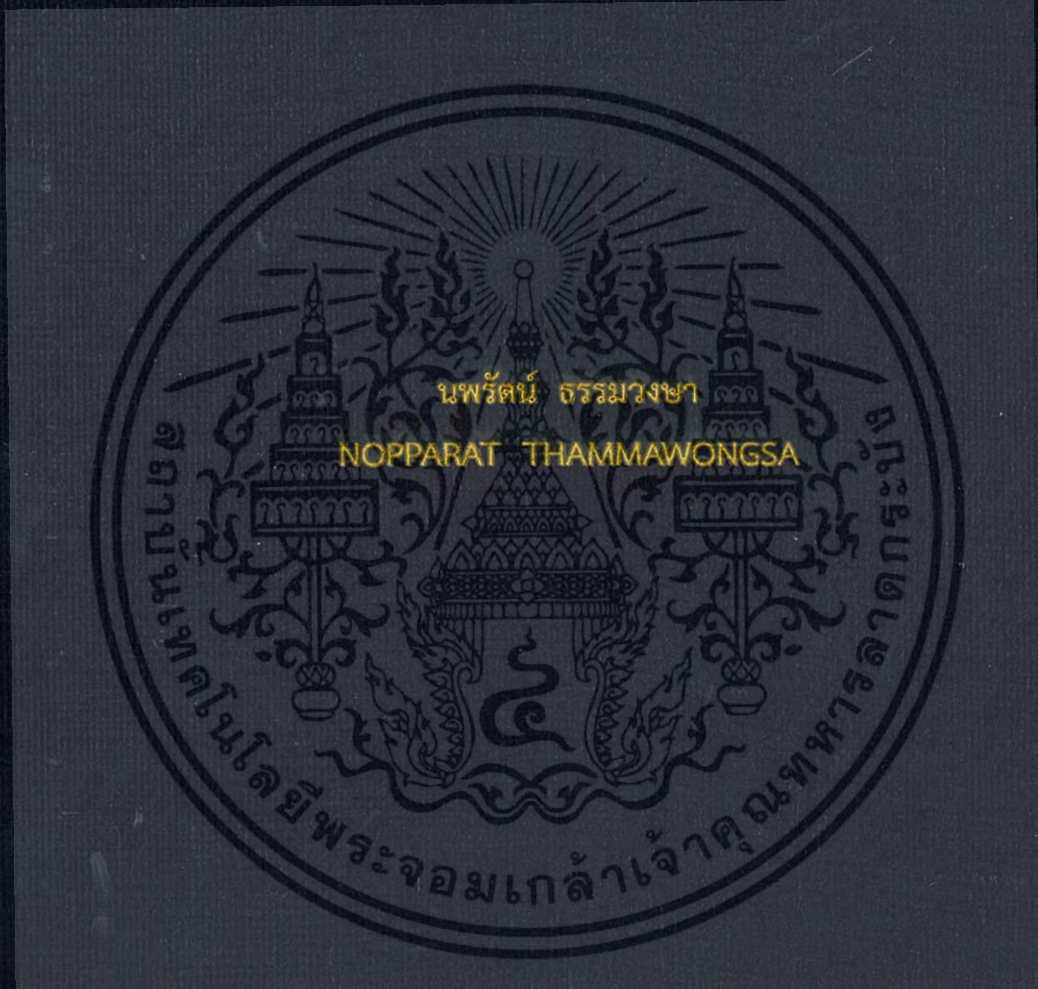


การออกแบบพลาสมอนิกแอดดรอปมัลติเพล็กซ์แบบผสม

A DESIGN OF HYBRID PLASMONIC ADD/DROP MULTIPLEXER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-D-018-025

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบพลาสมอนิกแอดดรอปมัลติเพล็กซ์แบบผสม

A DESIGN OF HYBRID PLASMONIC ADD/DROP MULTIPLEXER



T144154



นพรัตน์ ธรรมวงษา

NOPPARAT THAMMAWONGSA

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 144154
วันเดือนปี 01 มี.ย. 2559

b. 00266940
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-D-018-025

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A DESIGN OF HYBRID PLASMONIC ADD/DROP MULTIPLEXER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016
KMITL-2016-EN-D-018-025

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบพลาสมอนิกแอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์แบบผสม
Thesis Title A Design of Hybrid Plasmonic Add/Drop Multiplexer
นักศึกษา นายณพรัตน์ ธรรมวงษา
รหัสประจำตัว 54610124
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมศักดิ์ มิตะธา
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-D-018-025

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สุริภณ	สมควรพาณิชย์	
ดร.ปกรณ์	วัฒน์จตุรพร	
ผศ.ดร.ณยศ	ศุภกิจโกศล	
รศ.ดร.จิระศักดิ์	ชาญวุฒิศรรม	
รศ.ดร.สมศักดิ์	มิตะธา	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบพลาสมอนิกแอดคทรอปมัลติเพล็กซ์แบบผสม
นักศึกษา	นายณพรัตน์ ธรรมวงษา
รหัสประจำตัว	54610124
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. สมศักดิ์ มิตะถา

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการออกแบบพลาสมอนิกแอดคทรอปมัลติเพล็กซ์แบบผสมด้วยเทคนิคพลาสมอนิกโพลาไรตอนเชิงผิว เพื่อใช้งานเป็นอุปกรณ์แอดคทรอปมัลติเพล็กซ์บนเครือข่ายแบบพาสซีฟ ออกแบบโครงสร้างด้วยวิธีการผลต่างสี่เหลี่ยมจำกัดในโดเมนเวลา (FDTD) จำลองผลการทำงานด้วยการเขียนโปรแกรม MATLAB และโปรแกรมมาตรฐาน optiFDTD ที่สามารถออกแบบโครงสร้างวงจรเชิงแสงพลาสมอนิกแบบผสม จำลองผลการทำงานของอุปกรณ์และการตอบสนองต่อการเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ รวมถึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับโครงสร้างของงานทวนสอบ เพื่อให้ทราบถึงคุณลักษณะพื้นฐานของอุปกรณ์และค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการออกแบบ อุปกรณ์ทำงานที่ความยาวคลื่นที่ $1.55 \mu\text{m}$ ทำการคัปปลิงพลาสมอนิกด้วยวัสดุทอง (Au) ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์พลาสมอนิกแอดคทรอปมัลติเพล็กซ์แบบผสมมีค่าสูงกว่าแบบไดอิเล็กทริก และพลาสมอนิก ระบบที่นำเสนอนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้งานได้ในการทำระบบสวิตชิง ระบบการค้นหาเส้นทางรวมถึงการประมวลผลในระบบคอมพิวเตอร์เชิงแสง สำหรับระบบการสื่อสารด้วยแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	A Design of Hybrid Plasmonic Add/Drop Multiplexer
Student	Mr. Nopparat Thammawongsa
Student ID.	54610124
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Somsak Mitatha

ABSTRACT

This thesis studied a design of surface plasmon polariton (SPP) based plasmonic devices by modified Add/drop multiplexer with hybrid mechanism used for wavelength switching in passive optical network. The simulation method designed by Finite Different Time Domain (FDTD) on MATLAB and OptiFDTD simulation program for all parameter programming. The proposed hybrid plasmonic Add/Drop multiplexer are coupled with gold (Au) at wavelength = 1.55 μm . As a result, the performance of proposed model compared to conventional design approaches, the hybrid ring method has better performance than dielectric ring and plasmonic ring. The hybrid plasmonic Add/Drop multiplexer may provide new perspectives for the routing switching and computing designed in photonic integrated circuit era.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วย การสนับสนุน และให้คำแนะนำจากอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ของผู้วิจัย รศ.ดร.สมศักดิ์ มิตะถา และ รศ.ดร.ปรีชา ยุพาพิน ซึ่งได้กรุณาให้คำปรึกษาทั้ง ในด้านวิชาการ ประสบการณ์ในการทำงานรวมทั้งโอกาสในการศึกษาเล่าเรียน ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งใน ความอนุเคราะห์ และความปรารถนาดีที่ได้รับเสมอมาตลอดช่วงเวลาที่ได้ทำการศึกษาวิจัย ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ รวมถึงกรรมการสอบทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา และได้วิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์นี้

