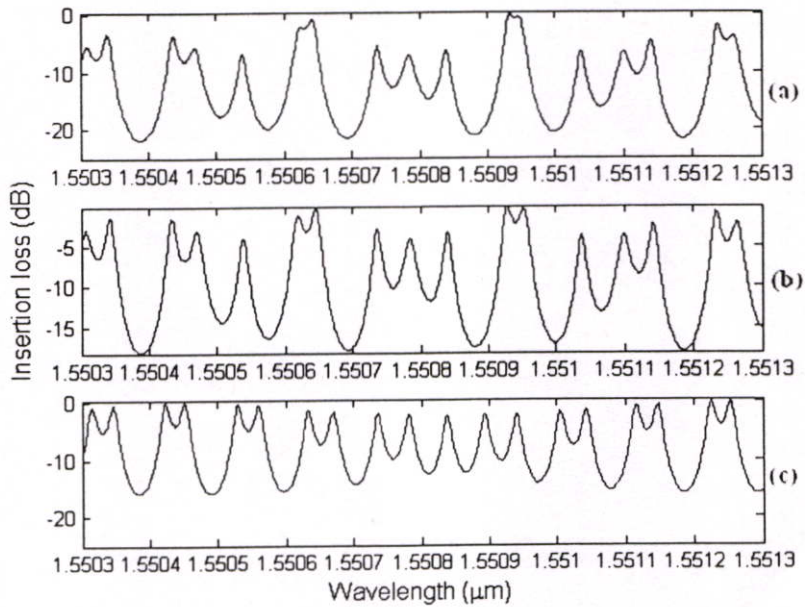


รูปที่ 4.12 ผลจำลองสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงแสง DRR $R_1 = 2422.8 \mu\text{m}$,

$$R_2 = 2766.8 \mu\text{m}, \alpha_{\text{Ring}1} = \alpha_{\text{Ring}2} = 0 \text{ dB cm}^{-1}, \kappa_0 = \kappa_2 = 0.5$$

(a) $\kappa_1 = 0.2$, (b) $\kappa_1 = 0.4$, (c) $\kappa_1 = 0.6$

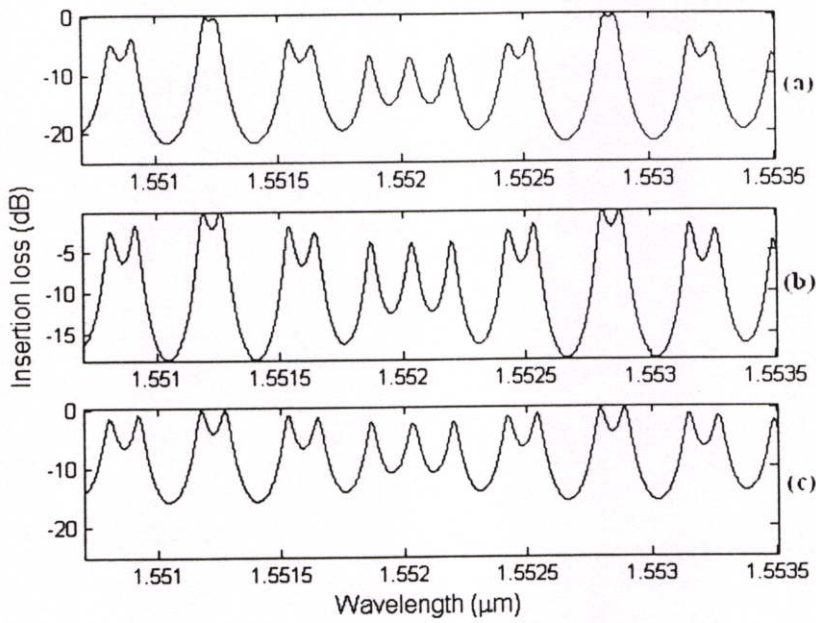
4.3.2.2 ช่องห่างสัญญาณที่ $FSR = 100 \text{ GHz}$



รูปที่ 4.13 ผลจำลองสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงแสง DRR $R_1 = 966 \mu\text{m}$, $R_2 = 1106.5 \mu\text{m}$,

$$\alpha_{\text{Ring}1} = \alpha_{\text{Ring}2} = 0 \text{ dB cm}^{-1}, \kappa_0 = \kappa_2 = 0.5 \text{ (a) } \kappa_1 = 0.2, \text{ (b) } \kappa_1 = 0.4, \text{ (c) } \kappa_1 = 0.6$$

4.3.2.3 ช่องห่างสัญญาณที่ $FSR = 200 \text{ GHz}$

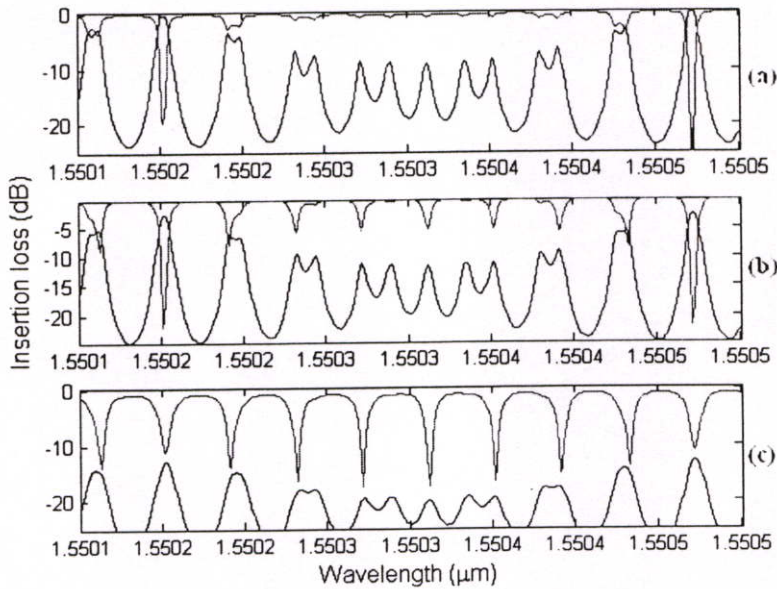


รูปที่ 4.14 ผลจำลองสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงแสง DRR $R_1 = 274 \mu\text{m}$, $R_2 = 342 \mu\text{m}$,

$$\alpha_{\text{Ring1}} = \alpha_{\text{Ring2}} = 0 \text{ dB cm}^{-1}, \kappa_0 = \kappa_2 = 0.5 \text{ (a) } \kappa_1 = 0.2, \text{ (b) } \kappa_1 = 0.4, \text{ (c) } \kappa_1 = 0.6$$

4.3.3 การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ของการลดทอนความเข้มแสงของโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่แบบอสมมาตร ($R_1 \neq R_2$)

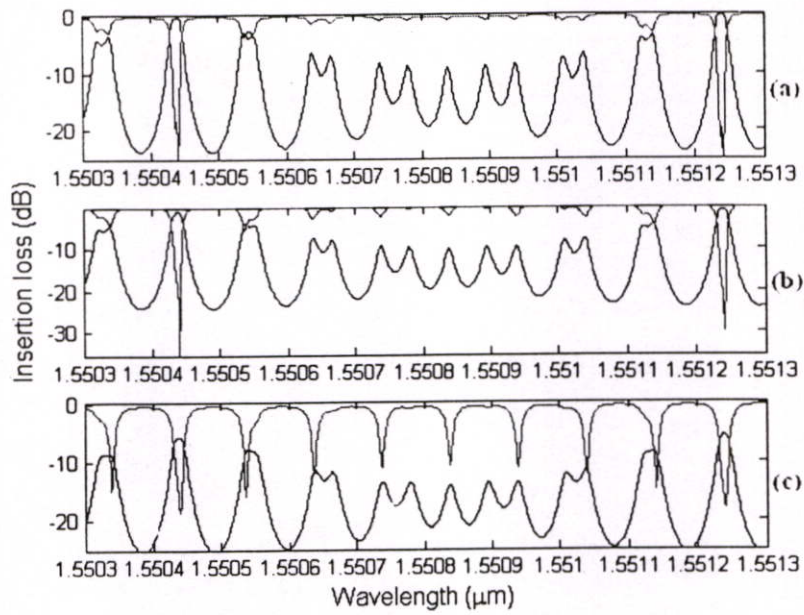
4.3.3.1 ช่องห่างสัญญาณที่ $FSR = 40 \text{ GHz}$