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี ผู้ให้ทุนการศึกษา และสนับสนุนตลอดช่วงเวลาที่ ทำการศึกษาวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดามารดา พี่น้องและเพื่อนที่คอยสนับสนุนผู้วิจัยในทุกๆ ด้าน อย่างดีที่สุดเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์จากการค้นคว้าอันพึงมีของวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอมอบทดแทนบุญคุณต่อ บิดามารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนศิษย์ตลอดมา

นพรัตน์ ธรรมวงษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา แลต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญตาราง.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ปัญหาในการประยุกต์ใช้งานที่นำคลื่นแสง.....	4
1.3 จุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	5
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	5
1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน.....	7
2.1 พลาสมอนิก (Plasmonic).....	7
2.2 การโพลาไรซ์ของแสง (Polarization of light).....	10
2.3 ไบรีฟรินเจนซ์แสง (Optical Birefringence).....	12
2.4 สมการคลื่น (Wave Equation).....	15
2.5 การเชื่อมต่อแบบเดี่ยวของพลาสมอนิกโพลาริตอนเชิงผิว (Single Interface of Surface Plasmon Polariton).....	18
2.6 การเชื่อมต่อแบบหลายชั้นของพลาสมอนิกโพลาริตอนเชิงผิว (Multiple Interface of Surface Plasmon Polariton).....	22
2.7 ท่อนำคลื่นแบบพลาสมอนิก (Plasmonic Waveguide).....	27
2.8 วงแหวนสั่นพ้องแบบแอดดรอป (Add/Drop ring resonators).....	29
2.9 วงแหวนสั่นพ้องแบบประยุกต์ (Modified Add/Drop Resonator).....	36
2.10 หลักการพื้นฐานของแอดดรอปมัลติเพล็กซ์เชิงแสง (Optical Add/Drop Multiplexers: OADM).....	38

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.11 โครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ท่อนำคลื่นแสงแอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์ (OADM Waveguide).....	41
2.12 การประดิษฐ์ท่อนำคลื่น (Optical Waveguide Fabrication).....	43
2.13 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	48
บทที่ 3 การออกแบบพลาสมอนิกแอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์แบบผสม.....	53
3.1 การออกแบบท่อนำคลื่นแสงด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมจำกัดในโดเมนเวลา (Finite Difference Time Domain: FDTD).....	53
3.2 การออกแบบและจำลองการทำงานของวงจรถ่วงแสงพลาสมอนิกโพลาริตอนเชิงผิวด้วยโปรแกรม MATLAB.....	58
3.3 การออกแบบและจำลองการทำงานของวงจรถ่วงแสงพลาสมอนิกโพลาริตอนเชิงผิวด้วยโปรแกรม optiFDTD.....	64
3.4 การออกแบบพลาสมอนิกแอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์.....	66
บทที่ 4 ผลจำลองการทำงาน.....	72
4.1 การเปรียบเทียบการทำงานของโปรแกรมจำลองโครงสร้างท่อนำคลื่นแสง.....	72
4.2 โครงสร้างวงแหวนสั้นพ้องพลาสมอนิกที่ใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพ.....	76
4.3 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของท่อนำคลื่นแสง.....	77
4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพวงแหวนสั้นพ้องพลาสมอนิกโพลาริตอนเชิงผิว.....	98
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและแนวทางในการศึกษาวิจัยในอนาคต.....	104
5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย.....	104
5.2 การสังเคราะห์โครงสร้างและขั้นตอนกฎเกณฑ์ในการออกแบบ.....	105
5.3 แนวทางในการศึกษาวิจัยในอนาคต.....	109
เอกสารอ้างอิง.....	110
ภาคผนวก	119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบการเกิดพลาสมอนของอนุภาคเสมือนขนาดนาโน.....	7
2.2 รูปแบบการสะท้อนกลับหมดสำหรับการคัปปลิงพลาสมอนิกผิวระหว่างโลหะและ ไดอิเล็กทริก (ก) โมเดลของ Kretschmann และ (ข) โมเดลของ Otto.....	9
2.3 ช่องการคัปปลิงสนามคลื่นของพลาสมอนิกผิว.....	10
2.4 แสงที่มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น.....	11
2.5 แสงที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม.....	11
2.6 แสงที่มีการโพลาไรซ์แบบวงรี.....	12
2.7 ปรากฏการณ์หักเหแบบคู่ของแสงผ่านผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcite - CaCO_3).....	14
2.8 การปรับมุมโพลาไรซ์ของแสงโดยใช้ Birefringent Crystal.....	14
2.9 อธิบายโครงสร้างท่อนำคลื่นแบบระนาบ คลื่นแพร่กระจายในทิศทางแกน x พิกัด คาร์ทีเซียน.....	16
2.10 โครงสร้างของการแพร่กระจาย SPP การเชื่อมต่อแบบเดี่ยวระหว่างโลหะกับไดอิเล็กทริก	19
2.11 ค่าการกระจายสัมพัทธ์ของ SPPs ที่การแทรกสอดระหว่าง โลหะของ Drude ระหว่าง อากาศกับ ซิลิกาโดยไม่นำเอาค่าการลดทอนทางความถี่มาคิด.....	21
2.12 ค่าความยาวคลื่น SPP ของทองที่ได้จากการทดลอง.....	21
2.13 โครงสร้างการแพร่กระจาย SPP การเชื่อมต่อแบบหลายชั้น ระหว่างโลหะกับไดอิเล็กทริก	22
2.14 ค่าการกระจายสัมพัทธ์ของ SPP คัปปลิงโหมดคี่และโหมดคู่สำหรับ IMI และ IM.....	24
2.15 (ก) ค่าการกระจายสัมพัทธ์ของ SPP คัปปลิงโหมดคี่และโหมดคู่สำหรับ MIM และ MI (ข) โหมดของ SPP ระยะสั้นและยาวที่สุดของที่มีความยาวคลื่น 775 nm.....	25
2.16 วงจรรวมเชิงแสงที่ใช้สำหรับการดักจับแสง [91]	26
2.17 (ก) วงจรรวมเชิงแสงที่ใช้สำหรับการส่งคลื่น THz (ข) กำลังงานที่ส่งผ่านเปรียบเทียบกับ ความยาวสายอากาศขนาดนาโน (ค) กำลังงานสัมบูรณ์ของสายอากาศขนาดนาโน.....	26
2.18 โครงสร้างพื้นฐานของท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิก (ก) LRSPP waveguide (ข) DLSPW (ค) Plasmonic slot waveguide (ง) Metal wedge waveguide (จ) V-groove channel waveguide และ (ฉ) HPWG.....	28
2.19 ตัวกรองช่องสัญญาณแบบวงแหวนสั้นพ้อง.....	29
2.20 วงแหวนสั้นพ้องที่มีการคัปปลิงเดียวกับแท่งตัวนำคลื่นแบบเส้นตรงหนึ่งแท่ง.....	29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 โครงสร้างของวงแหวนสั่นพ้องซึ่งมีสองรูปแบบคือ (ก) Horizontal coupling scheme และ (ข) Vertical coupling scheme.....	30
2.22 ผลตอบสนองของตัวกรองแอด/ดรอป (ก) สถานะ Off resonance, (ข) สถานะสั่นพ้อง และ (ค) ผลตอบสนองต่อความยาวคลื่น.....	32
2.23 แผนภาพแสดงวงแหวนสั่นพ้องแบบคัปปลิงคู่.....	32
2.24 คุณลักษณะการส่งผ่านของวงแหวนสั่นพ้องแบบคัปปลิงคู่กรณีปรับรัศมี R	34
2.25 แผนภาพแสดงระบบวงแหวนสั่นพ้องแบบประยุกต์, R_s : รัศมีของวงแหวน x_r : สัมประสิทธิ์การคัปปลิง (Coupling coefficients) R_d : รัศมีของวงแหวนแอดดรอป และ A_{eff} : พื้นที่หน้าตัดของตัวนำคลื่น (Effective areas).....	36
2.26 สถาปัตยกรรมของระบบแอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์แบบบล็อกเกอร์หรือบรอดแบนด์.....	39
2.27 สถาปัตยกรรมระบบของแอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์แบบปรับระบบอัตโนมัติ PLC ROADM	39
2.28 สถาปัตยกรรมระบบของ TOADM ด้วย tunable Bragg grating filters.....	40
2.29 ฟังก์ชันเปรียบเทียบการทำงานของโมดูลของ OADMs แบบต่างๆ [83].....	40
2.30 ท่อนำคลื่นแสง OADM แบบ Array waveguide Grating	41
2.31 ท่อนำคลื่นแสง OADM waveguide แบบ Mach-Zehnder interferometer.....	42
2.32 ท่อนำคลื่นแสง OADM waveguide แบบวงแหวนสั่นพ้องไมโครแบบคัปปลิง (ก) แนวตั้ง (ข) แนวนอน.....	43
2.33 การจัดเรียงชั้นสารอุปกรณ์ท่อนำคลื่นแสงแอดดรอปแบบวงแหวน.....	43
2.34 การปลูกชั้นสาร SiNx เพื่อทำเป็นหน้าฉาก.....	44
2.35 การปลูกชั้นสารกันแสง.....	44
2.36 การทำโครงสร้างของชั้นสาร SiNx.....	44
2.37 การกัดเซาะเพื่อทำเป็นท่อนำคลื่น.....	45
2.38 การจัดเตรียมท่อนำคลื่นสำหรับกระบวนการกัดลึก.....	45
2.39 ท่อนำคลื่นในบริเวณที่เป็นส่วนโค้งเมื่อทำการกัดลึก.....	46
2.40 ภาพถ่าย SEM ของท่อนำคลื่นที่มีการกัดลึก.....	46
2.41 โครงสร้างท่อนำคลื่นในบริเวณส่วนโค้ง.....	46
2.42 ภาพถ่าย SEM ของท่อนำคลื่นที่เป็นทางเข้าของแสงอินพุต.....	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.43 ภาพถ่าย SEM ของท่อนำคลื่นบริเวณส่วนโค้งที่มีการกักตัก.....	47
2.44 ขั้นตอนการทำงานตามวิธีการของ EBL.....	47
2.45 ผลการสร้างท่อนำคลื่นแอดดรอปตามขั้นตอนการทำงานด้วยวิธีการของ EBL.....	48
2.46 วงแหวนแบบวงแหวนพลาสมอนิกเรซแทรก.....	48
2.47 (ก) ไดอะแกรมโครงสร้างของวงแหวนพลาสมอนิกแบบกลม (ข) ผลเปรียบเทียบการจำลองและการวัดเมื่อมีรัศมี 10 nm (ค) สเปกตรัมการส่งผ่านสัญญาณที่ทิวพอร์ตและดรอปพอร์ตและ (ง) การวัดผล สเปกตรัมการส่งผ่านสัญญาณที่ทิวพอร์ตและดรอปพอร์ตที่ความยาวคลื่น 1552.0 nm ด้วยโมเดลการเดมป์ (จ) โครงสร้างจริงของวงแหวนพลาสมอนิกแบบกลม และ (ฉ) การป้อนสัญญาณที่พอร์ตต่างๆ.....	49
2.48 วงแหวนไดอิเล็กทริกแบบใช้คัปเปิลแยก.....	50
2.49 การวัดสเปกตรัมการส่งผ่านของวงแหวนไดอิเล็กทริกแบบใช้คัปเปิลวงรีและโครงสร้างทิวพอร์ตและ (ข) สัญญาณดรอปพอร์ต.....	50
2.50 โครงสร้างของท่อนำคลื่นแบบ Plasmonic ring และ Dielectric ring.....	51
2.51 สเปกตรัมการส่งผ่านของวงแหวนไดอิเล็กทริกแบบใช้คัปเปิลวงรีและโครงสร้าง.....	51
3.1 ตำแหน่งขององค์ประกอบ E และ H ในเซลล์ของยี่.....	54
3.2 โครงสร้างของกริด FDTD สองมิติที่มี PML ABC.....	56
3.3 โพลีชาร์ตของ โปรแกรมจำลองผล FDTD ด้วย MATLAB.....	58
3.4 โพลีชาร์ตของ โปรแกรมย่อยจำลองผลเพื่อรับค่าตัวแปรเริ่มต้น FDTD ด้วย MATLAB.....	59
3.5 โพลีชาร์ตของ โปรแกรมย่อยจำลองผลเพื่อสร้างโครงสร้างท่อนำคลื่นและกำหนดค่าPML ใน FDTD ด้วย MATLAB.....	60
3.6 โพลีชาร์ตของ โปรแกรมย่อยเพื่อจำลองผลสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กใน FDTD ด้วย MATLAB.....	61
3.7 ไดอะแกรมโครงสร้างในระนาบ XY สำหรับใช้ในการจำลอง MATLAB	62
3.8 โปรแกรมจำลองผล FDTD แบบยี่ ด้วย MATLAB.....	62
3.9 ผลที่ได้แบบเรียลไทม์ของการออกแบบโครงสร้างในระนาบ XY ในการจำลองด้วย MATLAB.....	63
3.10 แผนผังการทำงานของโปรแกรมจำลองผล optiFDTD.....	64
3.11 โครงสร้างพารามิเตอร์คุณสมบัติของท่อนำคลื่นในการจำลองผล.....	65

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 โครงสร้างวงแหวนสี่เหลี่ยมแบบพลาสติก (ก) โครงสร้างอุปกรณ์ (ข) การคัปปลิงด้วยโลหะ.....	66
3.13 โครงสร้างวงแหวนสี่เหลี่ยมแบบพลาสติก (ก) ออกแบบด้วยโปรแกรม MATLAB (ข) ออกแบบด้วยโปรแกรม optiFDTD	67
3.14 โครงสร้างวงแหวนสี่เหลี่ยมแบบไดอิเล็กทริก.....	68
3.15 โครงสร้างวงแหวนสี่เหลี่ยมแบบไดอิเล็กทริก (ก) ออกแบบด้วยโปรแกรม MATLAB (ข) ออกแบบด้วยโปรแกรม optiFDTD.....	69
3.16 โครงสร้างวงแหวนสี่เหลี่ยมแบบผสม.....	69
3.17 โครงสร้างวงแหวนสี่เหลี่ยมแบบผสม (ก) ออกแบบด้วยโปรแกรม MATLAB (ข) ออกแบบด้วยโปรแกรม optiFDTD.....	70
3.18 ค่าดัชนีการหักเหของโครงสร้างในการจำลองผลในโปรแกรม optiFDTD (ก) วงแหวนสี่เหลี่ยมแบบพลาสติก และ (ข) วงแหวนสี่เหลี่ยมแบบไดอิเล็กทริก.....	71
3.19 การออกแบบโครงสร้างในการจำลองผลที่นำคลื่นแสงใน optiFDTD ค่าดัชนีการหักเหของวงแหวนสี่เหลี่ยมแบบผสม.....	71
4.1 การเปรียบเทียบการจำลองผลที่นำคลื่นแบบตรงด้วย MATLAB และ optiFDTD	72
4.2 การเปรียบเทียบการจำลองผลการกระจายของแสงในท่อนำคลื่นแบบตรงด้วยโปรแกรม MATLAB และโปรแกรม optiFDTD.....	73
4.3 การเปรียบเทียบการจำลองผลการกระจายของแสงในท่อนำคลื่นแบบตรง.....	73
4.4 การจำลองผลการกระจายของแสงในท่อนำคลื่นแบบพลาสติก.....	74
4.5 การจำลองผลการกระจายของแสงในท่อนำคลื่นทรงกลมเขาสองแบบพลาสติก	75
4.6 การจำลองผลการกระจายของแสงในท่อนำคลื่นสายอากาศขนาดนาโนแบบพลาสติก.....	75
4.7 โครงสร้างวงแหวนสี่เหลี่ยมแบบพลาสติก.....	76
4.8 โครงสร้างวงแหวนสี่เหลี่ยมแบบไดอิเล็กทริก.....	76
4.9 โครงสร้างวงแหวนสี่เหลี่ยมแบบผสม.....	77
4.10 (ก) โครงสร้างการเชื่อมต่อระหว่าง ไดอิเล็กทริกกับโลหะ HPWG และ (ข) ความหนาแน่นสนามไฟฟ้าเมื่อทำการปรับความหนาของ d	79
4.11 วงแหวนสี่เหลี่ยมแบบมาตรฐาน.....	79