รูปที่ 4.15 ผลจำลองการลดทอนสัญญาณอินพุตของ DRR ที่ $R_1 = 2422.8 \mu\text{m}$, $R_2 = 2766 \mu\text{m}$,

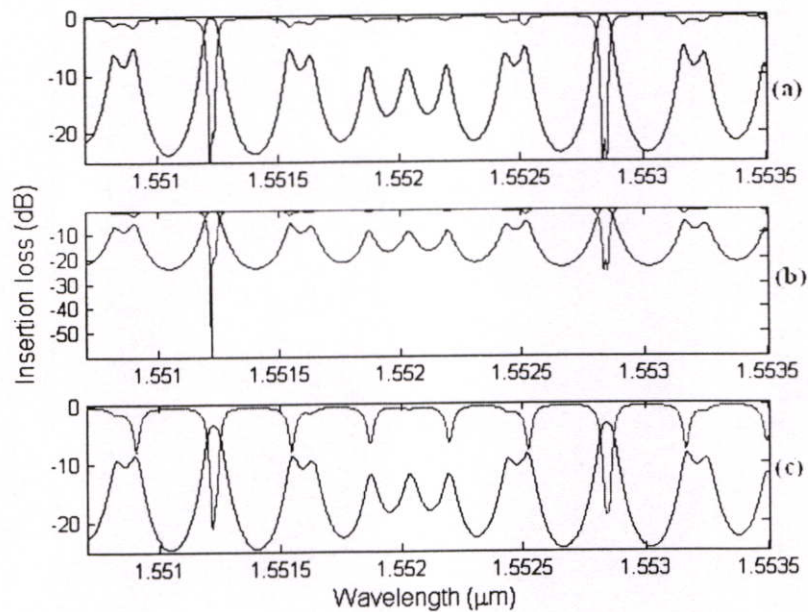
$$\kappa_0 = \kappa_2 = 0.5, \kappa_1 = 0.13 \text{ (a) } \alpha = 0 \text{ dB cm}^{-1} \text{ (b) } \alpha = 0.1 \text{ dB cm}^{-1} \text{ (c) } \alpha = 0.51 \text{ dB cm}^{-1}$$

4.3.3.2 ช่องทางสัญญาณที่ $FSR = 100 \text{ GHz}$:



รูปที่ 4.16 ผลจำลองการลดทอนสัญญาณอินพุทของ DRR ที่ $R_1 = 966 \mu\text{m}$, $R_2 = 1104.5 \mu\text{m}$, $\kappa_0 = \kappa_2 = 0.5$, $\kappa_1 = 0.13$ (a) $\alpha = 0 \text{ dB cm}^{-1}$ (b) $\alpha = 0.1 \text{ dB cm}^{-1}$ (c) $\alpha = 0.5 \text{ dB cm}^{-1}$

4.3.3.3 ช่องทางสัญญาณที่ $FSR = 200 \text{ GHz}$:



รูปที่ 4.17 ผลจำลองการลดทอนสัญญาณอินพุทของ DRR ที่ $R_1 = 274 \mu\text{m}$, $R_2 = 342 \mu\text{m}$, $\kappa_0 = \kappa_2 = 0.5$, $\kappa_1 = 0.13$ (a) $\alpha = 0 \text{ dB cm}^{-1}$ (b) $\alpha = 0.1 \text{ dB cm}^{-1}$ (c) $\alpha = 1 \text{ dB cm}^{-1}$

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างโพรงสี่เหลี่ยมวงแหวนคู่แบบอสมมาตรที่มีรัศมีระดับไมโครเมตร โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบเมทริกซ์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นตัวกรองสัญญาณทางแสง ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองคือ GaInAsP/InP มีค่า $n_{\text{ge}} = 3.46$ ที่ความยาวคลื่น 1.55 nm ทำการจำลองโดยการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างโพรงวงแหวน เช่น รัศมีของวงแหวน สัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงแสง สัมประสิทธิ์การลดทอนของวงแหวน ผลการจำลองสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและสร้างสิ่งประดิษฐ์ตัวกรองสัญญาณแอดครีปที่ท่อนำคลื่นได้

โพรงสี่เหลี่ยมวงแหวนคู่แบบสมมาตร

โพรงสี่เหลี่ยมวงแหวนคู่ที่มีรัศมีวงแหวนทั้งสองเท่ากันและคัปเปลอร์รีด้านนอกที่สมมาตรกัน ($\kappa_0 = \kappa_2$) ความยาวคลื่นแสงอินพุตที่เกิดเรโซแนนซ์กับโพรงสี่เหลี่ยมเกิดขึ้นเมื่อ $\phi_1 = \phi_2 = k_n L = 2m\pi$ เมื่อ m เป็นเลขจำนวนเต็ม DRR ที่มีสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงคือ $\kappa_0 = \kappa_2 = 0.5$ และ $\kappa_1 = 0.13$ และไม่มีการสูญเสียในวงแหวน จะได้ตัวประกอบสัญญาณที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดรูปร่างการกรองที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมที่สเปกตรัมของแถบผ่านมีลักษณะขอบแบนและสูงชัน อัตราส่วนเปิดปิดที่มีค่าสูงมากกว่า 20 dB โพรงสี่เหลี่ยมที่มีการสูญเสียภายในวงแหวนนอกจากจะเกิดการลดทอนแอมพลิจูดของสัญญาณแสงเอาต์พุตแล้วยังลดรูปร่างผลตอบสนองที่เป็นรูปสี่เหลี่ยม สัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงของ DRR ที่มี $\kappa_0 = \kappa_2 = 0.5$ และ $\kappa_1 > 0.13$ จะเกิดริบเปิด 2 ริบเปิดซึ่งเป็นผลมาจากความไม่เข้าใจกันจากการเลื่อนตำแหน่งของการเกิดเรโซแนนซ์ระหว่างวงแหวนทั้งสองวง

โพรงสี่เหลี่ยมวงแหวนคู่แบบอสมมาตร

โพรงสี่เหลี่ยมวงแหวนคู่จะให้ค่าช่องว่างของสัญญาณ (FSR) น้อยกว่าต่อหลาย ๆ ตัว โดยทั่วไป ซึ่งจะเป็นลักษณะเฉพาะ ทำได้โดยการเลือกรัศมีที่แตกต่างกันของเรโซเนเตอร์วงแหวน ในลักษณะนี้จะทำให้มีสัญญาณแสงออกทางครีปพอร์ตเป็นไปตามเงื่อนไขของการเกิดเรโซแนนซ์ ค่าช่องว่างของสัญญาณ การที่ยอมรับมาใช้ในโครงสร้างแต่ไซด์โหมดที่กันไว้ นั้น ไม่เพียงพอที่จะเตรียมไว้สำหรับช่องสัญญาณที่ใช้งานจริงเช่นในระบบการมัลติเพล็กซ์เชิงแสง เมื่อมีการเลือกใช้รัศมีของวงแหวนที่แตกต่างกันเพื่อให้ได้ช่องว่างของสัญญาณที่มีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าการที่ใช้เรโซเนเตอร์วงแหวนแบบเดี่ยว คุณลักษณะของการส่งของเอาต์พุตพอร์ท E_{11} จะมีความสำคัญต่อลักษณะการกรองแบบโลลองเซียน ตัวกรองสัญญาณแบบบล็อก-ไลท์ สามารถทำให้เป็นจริงได้