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 วงแหวนสั้นพ้องพลาสมอนิกแบบช่องว่าง ที่มีการปรับวงแหวนศูนย์กลางให้มีขนาดเล็กลง.....	80
4.13 วงแหวนสั้นพ้องแบบไดอิเล็กทริกกรวย.....	80
4.14 วงแหวนสั้นพ้องแบบไดอิเล็กทริกพาราโบลาระยะไกล.....	81
4.15 วงแหวนสั้นพ้องแบบไดอิเล็กทริกพาราโบลาระยะใกล้.....	81
4.16 ผลกระทบจากโครงสร้างของวงแหวนสั้นพ้องแบบผสมผสานแบบไม่มีวงแหวนด้านข้าง.....	82
4.17 ผลกระทบจากโครงสร้างของวงแหวนสั้นพ้องแบบผสมผสานที่มีวงแหวนด้านข้าง.....	82
4.18 การจำลองผล FDTD ของคลื่นในวงแหวนสั้นพ้องแบบผสมด้วยการเปลี่ยนรัศมีของวงแหวน.....	83
4.19 การจำลองผล FDTD ของคลื่นในวงแหวนสั้นพ้อง HRR ด้วยการเปลี่ยน ความกว้าง w.....	84
4.20 ผลกระทบจากการเปลี่ยนความยาวคลื่นต่อวงแหวนสั้นพ้องพลาสมอนิก.....	85
4.21 ผลกระทบจากการเปลี่ยนความยาวคลื่นต่อวงแหวนสั้นพ้องพลาสมอนิกระหว่างสัญญาณที่ ทรูพอร์ตและดรอพพอร์ต.....	86
4.22 การตอบสนองของโครงสร้างวงแหวนสั้นพ้องพลาสมอนิกต่อการเปลี่ยนความยาวคลื่นเมื่อ เกิดการสั้นพ้องในวงแหวน.....	86
4.23 ผลกระทบจากการเปลี่ยนความยาวคลื่นต่อวงแหวนสั้นพ้องแบบไดอิเล็กทริก.....	87
4.24 ผลกระทบจากการเปลี่ยนความยาวคลื่นต่อวงแหวนสั้นพ้องแบบไดอิเล็กทริกระหว่าง สัญญาณทรูพอร์ตและ ดรอพพอร์ต.....	87
4.25 การตอบสนองของโครงสร้างวงแหวนสั้นพ้องไดอิเล็กทริกต่อการเปลี่ยนความยาวคลื่นเมื่อ เกิดการสั้นพ้องในวงแหวน.....	88
4.26 ผลกระทบจากการเปลี่ยนความยาวคลื่นต่อวงแหวนสั้นพ้องแบบผสมผสาน.....	89
4.27 ผลกระทบจากการเปลี่ยนความยาวคลื่นต่อวงแหวนสั้นพ้องแบบผสมผสานระหว่างสัญญาณ ทรูพอร์ตและดรอพพอร์ต.....	89
4.28 การตอบสนองของโครงสร้างวงแหวนสั้นพ้องแบบผสมต่อการเปลี่ยนความยาวคลื่นเมื่อเกิด การสั้นพ้องในวงแหวน.....	90
4.29 ขนาดของสัญญาณคลื่นทรูพอร์ตของวงแหวนสั้นพ้องแบบผสมเมื่อเปลี่ยนความยาวคลื่น.....	90
4.30 ขนาดของสัญญาณคลื่นดรอพพอร์ตของวงแหวนสั้นพ้องแบบผสมเมื่อเปลี่ยนความยาวคลื่น..	90
4.31 เปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาของวงแหวนสั้นพ้องพลาสมอนิกเมื่อเปลี่ยนความยาว คลื่นที่ (ก) 0.8 um (ข) 1.2um (ค) 1.4 um และ (ง) 1.6 um	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา \times ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาของวงแหวนสั้นพ้องแบบไดอิเล็กทริกเมื่อเปลี่ยน ความยาวคลื่น (ก) 0.8 μm (ข) 1.2 μm (ค) 1.4 μm และ (ง) 1.6 μm	92
4.33 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาของวงแหวนสั้นพ้องแบบผสมเมื่อเปลี่ยนความยาว คลื่น (ก) 0.8 μm (ข) 1.2 μm (ค) 1.4 μm และ (ง) 1.6 μm	93
4.34 การเปลี่ยนแปลงของโหมด FDTD ที่เกิดในท่อนำคลื่นวงแหวนสั้นพ้องแบบผสม (ก) แบบ ปกติที่ไม่มีคาร์คัปปลิงด้วยทอง (ข) ท่อนำคลื่นวงแหวนสั้นพ้องแบบผสมที่คัปปลิงด้วยทอง...	93
4.35 การจำลองผลการกักเก็บโหมดคลื่นในวงแหวน เมื่อทำการจำลอง FDTD ระหว่างการคัปปลิง และไม่คัปปลิงด้วยโลหะ	94
4.36 สัญญาณที่ทรูพอร์ทและครอปพอร์ทของวงแหวนสั้นพ้องแบบผสม เปรียบเทียบระหว่าง อุปกรณ์ที่คัปปลิงและไม่คัปปลิงด้วยทอง.....	94
4.37 (ก) สัญญาณ E_y ของวงแหวนสั้นพ้องแบบผสมที่ทำการนอมอลไลซ์ และ (ข) การตอบสนอง ทางเวลา.....	95
4.38 การเปรียบเทียบโหมดเมื่อเปลี่ยนความยาวคลื่น.....	95
4.39 (ก) โครงสร้างค่าความยอมไฟฟ้าของท่อนำคลื่นเพื่อทดสอบการเคลื่อนที่ของคลื่นตามผิว (ข) ความหนาแน่นกำลังงานสนามที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ไปตามแนวแกน z.....	96
4.40 (ก) การจำลองผล FDTD ของการคัปปลิงท่อนำคลื่นด้วยเงิน Ag (ข) การจำลองผล FDTD ของการคัปปลิงท่อนำคลื่นด้วยทอง Au.....	97
4.41 ค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพ Q ที่ได้จากโครงสร้างที่ได้นำเสนอเปรียบเทียบกับโครงสร้างแบบเดิม	98
4.42 การส่งผ่านสัญญาณที่ทรูพอร์ทของ HPWG เปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ทั้งสามชนิด.....	99
4.43 ขนาดของสัญญาณท่อนำคลื่นพลาสมอนิกเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ทั้งสามชนิด.....	99
4.44 การส่งผ่านสัญญาณทรูพอร์ทเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ทั้งสามชนิดเพื่อหาค่าพิสัย สเปกตรัมอิสระ.....	100
4.45 เวลาในการตอบสนอง เปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ทั้งสามชนิด	101
4.46 ผลจากการจำลองการทำงานเปรียบเทียบค่า Q ของท่อนำคลื่นแสงทั้งสี่แบบ	101
5.1 การเปรียบเทียบโหมดของคลื่นและรัศมีของวงแหวนเมื่อเปลี่ยนความยาวคลื่น.....	106