โดยใช้ เรโซเนเตอร์วงแหวนคู่ที่ต่อกันแบบขนาน และมีรัศมีของวงแหวนที่ไม่เท่ากัน ($R_1 \neq R_2$) ซึ่ง การใช้งานของตัวกรองทางแสงจะถูกจำกัดโดยเงื่อนไขของจุดเรโซแนนซ์

ตัวกรอง DRR ออกแบบให้มีช่องห่างสัญญาณ หรือ FSR ที่ขยายกว้างขึ้น ซึ่งทำได้ โดยเลือกรัศมีวงแหวนของ DRR ให้มีค่าต่างกัน ($R_1 \neq R_2$) ในกรณีที่ DRR ที่มีรัศมีวงแหวนต่างกันแสงที่ผ่านทะลุเข้าไปใน DRR และจะออกมาทางพอร์ตครีโปกได้ก็ต่อเมื่อสภาวะการเกิด เรโซแนนซ์ ของวงแหวนทั้งสองต้องสอดคล้องกัน FSR ของ DRR ที่มีรัศมีวงแหวนต่างกัน

1. การเปลี่ยนแปลงรัศมีของโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่แบบอสมมาตร

ความสามารถในการเพิ่มความจุข้อมูลทำได้ด้วยการลดช่องห่างสัญญาณ FSR ให้แคบลงในการออกแบบ FSR ของตัวกรองสัญญาณแอดค/ครีโปก ทำได้โดยควบคุมรัศมีวงแหวน ถ้าวางวงแหวนมีรัศมีขนาดใหญ่จะมีผลทำให้ FSR มีค่าน้อยลงตามลำดับ

2. การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงแสง

โพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่ DRR ไม่มีการสูญเสียทางแสงภายในวงแหวน ($\alpha = 0$) การจำลองการตอบสนองของ DRR ที่มีสัมประสิทธิ์การคัปปลิง $\kappa_0 = \kappa_2 = 0.5$ และ $\kappa_1 < 0.2$ อัตราส่วนเปิด-ปิดที่ได้มีค่า < 20 dB

3. การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ของการลดทอนความเข้มแสง

โพรงสั้นพ้อง DRR ที่มีความสูญเสียภายในวงแหวน เมื่อบางวงแหวนทั้งสองมีสัมประสิทธิ์ของการลดทอนสูงขึ้น ที่พอร์ตครีโปกจะเกิดการลดทอนแอมพลิจูดของสัญญาณแสงและการลดทอนของตัวประกอบสัญญาณส่งผลให้รูปร่างผลตอบสนองรูปสี่เหลี่ยมลดลง

วิธีการนำเสนอในวิทยานิพนธ์เป็นเทคนิคหนึ่งเท่านั้นที่ช่วยในการปรับปรุงโพรงสั้นพ้องวงแหวนคู่แบบอสมมาตรแต่ก็ยังมีเทคนิควิธีการอื่นที่น่าสนใจ และสามารถที่ทำให้ควบคุมการขยายรัศมีของวงแหวนได้ด้วยเอกสารโลหะที่แขนของวงแหวน

บรรณานุกรม

- [1] อธิคม ฤกษ์บุตร. เส้นใยและการประยุกต์ใช้งานเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ด
ยูเคชั่น. 2546.
- [2] R. Van Nee and R. Prasad, **OFDM for Wireless Multimedia Communications**. Boston,
London: Artech House, 2000.
- [3] A. F. Molisch, **Wideband Wireless Digital Communications**. New Jersey: Prentice
Hall PTR, 2001.
- [4] E. A. J. Marcatili. "Bends in Optical Dielectric Guides." **Bell. Syst. Tech. J.**, vol. 48,
1969. pp. 2103-2132.
- [5] E. A. J. Marcatili. "Dielectric Rectangular Waveguide and Directional Coupler for
Integrated Optics." **Bell. Syst. Tech. J.**, vol. 48, 1969. pp. 2071-2101.
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 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
- [10] D. J. W. Klunder et al., "Vertically and laterally waveguide-coupled cylindrical
microresonators in Si₃N₄ on SiO₂ technology." **Appl. Phys. B 73.**, November 2001.
pp. 603-608
- [11] B. Vanderhaegen et al.. "High Q GaInAsP ring resonator filters." **ECIO'99**, Torino Italy,
April 1999. pp. 381-384
- [12] 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

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [13] 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
- [14] 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
- [15] ปรีชา ขุพาพิน. วิศวกรรมใยแก้วนำแสง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ศ.ศ.ท. 2544.
- [16] J. Yang et al.. "Characteristics of optical bandpass filters employing series-cascaded double-ring resonators." **Optics Communications**, Sept 2003. pp. 91-98
- [17] D. G. Rabus, M. Hamacher, and H. Heidrich. "Active and Passive Micro ring Resonator Filter Applications in GaInAsP/InP." **13th IPRM**, Nara Japan. May 2001. pp. 477-480
- [18] Ing. Klar, Ing. Petermann, rer. Nat. Weber. "Realization of Optical Filters using Ring Resonators with integrated Semiconductor Optical Amplifiers in GaInAsP/InP." Berlin, May 2002. pp.31-35
- [19] Senichi Suzuki, Kazuhiro Oda, Yoshinori Hibino. "Integrated Optic Double Ring Resonators with a Wide Free Spectral Range of 100 GHz." **IEEE J. Lightwave Tech.**, vol. 13, no. 8, November 1995. pp. 1766-1770

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการทำงาน DRR

```

% Transmission spectrum of a Double ring resonator simulation
      % H12(z) = Et2/Ei1
      % \\..... DROP PORT wrt INPUT1 .....//

% R is the radius
% kn is the wave propagation constant, La is the wavelength
% ne is the effective refractive index,
% ngr is the group refractive index,
syms y0 y1 y2 x K0 K1 K2
clc; clear all;clf;

set(gcf,'NumberTitle','off','Name','Drop port wrt input1 of DRR')

% DRR parameter are set as following:
Lamda = 1.548:0.000001:1.549;
%p =pi:0.1:5*pi ; % P is the phase
K0 = 0.5;      % K0, K1, K2, K3 is each the coupling factors
K1 = 0.13;
K2 = 0.5;
ngr = 3.46;
A = 0; % A = 0 dB/cm % A is the intensity attenuator coefficient
R = 345*10^(-6) %R is a radius of ring resonator
L = 2*pi*R; % L is the circumference of the ring (2*pi*R)
%p = 2*pi*ngr*L*10^(6)/Lamda; % with a given parameter values then p = 47077.62./Lamda
C = 2*pi*ngr*L*10^(6)
x = exp(-A/2*L);
y0 = (1-K0)^0.5;
y1 = (1-K1)^0.5;
y2 = (1-K2)^0.5;

It2 = x^2-x^2*(y1)^2-2*x^2*(y2)^2+2*x^2*(y2)^2*(y1)^2+x^2*(y2)^4-x^2*(y2)^4*(y1)^2;
%Ii1=2*x^2*(y2)^2*cos(2*p)+4*cos(p)*(y2)*(y1)*x^4*cos(p)*x^3*(y2)^3*(y1)+1+x^4*(y2)^4+
4*x^2*(y2)^2*(y1)^2;

% Transfer_DRR = (It2)/(Ii1);

```

```
Transfer_DRR = 10*log10((x^2-x^2*(y1)^2-2*x^2*(y2)^2+2*x^2*(y2)^2*(y1)^2+x^2*(y2)^4-
x^2*(y2)^4*(y1)^2)/(2*x^2*(y2)^2*cos(2*C./Lamda)-4*cos(C./Lamda)*(y2)*(y1)*x-
4*cos(C./Lamda)*x^3*(y2)^3*(y1)+1+x^4*(y2)^4+4*x^2*(y2)^2*(y1)^2));
```

```
plot(Lamda,Transfer_DRR,'b')
```

```
hold on
```

```
%It1 = 2*(y2)^2*x^2*cos(2*p)-2*cos(p)*(y2)^3*(y1)*x-2*cos(p)*(y2)^3*x^3*(y1)-
2*cos(p)*(y2)*x^3*(y1)2*cos(p)*(y1)*x*(y2)+(y2)^2+(y2)^2*x^4+2*(y1)^2*x^2*(y2)^2+(y2)
^4*(y1)^2*x^2+(y1)^2*x^2
```

```
Transfer_DRR1 = 10*log10((2*(y2)^2*x^2*cos(2*C./Lamda)2*cos(C./Lamda)*(y2)^3*(y1)*x-
2*cos(C./Lamda)*(y2)^3*x^3*(y1)2*cos(C./Lamda)*(y2)*x^3*(y1)2*cos(C./Lamda)*(y1)*x*(
y2)+(y2)^2+(y2)^2*x^4+2*(y1)^2*x^2*(y2)^2+(y2)^4*(y1)^2*x^2+(y1)^2*x^2)/(2*x^2*(y2)
^2*cos(2*C./Lamda)-4*cos(C./Lamda)*(y2)*(y1)*x-
4*cos(C./Lamda)*x^3*(y2)^3*(y1)+1+x^4*(y2)^4+4*x^2*(y2)^2*(y1)^2));
```

```
plot(Lamda,Transfer_DRR1,'r')
```

```
hold off
```

```
axis([1.548 1.549 -25 0.5]);
```

```
text(1.55075,-21,'drop port','FontSize',[10])
```

```
text(1.5507,-3,'throughput port','FontSize',[10])
```

```
xlabel('wavelength (\mum)','Fontname','Time-Roman','FontSize',12);
```

```
ylabel('Insertion Loss (dB)','Fontname','Time-Roman','FontSize',12);
```

```
%xlabel('wavelength (\mum)','Fontname','Time-Roman','FontSize',10,'FontAngle','oblique');
```

```
%ylabel('Insertion Loss (dB)','Fontname','Time-Roman','FontSize',10,'FontAngle','oblique');
```

```
%title('The Transmission Spectrum at Drop port wrt input1 of a Double Ring
Resonator','Fontname','Time-Roman','FontSize',10)
```



```

% Transmission spectrum of a Double ring resonator simulation
%  $H_{12}(z) = E_t/E_i$ 
% \\..... DROP PORT wrt INPUT1 .....//

% R is the radius
% kn is the wave propagation constant, La is the wavelength
% ne is the effective refractive index,
% ngr is the group refractive index,

syms y0 y1 y2 x1 x2 K0 K1 K2
clc; clear all;clf;
set(gcf,'NumberTitle','off','Name','Drop port wrt input1 of DRR')

% DRR parameter are set as following:
Lamda = 1.55015:0.000001:1.55055;
%p = pi:0.1:5*pi ; % P is the phase
K0 = 0.5; % K0, K1, K2, K3 is each the coupling factors
K1 = 0.13;
K2 = 0.5;

ngr = 3.46;
A = 0; % A = 0 dB/cm % A is the intensity attenuator coefficient
R1 = 2422.8*10^(-6) %R1 is a radius of ring resonator1
L1 = 2*pi*R1; % L1 is the circumference of the ring (2*pi*R1)
R2 = 2766*10^(-6) %R2 is a radius of ring resonator2
L2 = 2*pi*R2; % L2 is the circumference of the ring (2*pi*R2)
%p1 = 2*pi*ngr*L1*10^(6)./Lamda; % with a given parameter values then p1 =
330498.5./Lamda
%p2 = 2*pi*ngr*L2*10^(6)./Lamda; % with a given parameter values then p2 =
377548.8./Lamda
C1 = 2*pi*ngr*L1*10^(6)
C2 = 2*pi*ngr*L2*10^(6)
x1 = exp(-A/2*L1);
x2 = exp(-A/2*L2);
y0 = (1-K0)^0.5;

```

$$y1 = (1-K1)^{0.5};$$

$$y2 = (1-K2)^{0.5};$$

$$It2 = x1^2 * x2^2 - x1^2 * x2^2 * y1^2 -$$

$$2 * x1^2 * x2^2 * y2^2 + 2 * x1^2 * x2^2 * y2^2 * y1^2 + x1^2 * x2^2 * y2^4 - x1^2 * x2^2 * y2^4 * y1^2;$$

$$\%Ii1 = 2 * y2^2 * x1 * x2 * \cos(p1 + p2) - 2 * \cos(p2) * y2 * y1 * x2 - 2 * \cos(p2) * y2^3 * x1^2 * x2 * y1 -$$

$$2 * \cos(p1) * y2^3 * x1 * x2^2 * y1 - 2 * \cos(p1) * y2 * y1 * x1 + 2 * y2^2 * y1^2 * x1 * x2 * \cos(p1 -$$

$$p2) + 1 + y2^2 * y1^2 * x1^2 + y2^2 * y1^2 * x2^2 + x1^2 * x2^2 * y2^4;$$

$$\% \text{Transfer_DRR} = (It2) ./ (Ii1);$$

$$\text{Transfer_DRR} = 10 * \log_{10}((x1^2 * x2^2 - x1^2 * x2^2 * y1^2 -$$

$$2 * x1^2 * x2^2 * y2^2 + 2 * x1^2 * x2^2 * y2^2 * y1^2 + x1^2 * x2^2 * y2^4 -$$

$$x1^2 * x2^2 * y2^4 * y1^2) ./ (2 * y2^2 * x1 * x2 * \cos(C1 ./ \text{Lamda} + C2 ./ \text{Lamda}) -$$

$$2 * \cos(C2 ./ \text{Lamda}) * y2 * y1 * x2 - 2 * \cos(C2 ./ \text{Lamda}) * y2^3 * x1^2 * x2 * y1 -$$

$$2 * \cos(C1 ./ \text{Lamda}) * y2^3 * x1 * x2^2 * y1 -$$

$$2 * \cos(C1 ./ \text{Lamda}) * y2 * y1 * x1 + 2 * y2^2 * y1^2 * x1 * x2 * \cos(C1 ./ \text{Lamda} -$$

$$C2 ./ \text{Lamda}) + 1 + y2^2 * y1^2 * x1^2 + y2^2 * y1^2 * x2^2 + x1^2 * x2^2 * y2^4));$$

plot(Lamda, Transfer_DRR, 'b')

hold on

$$\%Ii1 = 2 * y2^2 * x1 * x2 * \cos(p1 + p2) - 2 * \cos(p2) * y2 * y1 * x2 - 2 * \cos(p2) * y2^3 * x1^2 * x2 * y1 -$$