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างค่าไบรีฟรินเจนซ์ของวัสดุสารบางชนิด.....	13
2.2 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการปรับโครงสร้างสำหรับวงแหวนสั้นพ้องขนาดไมโครเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ได้ศึกษา.....	35
2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของโครงสร้างจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	52
3.1 ค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของท่อนำคลื่น ในการจำลองใน MATLAB.....	63
3.2 ค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของท่อนำคลื่น.....	65
3.3 ค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของท่อนำคลื่นที่คัปปลิงด้วยทอง (Au).....	65
3.4 ค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของโครงสร้างวงแหวนสั้นพ้องแบบพลาสมอนิก.....	67
3.5 ค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของโครงสร้างวงแหวนสั้นพ้องแบบไดอิเล็กทริก.....	68
3.6 ค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของโครงสร้างวงแหวนสั้นพ้องแบบผสม.....	70
4.1 ลักษณะโครงสร้างมาตรฐานในการจำลองผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพ.....	78
4.2 ผลกระทบการทำงานของโหนดเมื่อทำการเปลี่ยนขนาดของโครงสร้าง.....	84
4.3 ค่าพารามิเตอร์โมเดลของ Drude-Lorentz สำหรับเงิน (Ag) และทอง (Au) [7]	96
4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิก.....	102
4.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิกกับงานวิจัยที่ศึกษา.....	102
4.6 ข้อมูลคุณลักษณะจำเพาะทางเทคนิคของโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิกที่ศึกษา.....	103
5.1 การสังเคราะห์ตัวแปรต่างที่ออกแบบได้จากความยาวคลื่นทำงาน.....	108

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้เป็นการนำเสนอความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์และเป้าหมายของการศึกษาวิจัย จุดประสงค์ของการทำงาน ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ และโครงสร้างของวิทยานิพนธ์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันสองปัญหาที่สำคัญที่สุดในการตอบสนองต่อความต้องการในความเร็วของตัวประมวลผลข้อมูลที่สูงมากนั้น คือความร้อนและการตีเลี้ยวของอุปกรณ์ RC เนื่องจากการเชื่อมต่อของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยในทางตรงกันข้ามการเชื่อมต่ออุปกรณ์เชิงแสง สามารถตอบสนองต่อการส่งข้อมูลในจำนวนมากซึ่งเป็นวิธีการในการนำมาแก้ไขปัญหาดังกล่าว ความแตกต่างของอุปกรณ์เชิงแสงนั้น น่าสนใจเป็นอย่างมากในการสร้างเป็นชิป (Chip-scale) ด้วยการแบ่งแยกโครงสร้างสถาปัตยกรรมเพื่อตอบสนองความต้องการของส่วนประมวลผลที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์ความเร็วสูงผ่านช่องการเชื่อมต่อความเร็วสูงแต่เกิดผลกระทบเนื่องจากความแตกต่างของขนาดอุปกรณ์เชิงแสงและอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ต่างกันอย่างมาก อุปกรณ์เชิงแสงแบบไดอิเล็กทริก ถูกจำกัดขนาดด้วยกฎการกระจายแสงที่ครึ่งความยาวคลื่น ซึ่งทำให้สามารถมีขนาดของกำลังงานเพียง 1 หรือ 2 เท่าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ระดับนาโน (Nanoscale) ซึ่งความแตกต่างนี้เป็นเหตุผลสำคัญที่ต้องศึกษาเพื่อหาจุดเหมาะสมระหว่างสองเทคโนโลยีนี้ โดยกระบวนการที่ต้องการนั้นต้องสามารถพัฒนาบนพื้นฐานในการสร้างลงบนชิปสามารถส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ระดับนาโนที่ความถี่ของแสง และสามารถข้ามช่องว่างระหว่างการใช้งานข้อมูลในโลกของอิเล็กทรอนิกส์ระดับนาโนและเชิงแสงระดับไมโครได้

การสร้างอุปกรณ์ระดับนาโน (Nanofabrication) มีการพัฒนาขึ้นเป็นอย่างมาก และเทคนิคการจำลองผลสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic simulation) ทำให้ค้นพบเทคนิคการออกแบบโครงสร้างการเชื่อมต่อระหว่างแสงและอิเล็กทรอนิกส์ ที่เราเรียกว่า “ท่อนำคลื่นพลาสมอนิก (Plasmonic waveguide: PWG)” ซึ่งเป็นส่วนผสมของโลหะ-ไดอิเล็กทริก (Metal-dielectric: MD) โดยคุณสมบัติการส่งผ่านข้อมูลของโครงสร้างชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับสภาพัฒกรรมของผิวโลหะ (Metallic surface) และคุณสมบัติของแสงระหว่างรอยเชื่อมต่อของโลหะ-ไดอิเล็กทริกที่เรียกว่า “พลาสมอนโพลาริตอนเชิงผิว (Surface Plasmon Polariton: SPP)” สิ่งที่น่าสนใจมากที่สุดคือขอบเขตค่าเริ่มต้นของการเชื่อมต่อโลหะ-ไดอิเล็กทริกที่แตกต่างกันมาก ในแต่ละการประยุกต์ใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการออกแบบที่ไม่ให้เกิดการสูญเสียจากการกระจายของแสงในระหว่างการส่งผ่านไปยังโครงสร้างระดับนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในคุณสมบัติที่ทำการศึกษานั้น การหาประสิทธิภาพที่เกิดจากการมอดูเลตพลาสมอนิกภายในโครงสร้างระดับนาโนนั้นถูกนำมาพิจารณาในสองรูปแบบคือการนำไฟฟ้ายิ่งยวดของโครงสร้างโลหะ ด้วยคุณสมบัติในการเสริมคลื่น SPP ให้สามารถเกิดการตอบสนองทั้งเชิงแสงและเชิงไฟฟ้า โดยเฉพาะสามารถออกแบบให้สามารถมีขั้วทั้งแบบ 1 มิติ และ 2 มิติ เพื่อป้อนไฟฟ้าในการเปลี่ยนแปลงข้อมูลเชิงแสงภายในอุปกรณ์ท่อนำคลื่นพลาสมอนิก และอย่างที่สองคือโครงสร้างของโลหะจะให้คุณสมบัติความไม่ขนานกันในการรวมและจัดการแสงที่ระดับนาโน ผลของสนามที่ได้สามารถนำไปสนับสนุนปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นในวัสดุ (Nonlinear effects) และเสริมให้เกิดโหมดที่สูงขึ้นในตัวกลาง รวมถึงสามารถทำการสวิชชิงได้ที่กำลังงานต่ำ คุณสมบัติการกักเก็บโหมดของคลื่นที่สูงนี้ของโครงสร้างท่อนำคลื่นพลาสมอนิก มักจะถูกจำกัดด้วยการลดทอนของคลื่น SPP ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการสร้างอุปกรณ์เป็นแบบแอคทีฟ เช่น มอดูเลเตอร์ และการสร้างอุปกรณ์ให้มีคุณสมบัติของความไม่เป็นเชิงเส้นมากพอ