$$2 * \cos(p1) * y2^3 * x1 * x2^2 * y1 - 2 * \cos(p1) * y2 * y1 * x1 + 2 * y2^2 * y1^2 * x1 * x2 * \cos(p1 -$$

$$p2) + 1 + y2^2 * y1^2 * x1^2 + y2^2 * y1^2 * x2^2 + x1^2 * x2^2 * y2^4;$$

$$\text{Transfer_DRR} = 10 * \log_{10}((2 * y2^2 * y1^2 * x1 * x2 * \cos(C1 ./ \text{Lamda} -$$

$$C2 ./ \text{Lamda}) + 2 * y2^2 * x1 * x2 * \cos(C1 ./ \text{Lamda} + C2 ./ \text{Lamda}) - 2 * \cos(C2 ./ \text{Lamda}) * y2 * y1 * x2 -$$

$$2 * \cos(C2 ./ \text{Lamda}) * y2^3 * y1 * x1^2 * x2 - 2 * \cos(C1 ./ \text{Lamda}) * y2 * x1 * x2^2 * y1 -$$

$$2 * \cos(C1 ./ \text{Lamda}) * y2^3 * y1 * x1 + y2^2 + y1^2 * x2^2 + y2^2 * x1^2 * x2^2 + y2^4 * y1^2 * x1^2) ./ (2 * y2$$

$$^2 * x1 * x2 * \cos(C1 ./ \text{Lamda} + C2 ./ \text{Lamda}) - 2 * \cos(C2 ./ \text{Lamda}) * y2 * y1 * x2 -$$

$$2 * \cos(C2 ./ \text{Lamda}) * y2^3 * x1^2 * x2 * y1 - 2 * \cos(C1 ./ \text{Lamda}) * y2^3 * x1 * x2^2 * y1 -$$

$$2 * \cos(C1 ./ \text{Lamda}) * y2 * y1 * x1 + 2 * y2^2 * y1^2 * x1 * x2 * \cos(C1 ./ \text{Lamda} -$$

$$C2 ./ \text{Lamda}) + 1 + y2^2 * y1^2 * x1^2 + y2^2 * y1^2 * x2^2 + x1^2 * x2^2 * y2^4));$$

plot(Lamda, Transfer_DRR, 'r')

hold off

```
axis([1.55015 1.55055 -25 0.5]);
```

```
%text(1.55075,-21,'drop port','FontSize',[10])
```

```
%text(1.5507,-3,'throughput port','FontSize',[10])
```

```
xlabel('wavelength (\mum)','Fontname','Time-Roman','FontSize',12);
```

```
ylabel('Insertion Loss (dB)','Fontname','Time-Roman','FontSize',12);
```

```
%xlabel('wavelength (\mum)','Fontname','Time-Roman','FontSize',10,'FontAngle','oblique');
```

```
%ylabel('Insertion Loss (dB)','Fontname','Time-Roman','FontSize',10,'FontAngle','oblique');
```

```
%title('The Transmission Spectrum at Drop port wrt input1 of a Double Ring
```

```
Resonator','Fontname','Time-Roman','FontSize',10)
```

```
%      Transfer function for DRR
```

```
%       $H_{22}(z) = E_{t1}/E_{i1}$ 
```

```
clc;
```

```
syms y0 y1 y2 x1 x2 p1 p2
```

```
phase1 = i*p1;
```

```
phase2 = i*p2;
```

```
y0 = y2;
```

```
% Et1(z)
```

```
Et1 = ((y0)*(1-(y0)^2)*x1*EXP(-phase1)*((y2)*x2*EXP(-phase2)-(y1)));
```

```
% conj(B2R) = conjugate of B2R
```

```
conjEt1 = ((y0)*(1-(y0)^2)*x1*EXP(phase1)*((y2)*x2*EXP(phase2)-(y1)));
```

```
ExpandedEt1 = expand(Et1*conjEt1);
```

```
It1 = simplify(ExpandedEt1) % simplify form ; It1 is intensity
```

```
% A1 = Et1
```

```
A1 = (1-(y0)*(y1)*x1*EXP(-phase1) - (y1)*(y2)*x2*EXP(-phase2) + (y0)*(y2)*x1*EXP(-phase1)*x2*EXP(-phase2));
```

```

% conj(A21 = conjugate of A1
conjA1 = (1-(y0)*(y1)*x1*EXP(phase1) - (y1)*(y2)*x2*EXP(phase2) +
(y0)*(y2)*x1*EXP(phase1)*x2*EXP(phase2));

ExpandedA1 = expand(A1*conjA1);

Ii1 = simplify(ExpandedA1)    % simplify form ; Ii1 is intensity

```

```

% Transmission spectrum of a Double ring resonator simulation

```

```

    %  $H_{12}(z) = E_t/E_i$ 

```

```

    % \\\..... DROP PORT wrt INPUT1 .....///

```

```

% R is the radius

```

```

% kn is the wave propagation constant, La is the wavelength

```

```

% ne is the effective refractive index,

```

```

% ngr is the group refractive index,

```

```

syms y0 y1 y2 x1 x2 K0 K1 K2

```

```

clc; clear all;clf;

```

```

set(gcf,'NumberTitle','off','Name','Drop port wrt input1 of DRR')

```

```

% DRR parameter are set as following:

```

```

Lamda = 1.5505:0.000001:1.5533;

```

```

%p = pi:0.1:5*pi ; % P is the phase

```

```

K0 = 0.57;    % K0, K1, K2, K3 is each the coupling factors

```

```

K1 = 0.2;

```

```

K2 = 0.57;

```

```

ngr = 3.46;

```

```

A = 10; % A = 0 dB/cm % A is the intensity attenuator coefficient

```

```

R1 = 274*10^(-6) %R1 is a radius of ring resonator1

```

```

L1 = 2*pi*R1; % L1 is the circumference of the ring (2*pi*R1)

```

```

R2 = 342*10^(-6) %R2 is a radius of ring resonator2

```

```

L2 = 2*pi*R2; % L2 is the circumference of the ring (2*pi*R2)

```

```

%p1 = 2*pi*ng*r*L1*10^(6)./Lamda; % with a given parameter values then p1 =
330498.5./Lamda
%p2 = 2*pi*ng*r*L2*10^(6)./Lamda; % with a given parameter values then p2 =
377548.8./Lamda
C1 = 2*pi*ng*r*L1*10^(6)
C2 = 2*pi*ng*r*L2*10^(6)
x1 = exp(-A/2*L1);
x2 = exp(-A/2*L2);
y0 = (1-K0)^0.5;
y1 = (1-K1)^0.5;
y2 = (1-K2)^0.5;

It1 = 2*y1^2*x1*y2^2*x2*cos(C1./Lamda-
C2./Lamda)+2*y2^2*x1*x2*cos(C1./Lamda+C2./Lamda)-2*cos(C2./Lamda)*y2^3*y1*x2-
2*cos(C2./Lamda)*y2*x1^2*x2*y1-2*cos(C1./Lamda)*y2*y1*x1-
2*cos(C1./Lamda)*y2^3*y1*x2^2*x1+y2^2+y1^2*x1^2+y2^2*x1^2*x2^2+y2^4*y1^2*x2^2;

%i1 = 2*y2^2*x1*x2*cos(p1+p2)-2*cos(p2)*y2*y1*x2-2*cos(p2)*y2^3*x1^2*x2*y1-
2*cos(p1)*y2^3*x1*x2^2*y1-2*cos(p1)*y2*y1*x1+2*y2^2*y1^2*x1*x2*cos(p1-
p2)+1+y2^2*y1^2*x1^2+y2^2*y1^2*x2^2+x1^2*x2^2*y2^4;

% Transfer_DRR = (It1)/(i1);
Transfer_DRR = 10*log10((2*y1^2*x1*y2^2*x2*cos(C1./Lamda-
C2./Lamda)+2*y2^2*x1*x2*cos(C1./Lamda+C2./Lamda)-2*cos(C2./Lamda)*y2^3*y1*x2-
2*cos(C2./Lamda)*y2*x1^2*x2*y1-2*cos(C1./Lamda)*y2*y1*x1-
2*cos(C1./Lamda)*y2^3*y1*x2^2*x1+y2^2+y1^2*x1^2+y2^2*x1^2*x2^2+y2^4*y1^2*x2^2).
/(2*y2^2*x1*x2*cos(C1./Lamda+C2./Lamda)-2*cos(C2./Lamda)*y2*y1*x2-
2*cos(C2./Lamda)*y2^3*x1^2*x2*y1-2*cos(C1./Lamda)*y2^3*x1*x2^2*y1-
2*cos(C1./Lamda)*y2*y1*x1+2*y2^2*y1^2*x1*x2*cos(C1./Lamda-
C2./Lamda)+1+y2^2*y1^2*x1^2+y2^2*y1^2*x2^2+x1^2*x2^2*y2^4));

plot(Lamda,Transfer_DRR,'r')

axis([1.5505 1.5533 -25 0.5]);