เนื่องจากปัจจุบันมีการศึกษาและออกแบบอุปกรณ์พลาสมอนิกจำนวนมาก ซึ่งการรวมอุปกรณ์พลาสมอนิกเข้าเป็นวงจรรวมนั้นจึงต้องสร้างเพื่อการประยุกต์ใช้งานเฉพาะอย่างตามคุณสมบัติที่กล่าวแล้วข้างต้น การจะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่เป็นลักษณะของ SPP นั้นต้องสามารถทำงานได้ที่มีความยาวคลื่นย่อย (Subwavelength) ที่ยังพัฒนากันในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นการยากมากที่จะรวมระบบปรับค่าตัวแปรต่างๆ ที่สามารถสนับสนุนการทำงานของอุปกรณ์ระดับนาโนในโหมดของพลาสมอนโพลาไรตอนเชิงผิวได้ เช่น ช่องว่างของท่อนำคลื่น การคับปลิงโหมด การจัดการการสูญเสีย การโค้งงอ และการแยกสัญญาณ เป็นต้น ระบบที่สามารถรวมเอาข้อมูลและการสื่อสารเชิงแสงในอนาคตนั้นอยู่บนพื้นฐานของการสื่อสารมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wavelength division multiplexing: WDM) องค์ประกอบของสัญญาณแสงเฉพาะตัวเท่านั้นที่สามารถเลือกได้และแบ่งเส้นทางไปยังตำแหน่งที่ต้องการบนชิปได้ นอกจากนี้แล้วเทคโนโลยี WDM เป็นเทคนิคที่สำคัญมากที่ถูกใช้บนเครือข่ายพื้นฐานที่ง่ายในทุกๆสถานีสถาน โดยทุกๆผู้ใช้งานจะมีความยาวคลื่นเฉพาะตัวที่แตกต่างกันเพื่อรับส่งข้อมูล ในปัจจุบันทุกๆงานวิจัยจะเน้นในการพัฒนาเทคโนโลยีบนพื้นฐานของอุปกรณ์เครือข่ายแบบพาสซีฟ (PON) เช่น TDM-PON, EPON, GPON และ WDM-PON [1-5] เป็นต้น ในความต้องการเพื่อเพิ่มอัตราเร็วของข้อมูลนั้นระบบการสื่อสารคลื่นบนใยแก้วนำแสงต้องทำงานในช่วงคลื่นมิลลิเมตรมีการศึกษาและตีพิมพ์ผลงานมากมาย [9-10] รวมถึงการศึกษานบนใยแก้วนำแสงแบบหลายโหมดเพื่อส่งคลื่นหรือลดค่าใช้จ่ายก็ได้ศึกษาใน [11-12] การนำเสนอการทำงานร่วมกันของการสื่อสารคลื่นบนใยแก้วนำแสงที่เป็นอนาล็อกและระบบ FTTH ที่เป็นดิจิทัลด้วยการใช้เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นหนาแน่น (Dense Wavelength Division Multiplex: DWDM) ถูกนำเสนอใน [13] เทคนิคอื่นๆ ในการพัฒนาระบบย่อยสำหรับแอปพลิเคชันของการสื่อสารคลื่นบนใยแก้วนำแสงก็มีการศึกษาเช่นกัน รวมถึงตัวให้กำเนิดแสงของสัญญาณไมโครเวฟและมิลลิเมตรเวฟใน [14-15] ทำให้เราเข้าใจพื้นฐานในการสร้างสัญญาณและการมัลติเพล็กซ์เพื่อการส่งคลื่นไปบนสายใยแก้วนำแสงผ่านช่องสัญญาณเครือข่าย อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเชื่อมต่อแบบไร้สายร่วมกับแบบคลื่นบนสายใยแก้วโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสภาพแวดล้อมมีผู้ใช้จำนวนมาก มีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดทอนจากคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ จนถึงตัวให้กำเนิดแสงเป็นสิ่งที่ต้องนำมาพิจารณาเป็นอย่างมาก

ในทางตรงกันข้ามการใช้งานตัวขยายสัญญาณความถี่วิทยุที่มีอัตราขยายสูงมักจะเกิดการเพิ่มขึ้นของการลดทอนแบบไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากนี้แล้วต้องพิจารณาช่องสัญญาณไร้สายในเรื่องการสูญเสียในเส้นทาง (Path loss) การจางหาย (Fading) และซาโดว์อิง (Shadowing) ด้วย ซึ่งการปรับปรุงประสิทธิภาพต้องการให้มีช่วงการเปลี่ยนแปลงหรือช่วงของอินพุตที่ไม่มีการลดทอนของสัญญาณก่อนที่จะส่งออกไปที่โนดไร้สายต้องมีค่า 80-90dB ต้องอาศัยการทำงานอื่นจากคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของ Laser diode และตัวขยายสัญญาณความถี่วิทยุซึ่งต้องชดเชย จึงมีการพัฒนาสถานีฐานปัจจุบันจึงเน้นที่จำนวนเพื่อให้มีเครือข่ายไร้สายครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ แต่จะต้องสามารถทำงานได้ในหลายรูปแบบ เช่น การจัดเส้นทางของสัญญาณ (Signal routing) การประมวลผล (Signal processing) การเปลี่ยนช่องสัญญาณหรือความถี่ (Channel or frequency allocation) การมัลติเพล็กซ์/ดีมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นและเปลี่ยนช่องสัญญาณ (Wavelength multiplexing/demultiplexing and switching) เป็นต้น

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา มีกระบวนการที่ได้จากการวิจัยได้ถูกนำเสนอเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของความไม่เป็นเชิงเส้นและการกระจายของแสง การใช้กระบวนการ nonlinear amplifying loop mirror (NALMs) ที่นำมาใช้สำหรับ Multi-channel WDM ที่สามารถแยกด้วยระยะทางในการตอบสนองต่อช่วงความยาวของคลื่น [16] เทคนิคของการชดเชยโดยบริหารจัดการการกระจายแสงก็เป็นเทคนิคที่นำมาชดเชยการกระจายแสง ได้ถูกนำมาใช้ใน [17-18] นอกจากนี้เทคนิคการใช้ลำแสงโซลิตอนเป็นเทคนิคที่สามารถนำมาชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นและการกระจายแสงได้ ในการสื่อสารระยะทางไกลทำให้สามารถลดอุปสรรคในการขยายในระหว่างทาง การสื่อสารข้อมูลขนาด Tbps ใน [19] ซึ่งในการสื่อสารโซลิตอนในเครือข่าย WDM ซึ่งสามารถลดทอนการกระจายของคลื่นแสง มีคุณสมบัติที่สามารถปรับตัวและทนต่อการรบกวนในการสื่อสารระยะไกล รูปแบบการสื่อสารโซลิตอนมีการใช้งานสองแบบคือ Dark Soliton และ Bright Soliton โดยมีการส่งผ่านช่องสัญญาณได้ถูกนำเสนอใน [20-23] รวมถึงการออกแบบอุปกรณ์แบบพาสซีฟบนท่อนำคลื่นแสง [24-25] โดยพื้นฐานการออกแบบโดยโปรแกรมมาตรฐาน [26] และตัวกำเนิดแสงโซลิตอนได้มีการศึกษาใน [27] แต่ยังไม่มีการศึกษาใดที่นำเอาคุณสมบัติของโซลิตอนในการลดการกระจายของแสง ใช้ร่วมการออกแบบอุปกรณ์ท่อนำคลื่นให้สามารถแก้ปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นบนเครือข่าย WDM-PON