```

```

%text(1.55075,-21,'drop port','FontSize',[10])
%text(1.5507,-3,'throughput port','FontSize',[10])

xlabel('wavelength (\mum)','Fontname','Time-Roman','FontSize',12);
ylabel('Insertion Loss (dB)','Fontname','Time-Roman','FontSize',12);

%xlabel('wavelength (\mum)','Fontname','Time-Roman','FontSize',10,'FontAngle','oblique');
%ylabel('Insertion Loss (dB)','Fontname','Time-Roman','FontSize',10,'FontAngle','oblique');

title('The Transmission Spectrum at Drop port wrt input1 of a Double Ring
Resonator','Fontname','Time-Roman','FontSize',10)

```

```

% Transmission spectrum of a single fiber ring resonator simulation
    % 1 ring 2 couplers add/drop filter

clf; clear all, clc;
set(gcf,'NumberTitle','off','Name','Logarithm of Through and Drop port wrt input1 of SRR')
format long g

Lamda = 1.5503:0.000001:1.5513;

%Lamda = 1.55015:0.000001:1.55055;

%p =pi:0.1:5*pi ; % P is the phase
K0 = 0.5;    % K0, K1, K2, K3 is each the coupling factors
K1 = 0.13;
K2 = 0.5;

ngr = 3.46;

A = 0; % A = 0 dB/cm % A is the intensity attenuator coefficient
R1 = 966*10^(-6) %R1 is a radius of ring resonator1
L1 = 2*pi*R1; % L1 is the circumference of the ring (2*pi*R1)
R2 = 1104.5*10^(-6) %R2 is a radius of ring resonator2
L2 = 2*pi*R2; % L2 is the circumference of the ring (2*pi*R2)

```

```

%p1 = 2*pi*ng*r*L1*10^(6)./Lamda; % with a given parameter values then p1 =
330498.5./Lamda
%p2 = 2*pi*ng*r*L2*10^(6)./Lamda; % with a given parameter values then p2 =
377548.8./Lamda
C1 = 2*pi*ng*r*L1*10^(6)
C2 = 2*pi*ng*r*L2*10^(6)
x1 = exp(-A/2*L1);
x2 = exp(-A/2*L2);
y0 = (1-K0)^0.5;
y1 = (1-K1)^0.5;
y2 = (1-K2)^0.5;

Subplot (3,1,1);

It2 = x1^2*x2^2-x1^2*x2^2*y1^2-
2*x1^2*x2^2*y2^2+2*x1^2*x2^2*y2^2*y1^2+x1^2*x2^2*y2^4-x1^2*x2^2*y2^4*y1^2;

%Ii1 = 2*y2^2*x1*x2*cos(p1+p2)-2*cos(p2)*y2*y1*x2-2*cos(p2)*y2^3*x1^2*x2*y1-
2*cos(p1)*y2^3*x1*x2^2*y1-2*cos(p1)*y2*y1*x1+2*y2^2*y1^2*x1*x2*cos(p1-
p2)+1+y2^2*y1^2*x1^2+y2^2*y1^2*x2^2+x1^2*x2^2*y2^4;

% Transfer_DRR = (It2)./(Ii1);
Transfer_DRR = 10*log10((x1^2*x2^2-x1^2*x2^2*y1^2-
2*x1^2*x2^2*y2^2+2*x1^2*x2^2*y2^2*y1^2+x1^2*x2^2*y2^4-
x1^2*x2^2*y2^4*y1^2)./(2*y2^2*x1*x2*cos(C1./Lamda+C2./Lamda)-
2*cos(C2./Lamda)*y2*y1*x2-2*cos(C2./Lamda)*y2^3*x1^2*x2*y1-
2*cos(C1./Lamda)*y2^3*x1*x2^2*y1-
2*cos(C1./Lamda)*y2*y1*x1+2*y2^2*y1^2*x1*x2*cos(C1./Lamda-
C2./Lamda)+1+y2^2*y1^2*x1^2+y2^2*y1^2*x2^2+x1^2*x2^2*y2^4));

plot(Lamda,Transfer_DRR,'b')
hold on
%Ii1 = 2*y2^2*x1*x2*cos(p1+p2)-2*cos(p2)*y2*y1*x2-2*cos(p2)*y2^3*x1^2*x2*y1-
2*cos(p1)*y2^3*x1*x2^2*y1-2*cos(p1)*y2*y1*x1+2*y2^2*y1^2*x1*x2*cos(p1-
p2)+1+y2^2*y1^2*x1^2+y2^2*y1^2*x2^2+x1^2*x2^2*y2^4;

```

```

Transfer_DRR = 10*log10((2*y2^2*y1^2*x1*x2*cos(C1./Lamda-
C2./Lamda)+2*y2^2*x1*x2*cos(C1./Lamda+C2./Lamda)-2*cos(C2./Lamda)*y2*y1*x2-
2*cos(C2./Lamda)*y2^3*y1*x1^2*x2-2*cos(C1./Lamda)*y2*x1*x2^2*y1-
2*cos(C1./Lamda)*y2^3*y1*x1+y2^2+y1^2*x2^2+y2^2*x1^2*x2^2+y2^4*y1^2*x1^2)/(2*y2
^2*x1*x2*cos(C1./Lamda+C2./Lamda)-2*cos(C2./Lamda)*y2*y1*x2-
2*cos(C2./Lamda)*y2^3*x1^2*x2*y1-2*cos(C1./Lamda)*y2^3*x1*x2^2*y1-
2*cos(C1./Lamda)*y2*y1*x1+2*y2^2*y1^2*x1*x2*cos(C1./Lamda-
C2./Lamda)+1+y2^2*y1^2*x1^2+y2^2*y1^2*x2^2+x1^2*x2^2*y2^4));

```

```

plot(Lamda,Transfer_DRR,'r');axis tight;

```

```

hold off

```

```

axis([1.5503 1.5513 -25 0.5]);

```

```

%p =pi:0.1:5*pi ; % P is the phase

```

```

K0 = 0.5; % K0, K1, K2, K3 is each the coupling factors

```

```

K1 = 0.13;

```

```

K2 = 0.5;

```

```

ngr = 3.46;

```

```

A = 10; % A = 0 dB/cm % A is the intensity attenuator coefficient

```

```

R1 = 966*10^(-6) %R1 is a radius of ring resonator1

```

```

L1 = 2*pi*R1; % L1 is the circumference of the ring (2*pi*R1)

```

```

R2 = 1104.5*10^(-6) %R2 is a radius of ring resonator2

```

```

L2 = 2*pi*R2; % L2 is the circumference of the ring (2*pi*R2)

```

```

%p1 = 2*pi*ngr*L1*10^(6)./Lamda; % with a given parameter values then p1 =
330498.5./Lamda

```

```

%p2 = 2*pi*ngr*L2*10^(6)./Lamda; % with a given parameter values then p2 =
377548.8./Lamda

```

```

C1 = 2*pi*ngr*L1*10^(6)

```

```

C2 = 2*pi*ngr*L2*10^(6)

```

```

x1 = exp(-A/2*L1);

```

```

x2 = exp(-A/2*L2);

```

```

y0 = (1-K0)^0.5;

```

```

y1 = (1-K1)^0.5;
y2 = (1-K2)^0.5;

Subplot (3,1,2);

It2 = x1^2*x2^2-x1^2*x2^2*y1^2-
2*x1^2*x2^2*y2^2+2*x1^2*x2^2*y2^2*y1^2+x1^2*x2^2*y2^4-x1^2*x2^2*y2^4*y1^2;

%Ii1 = 2*y2^2*x1*x2*cos(p1+p2)-2*cos(p2)*y2*y1*x2-2*cos(p2)*y2^3*x1^2*x2*y1-
2*cos(p1)*y2^3*x1*x2^2*y1-2*cos(p1)*y2*y1*x1+2*y2^2*y1^2*x1*x2*cos(p1-
p2)+1+y2^2*y1^2*x1^2+y2^2*y1^2*x2^2+x1^2*x2^2*y2^4;

% Transfer_DRR = (It2)/(Ii1);
Transfer_DRR = 10*log10((x1^2*x2^2-x1^2*x2^2*y1^2-
2*x1^2*x2^2*y2^2+2*x1^2*x2^2*y2^2*y1^2+x1^2*x2^2*y2^4-
x1^2*x2^2*y2^4*y1^2)/(2*y2^2*x1*x2*cos(C1./Lamda+C2./Lamda)-
2*cos(C2./Lamda)*y2*y1*x2-2*cos(C2./Lamda)*y2^3*x1^2*x2*y1-
2*cos(C1./Lamda)*y2^3*x1*x2^2*y1-
2*cos(C1./Lamda)*y2*y1*x1+2*y2^2*y1^2*x1*x2*cos(C1./Lamda-
C2./Lamda)+1+y2^2*y1^2*x1^2+y2^2*y1^2*x2^2+x1^2*x2^2*y2^4));

plot(Lamda,Transfer_DRR,'b')
hold on

%Ii1 = 2*y2^2*x1*x2*cos(p1+p2)-2*cos(p2)*y2*y1*x2-2*cos(p2)*y2^3*x1^2*x2*y1-
2*cos(p1)*y2^3*x1*x2^2*y1-2*cos(p1)*y2*y1*x1+2*y2^2*y1^2*x1*x2*cos(p1-
p2)+1+y2^2*y1^2*x1^2+y2^2*y1^2*x2^2+x1^2*x2^2*y2^4;

Transfer_DRR = 10*log10((2*y2^2*y1^2*x1*x2*cos(C1./Lamda-
C2./Lamda)+2*y2^2*x1*x2*cos(C1./Lamda+C2./Lamda)-2*cos(C2./Lamda)*y2*y1*x2-
2*cos(C2./Lamda)*y2^3*y1*x1^2*x2-2*cos(C1./Lamda)*y2*x1*x2^2*y1-
2*cos(C1./Lamda)*y2^3*y1*x1+y2^2+y1^2*x2^2+y2^2*x1^2*x2^2+y2^4*y1^2*x1^2)/(2*y2
^2*x1*x2*cos(C1./Lamda+C2./Lamda)-2*cos(C2./Lamda)*y2*y1*x2-
2*cos(C2./Lamda)*y2^3*x1^2*x2*y1-2*cos(C1./Lamda)*y2^3*x1*x2^2*y1-
2*cos(C1./Lamda)*y2*y1*x1+2*y2^2*y1^2*x1*x2*cos(C1./Lamda-
C2./Lamda)+1+y2^2*y1^2*x1^2+y2^2*y1^2*x2^2+x1^2*x2^2*y2^4));

```

```

plot(Lamda,Transfer_DRR,'r');axis tight;
hold off

ylabel('Insertion loss (dB)','Fontname','Time-Roman','FontSize',12);

%p =pi:0.1:5*pi ; % P is the phase
K0 = 0.5;      % K0, K1, K2, K3 is each the coupling factors
K1 = 0.13;
K2 = 0.5;

ngr = 3.46;
A = 50; % A = 0 dB/cm % A is the intensity attenuator coefficient
R1 = 966*10^(-6) %R1 is a radius of ring resonator1
L1 = 2*pi*R1; % L1 is the circumference of the ring (2*pi*R1)
R2 = 1104.5*10^(-6) %R2 is a radius of ring resonator2
L2 = 2*pi*R2; % L2 is the circumference of the ring (2*pi*R2)
%p1 = 2*pi*ngr*L1*10^(6)/Lamda; % with a given parameter values then p1 =
330498.5/Lamda
%p2 = 2*pi*ngr*L2*10^(6)/Lamda; % with a given parameter values then p2 =
377548.8/Lamda
C1 = 2*pi*ngr*L1*10^(6)
C2 = 2*pi*ngr*L2*10^(6)
x1 = exp(-A/2*L1);
x2 = exp(-A/2*L2);
y0 = (1-K0)^0.5;
y1 = (1-K1)^0.5;
y2 = (1-K2)^0.5;

Subplot (3,1,3);

It2 = x1^2*x2^2-x1^2*x2^2*y1^2-
2*x1^2*x2^2*y2^2+2*x1^2*x2^2*y2^2*y1^2+x1^2*x2^2*y2^4-x1^2*x2^2*y2^4*y1^2;
%Ii1 = 2*y2^2*x1*x2*cos(p1+p2)-2*cos(p2)*y2*y1*x2-2*cos(p2)*y2^3*x1^2*x2*y1-
2*cos(p1)*y2^3*x1*x2^2*y1-2*cos(p1)*y2*y1*x1+2*y2^2*y1^2*x1*x2*cos(p1-
p2)+1+y2^2*y1^2*x1^2+y2^2*y1^2*x2^2+x1^2*x2^2*y2^4;

```

```

% Transfer_DRR = (It2)/(Ii1);
Transfer_DRR = 10*log10((x1^2*x2^2-x1^2*x2^2*y1^2-
2*x1^2*x2^2*y2^2+2*x1^2*x2^2*y2^2*y1^2+x1^2*x2^2*y2^4-
x1^2*x2^2*y2^4*y1^2)/(2*y2^2*x1*x2*cos(C1./Lamda+C2./Lamda)-
2*cos(C2./Lamda)*y2*y1*x2-2*cos(C2./Lamda)*y2^3*x1^2*x2*y1-
2*cos(C1./Lamda)*y2^3*x1*x2^2*y1-
2*cos(C1./Lamda)*y2*y1*x1+2*y2^2*y1^2*x1*x2*cos(C1./Lamda-
C2./Lamda)+1+y2^2*y1^2*x1^2+y2^2*y1^2*x2^2+x1^2*x2^2*y2^4));

plot(Lamda,Transfer_DRR,'b')
hold on

%Ii1 = 2*y2^2*x1*x2*cos(p1+p2)-2*cos(p2)*y2*y1*x2-2*cos(p2)*y2^3*x1^2*x2*y1-
2*cos(p1)*y2^3*x1*x2^2*y1-2*cos(p1)*y2*y1*x1+2*y2^2*y1^2*x1*x2*cos(p1-
p2)+1+y2^2*y1^2*x1^2+y2^2*y1^2*x2^2+x1^2*x2^2*y2^4;

Transfer_DRR = 10*log10((2*y2^2*y1^2*x1*x2*cos(C1./Lamda-
C2./Lamda)+2*y2^2*x1*x2*cos(C1./Lamda+C2./Lamda)-2*cos(C2./Lamda)*y2*y1*x2-
2*cos(C2./Lamda)*y2^3*y1*x1^2*x2-2*cos(C1./Lamda)*y2*x1*x2^2*y1-
2*cos(C1./Lamda)*y2^3*y1*x1+y2^2+y1^2*x2^2+y2^2*x1^2*x2^2+y2^4*y1^2*x1^2)/(2*y2
^2*x1*x2*cos(C1./Lamda+C2./Lamda)-2*cos(C2./Lamda)*y2*y1*x2-
2*cos(C2./Lamda)*y2^3*x1^2*x2*y1-2*cos(C1./Lamda)*y2^3*x1*x2^2*y1-
2*cos(C1./Lamda)*y2*y1*x1+2*y2^2*y1^2*x1*x2*cos(C1./Lamda-
C2./Lamda)+1+y2^2*y1^2*x1^2+y2^2*y1^2*x2^2+x1^2*x2^2*y2^4));

plot(Lamda,Transfer_DRR,'r');axis tight;

hold off

xlabel('Wavelength (\mum)','Fontname','Time-Roman','FontSize',12);

%title('The transmission spectrum of a single ring resonator','Fontname','Time-
Roman','FontSize',9)

axis([1.5503 1.5513 -25 0.5]);

```

```

% Transmission spectrum of a single fiber ring resonator simulation
% 1 ring 2 couplers add/drop filter

clf; clear all, clc;

set(gcf,'NumberTitle','off','Name','Logarithm of Through and Drop port wrt input1 of SRR')
format long g

Lamda = 1.5472:0.000001:1.552;
%Lamda = 1.5472:0.000001:1.552;

%p =pi:0.1:5*pi ; % p is the phase
G0 = 0;      % G is the fiber coupler loss coefficient
G1 = 0;

K0 = 0.2;    % K is the coupling factor
K1 = 0.2;

ngr = 3.46;
A = 0.0;    % A is the intensity attenuation coefficient
R = 274*10^(-6) %R is a radius of ring resonator
L = 2*pi*R; % L is the circumference of the ring (2*pi*R)
C = 2*pi*ngr*L*10^(6)

FSR = 3*10^8/(ngr*L) % Free spectral range

%p = 2*pi*ngr*L*10^(6)./Lamda; % with a given parameter values then p = 20468.53./Lamda
x = exp(-A/2*L);
y1 = (1-G0)^0.5*(1-K0)^0.5;
y2 = (1-G1)^0.5*(1-K1)^0.5;

Subplot (3,1,1);

% plot T = It2/Ii1 at dropput port

Transfer_SRR = 10*log10(((1-(y1)^2)*(1-(y2)^2)*x./((1-x*(y1)*(y2))^2 ...
+ 4*x*(y1)*(y2)*(sin(C./Lamda/2).*sin(C./Lamda/2))));

```

```

plot(Lamda,Transfer_SRR,'b'); axis tight;
%p = pi:0.1:5*pi ; % p is the phase
G0 = 0;      % G is the fiber coupler loss coefficient
G1 = 0;

K0 = 0.2;    % K is the coupling factor
K1 = 0.2;

ngr = 3.46;
A = 0.0;    % A is the intensity attenuation coefficient
R = 342*10^(-6) %R is a radius of ring resonator
L = 2*pi*R; % L is the circumference of the ring (2*pi*R)
C = 2*pi*ngr*L*10^(6)

FSR = 3*10^8/(ngr*L) % Free spectral range

%p = 2*pi*ngr*L*10^(6)/Lamda; % with a given parameter values then p = 20468.53./Lamda
x = exp(-A/2*L);
y1 = (1-G0)^0.5*(1-K0)^0.5;
y2 = (1-G1)^0.5*(1-K1)^0.5;

Subplot (3,1,2);

% plot T = It2/Ii1 at dropput port

Transfer_SRR = 10*log10(((1-(y1)^2)*(1-(y2)^2)*x./((1-x*(y1)*(y2))^2 ...
+ 4*x*(y1)*(y2)*(sin(C./Lamda/2).*sin(C./Lamda/2))));

plot(Lamda,Transfer_SRR,'b'); axis tight;
ylabel('Insertion loss (dB)', 'Fontname','Time-Roman','FontSize',12);

K0 = 0.57;    % K0, K1, K2, K3 is each the coupling factors
K1 = 0.2;
K2 = 0.57;
ngr = 3.46;
A = 10; % A = 0 dB/cm % A is the intensity attenuator coefficient
R1 = 274*10^(-6) %R1 is a radius of ring resonator1

```

```

L1 = 2*pi*R1;    % L1 is the circumference of the ring (2*pi*R1)
R2 = 342*10^(-6) %R2 is a radius of ring resonator2
L2 = 2*pi*R2;    % L2 is the circumference of the ring (2*pi*R2)
%p1 = 2*pi*ngr*L1*10^(6)/Lamda; % with a given parameter values then p1 =
330498.5./Lamda
%p2 = 2*pi*ngr*L2*10^(6)/Lamda; % with a given parameter values then p2 =
377548.8./Lamda
C1 = 2*pi*ngr*L1*10^(6)
C2 = 2*pi*ngr*L2*10^(6)
x1 = exp(-A/2*L1);
x2 = exp(-A/2*L2);
y0 = (1-K0)^0.5;
y1 = (1-K1)^0.5;
y2 = (1-K2)^0.5;
Subplot (3,1,3);

% Transfer_DRR = (It2)/(Ii1);
Transfer_DRR = 10*log10((x1^2*x2^2-x1^2*x2^2*y1^2-
2*x1^2*x2^2*y2^2+2*x1^2*x2^2*y2^2*y1^2+x1^2*x2^2*y2^4-x1^2*x2^2*y2^4*y1^2)...
./(2*y2^2*x1*x2*cos(C1./Lamda+C2./Lamda)-2*cos(C2./Lamda)*y2*y1*x2-
2*cos(C2./Lamda)*y2^3*x1^2*x2*y1-2*cos(C1./Lamda)*y2^3*x1*x2^2*...
y1-2*cos(C1./Lamda)*y2*y1*x1+2*y2^2*y1^2*x1*x2*cos(C1./Lamda-
C2./Lamda)+1+y2^2*y1^2*x1^2+y2^2*y1^2*x2^2+x1^2*x2^2*y2^4));
plot(Lamda,Transfer_DRR,'b'); axis tight;

xlabel('Wavelength (\mum)','Fontname','Time-Roman','FontSize',12);

%title('The transmission spectrum of a single ring resonator','Fontname','Time-
Roman','FontSize',9)
axis([1.5472 1.552 -25 0.5]);

```

ประวัติผู้เขียน

นายณรงค์ สังวาระ เกิดวันที่ 5 สิงหาคม พ.ศ.2524 ที่จังหวัดเพชรบูรณ์
สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
สถาบันราชภัฏเทพสตรี (ลพบุรี) ในปีการศึกษา 2545 หลังจากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปีการศึกษา 2546