อุปกรณ์ท่อนำคลื่นพลาสมอนิกเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่สามารถตอบสนองความต้องการของระบบได้ เนื่องจากโครงสร้างที่ประกอบไปด้วย วัสดุโลหะและไดอิเล็กทริก (Dielectrics) โดยสนามความหนาแน่นของคลื่นจะถูกสร้างขึ้นและเคลื่อนที่ไปบนรอยเชื่อมต่อของวัสดุสองชนิดนั้น ซึ่งเราเรียกว่า “ปรากฏการณ์พลาสมอนโพลาไรตอนเชิงผิว (Surface plasmon polaritons: SPPs)” มีหลายงานวิจัยได้ออกแบบโครงสร้างและการทำงานของท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิกมากมาย เช่น dielectric-loaded plasmonic waveguide (DLPWG) [28-29], long range SPP waveguide (LRSPWG) [30-31], metal-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dielectric-metal waveguide (MDMWG) [32-33], hybrid plasmonic waveguide (HPWG) [34-36] เป็นต้น ในทุกรูปแบบการทำงานของท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิกนั้น อุปกรณ์ท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิกแบบผสมสามารถตอบสนองการทำงานของโหมดของคลื่นทั้งแบบสนามไฟฟ้าตามขวาง (Transverse electric: TE) และสนามแม่เหล็กตามขวาง (Transverse magnetic: TM) ด้วยการใช้งานเพียงแค่โครงสร้าง 2 ชั้น ท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิกแบบผสมถูกนำเสนอครั้งแรกโดย UC Berkeley group ในปี 2008 [37] ต่อมาจึงได้มีการนำเทคนิคนี้มาใช้ในการออกแบบท่อนำคลื่นแสงแบบใหม่ๆ มากมาย ไม่ว่าจะเป็นแบบแท่งตรง (Rod) แบบจาน (Disk) แบบวงแหวน (Ring) และแบบโดนัท (Donut) ด้วยขนาดเพียง $0.5 \mu\text{m}$ ถึง $1 \mu\text{m}$ [38] ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทั้งหมด สามารถกำหนดได้ตามคุณสมบัติพื้นฐานที่ใช้ประกอบกัน คือค่าช่องว่างระหว่างโลหะ-ไดอิเล็กทริก (Metal-dielectric gap) ค่าความนำของวัสดุ โครงสร้างการคัปปลิง ความยาวคลื่นในการส่งผ่าน ค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระ ค่ากำลังงานสูงสุดที่เครื่องคลื่น และ ค่าตัวแปรประสิทธิภาพ บอกถึงความสามารถในการตอบสนองต่อแสงที่มีความเข้มสูง การลดการกระจายของแสง และมีการทำงานช่วงแบนวิดท์ที่แคบมาก เป็นปัจจัยสำคัญมากที่ได้รับจากท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิกแบบผสม ในการนำไปใช้เป็นอุปกรณ์สื่อสารคลื่นแสง รวมถึงการส่งผ่านข้อมูลและประมวลผลคอมพิวเตอร์ในอนาคต

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงสนใจที่จะทำการออกแบบท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิกแบบผสมเพื่อใช้งานเป็นอุปกรณ์บนพื้นฐานเทคนิคของการสร้างวงแหวนสั้นพ้องแอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์ ที่ออกแบบโครงสร้างด้วยการใช้หลักการจำลองผลการทำงานด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมจำกัดในโดเมนเวลา (FDTD) ในโปรแกรม MATLAB เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ร่วมกับการออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์ด้วยโปรแกรมมาตรฐาน optiwave [26] โดยโปรแกรม optiFDTD ใช้สำหรับการออกแบบท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิกแบบผสมและจำลองผลการทำงานของอุปกรณ์และการตอบสนองต่อการเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ รวมถึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับโครงสร้างของงานวิจัยอื่น

1.2 ปัญหาในการประยุกต์ใช้งานท่อนำคลื่นแสง

ด้วยหลักการการทำงานของท่อนำคลื่นแสงแบบวงแหวนรวมสัญญาณแอดดรอประดับไมโคร (Microring add/drop multiplexer) ที่จะนำมาใช้ในการสื่อสารแบบพาสซีฟ มีช่องสัญญาณที่แคบและมีความต้องการความจุของระบบที่มากนั้น เกิดปัญหาที่ต้องสามารถแยกความแตกต่างของความยาวคลื่นที่แม่นยำ และแก้ไขปัญหาของการกระจายของแสงที่เกิดในท่อนำคลื่นได้ จึงมีแนวคิดการนำเอาเทคนิคของพลาสมอนโพลาริตอนเชิงผิวมาใช้ เพื่อให้เกิดโหมด การเดินทางของคลื่นตามผิวของวัสดุโลหะ (Light-confining) ให้มีความหนาแน่นโหมดสูงขึ้น

ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้จึงมีความสนใจที่จะนำเสนอการออกแบบท่อนำคลื่นแสงแบบใหม่ด้วยเทคนิคพลาสมอนโพลาริตอนเชิงผิว และกระบวนการนำไปออกแบบอุปกรณ์ ตัวรวมและแยกสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอดดรอปแบบผสม (Hybrid add/drop multiplexer) สำหรับการทำงานในระบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบพาสซีฟเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานสำหรับการมัลติเพล็กซ์และสวิตชิงให้สูงขึ้นได้จากค่าตัวแปรประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ทั้งในส่วนของ การเพิ่มอัตราส่งข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสาร ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารสมัยใหม่ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในอนาคตต่อไป

1.3 จุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1) เพื่อศึกษาวิเคราะห์สมการส่งผ่านและการจำลองคุณลักษณะการทำงานของระบบท่อนำคลื่นแสงแบบพลาสมอนโพลาริตอนเชิงผิว
- 2) เพื่อทำการออกแบบระบบท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิกแบบผสม ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์วงแหวนสั้นพ้องแอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์
- 3) เพื่อออกแบบโปรแกรม MATLAB สำหรับการจำลอง FDTD ที่ใช้ในการออกแบบท่อนำคลื่นแสงและจำลองผลด้วยโปรแกรมมาตรฐาน optiwave ในการเปรียบเทียบ
- 4) เพื่อศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติและประสิทธิภาพของอุปกรณ์ท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิกแบบผสม

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) ทำการออกแบบระบบท่อนำคลื่นแสงขนาดเล็กที่ประกอบด้วยท่อนำคลื่นแบบแอดดรอป (Add/Drop ring resonator) และพัฒนาเป็นท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิก
- 2) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบท่อนำคลื่นแสงที่ได้ออกแบบด้วยกระบวนการ FDTD
- 3) ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นสำหรับการจำลองการทำงาน
- 4) จำลองผลการทำงานของอุปกรณ์ท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิกแบบผสมกับโครงสร้างแบบอื่น

1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

บทที่ 1 อธิบายถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา หลักการพื้นฐานของการสร้างท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิก ปัญหาในการประยุกต์ใช้งานระบบแบบเดิม เป้าหมายของการศึกษาวิจัย จุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตการทำงานของวิทยานิพนธ์ และผลที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- บทที่ 2 อธิบายถึงทฤษฎีของพลาสมอนิก การโพลาไรซ์ของแสง ไปรี่พรีนเจนซ์แสง สมการคลื่น การเชื่อมต่อแบบเดี่ยวของพลาสมอนิกโพลาไรตอนเชิงผิว การเชื่อมต่อแบบหลายชั้นของพลาสมอนิกโพลาไรตอนเชิงผิว ท่อนำคลื่นแบบ พลาสมอนิก การวิเคราะห์สมการส่งผ่านของวงแหวนสั้นพ้อง หลักการพื้นฐานของแอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์เชิงแสง โครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ท่อนำคลื่นแสงแอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์ การประดิษฐ์แอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์เชิงแสง และการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องตามลำดับ
- บทที่ 3 อธิบายถึงการสร้างท่อนำคลื่นแบบพลาสมอนิก การสร้างท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิกแบบผสม และการออกแบบท่อนำคลื่นแสงด้วยกระบวนการ FDTD
- บทที่ 4 นำเสนอผลการจำลองท่อนำคลื่นแสงที่ได้ออกแบบด้วยกระบวนการ FDTD ใน MATLAB และการจำลองผลโครงสร้างและระบบ ด้วยโปรแกรมมาตรฐาน optiFDTD ผลประสิทธิภาพที่ได้จากโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิกที่นำเสนอ และการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับงานวิจัยอื่น
- บทที่ 5 การอภิปรายผลการทำงานจากปัจจัยต่างๆที่อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบสรุปผลการทำงาน และแนวทางในการศึกษาวิจัยในอนาคต

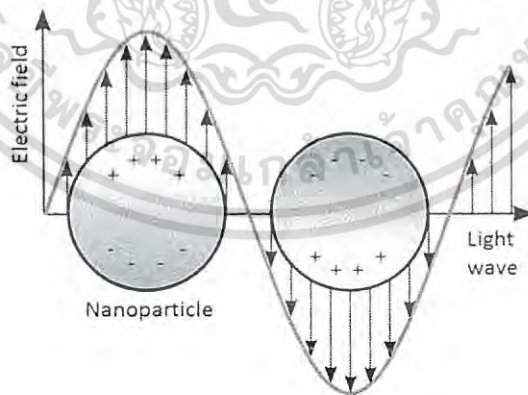
บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐาน

เพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ จึงได้นำเสนอทฤษฎีของพลาสมอน การโพลาไรซ์ของแสง ไบรีฟรินเจนซ์แสง สมการคลื่น การเชื่อมต่อแบบเดี่ยวของพลาสมอนิกโพลาไรตอนเชิงผิว การเชื่อมต่อแบบหลายชั้นของพลาสมอนิกโพลาไรตอนเชิงผิว ท่อนำคลื่นแบบพลาสมอนิก การวิเคราะห์สมการส่งผ่านของวงแหวนสั้นพ้อง หลักการพื้นฐานของแอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์ โครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิกแอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์ การประดิษฐ์พลาสมอนิกแอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์เชิงแสง และการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องตามลำดับ

2.1 พลาสมอน (Plasmon)

พลาสมอน คือควอนตัมของการสั่นพ้องพลาสมาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในอนุภาคเสมือนขนาดนาโนเมื่อแสงมีองค์ประกอบของโฟตอน การสั่นพ้องพลาสมาประกอบไปด้วยพลาสมอน พิจารณาอนุภาคเสมือนที่เพิ่มขึ้นจากระดับของการสั่นพ้องพลาสมา ซึ่งคล้ายกับโฟนอนที่เป็นระดับของการสั่นพ้องเชิงกล ดังนั้นสามารถอธิบายได้ว่า พลาสมอน คือความหนาแน่นของกลุ่มของการสั่นพ้อง (จำนวนไม่ต่อเนื่อง) ของอิเล็กตรอนแก๊สอิสระ ยกตัวอย่างเช่น ในความถี่แสง พลาสมอนสามารถคัปปลิงกับโฟตอนเพื่อใช้สร้างอนุภาคเสมือนตัวอื่นที่เรียกว่า พลาสมอน โพลาไรตอน (Plasmon polariton)



รูปที่ 2.1 รูปแบบการเกิดพลาสมอนของอนุภาคเสมือนขนาดนาโน

สำหรับโพลาไรตอนนี้โดยทั่วไป มันเกิดจากการควบคู่กันอย่างแรง (Strong coupling) ระหว่างหน่วยของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (หน่วยของแสงหรือโฟตอน) และสถานะที่ถูกกระตุ้นของไดโพลของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สสาร โดยโพลาริตอนที่ได้รับความสนใจอย่างมาก คือพลาสมอนิกโพลาริตอน หรือสถานะโพลาริตอนที่เกิดจากการควบคู่กันของแสงกับสถานะของพลาสมอนเอง ในโครงสร้างของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำนั้นประกอบด้วยโพรงสั่นพ้อง (Resonant cavity) และการเกิดสภาวะกลุ่มผกผัน (Population inversion) ในเลเซอร์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำโพรงสั่นพ้องนี้ คือสิ่งที่ทำให้เกิดการเก็บกักแสง และพลาสมอนก็คือสิ่งที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นสนามไฟฟ้าจากผิวของโลหะ ดังนั้นสถานะโพลาริตอน คือผลลัพธ์ที่ได้ แต่โดยทั่วไปจะไม่เห็นหรือคำนึงถึงสถานะโพลาริตอนนี้ เนื่องจากในโครงสร้างเลเซอร์ทั่วไปจำนวนโฟตอนและพาหะจะมีมากจนบดบังกันเอง และทำให้เราไม่สามารถเห็นความเป็นโพลาริตอนได้ แต่ในเลเซอร์นาโน (Nanolaser) หรือเลเซอร์โฟตอนเดี่ยว (Single photon laser) นั้นเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการพิจารณา

การศึกษาพลาสมอนิก เป็นการศึกษาพลาสมอนของอนุภาคเสมือนที่เกิดการสั่นพ้องของพลาสมาในของแข็ง เช่น โลหะ วัสดุกึ่งโลหะ ออกไซด์ของโลหะ หรือ วัสดุสารกึ่งตัวนำเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานหลากหลายอย่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง งานเกี่ยวกับวงจรรวมเชิงแสง ซึ่งสามารถอธิบายปรากฏการณ์อย่างง่ายคือ การเกิดแสงเคลื่อนที่ไปบนผิวการเชื่อมต่อของโลหะและฉนวน เมื่ออิเล็กตรอนเกิดสั่นพ้องที่พื้นผิวของโลหะเรื่อยๆ จนกระทั่งหนาแน่นพอให้เกิดสถานการณ์สั่นพ้องด้วยสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแสงนั่นเอง พลาสมอนมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสงของโลหะและสารกึ่งตัวนำแสงของ ความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่พลาสมาจะถูกสะท้อนโดยวัสดุนั้น เนื่องจากอิเล็กตรอนในผิวของวัสดุจะทำการแบ่งส่วนสนามไฟฟ้าของแสง ซึ่งความถี่พลาสมาจะถูกส่งไปโดยวัสดุนั้น วัสดุโลหะเช่น ทองแดง เงิน ทอง จะมีค่าการส่งผ่านช่วงอิเล็กตรอน (Interband transitions) ช่วงความยาวคลื่นโปร่งแสง ในวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำ ความถี่พลาสมาของอิเล็กตรอนวงนอกมักจะอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต จนถึงช่วงโปร่งแสง โดยจะมีพลังงานแสงเฉพาะที่มีสีถูกดูดกลืนเข้าไปและส่วนที่เหลือถูกสะท้อนไป แสดงให้เห็นว่าความถี่พลาสมอนเกิดขึ้นได้ในช่วงอินฟราเรดระยะกลางและระยะใกล้ พลังงานของพลาสมอนสามารถประมาณค่าในโมเดลของอิเล็กตรอนอิสระคือ

$$E_p = \hbar \sqrt{\frac{ne^2}{m\epsilon_0}} = \hbar\omega_p \quad (2.1)$$

เมื่อ n คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ซึมซาบ (Conduction electron density)

e คือประจุพื้นฐาน (Elementary charge)

m คือมวลของอิเล็กตรอน (Electron mass)

ϵ_0 คือค่าความยอมไฟฟ้าในอากาศว่าง (Permittivity of free space)

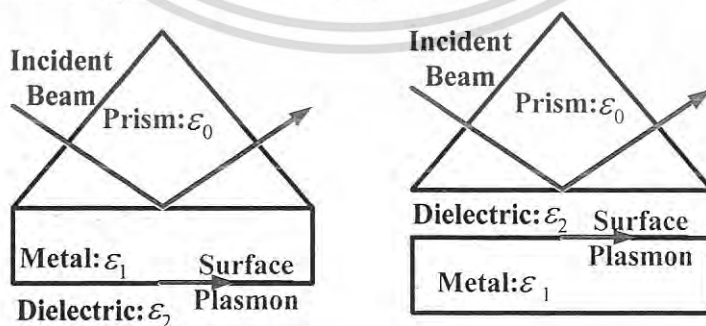
\hbar คือค่าคงที่ของพลังค์ (Planck constant)

ω_p คือความถี่พลาสมอน (Plasmon frequency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลาสมอนผิว (Surface plasmon) คือ พลาสมอนที่ถูกกักเก็บในผิวของวัสดุโลหะและตอบสนองอย่างมากกับแสงที่เกิดโพลาไรตอน โดยกลุ่มของพลาสมอนที่ผิวนี้จะเกิดที่รอยเชื่อมต่อระหว่างวัสดุที่มีค่าจริงของความยอมไฟฟ้าเป็นบวก เช่น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และวัสดุที่มีส่วนค่าจริงของความยอมไฟฟ้าเป็นลบที่ความถี่ของแสง โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะหรือสารกึ่งตัวนำหนัก พลาสมอนผิว เป็นคลื่นความหนาแน่นของประจุที่เกิดจากการสั่นพ้องของอิเล็กตรอนอิสระ ที่มีลักษณะการสั่นพร้อมเพรียงกัน เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของโลหะกับสารไดอิเล็กทริก เช่นระหว่างทองหรือเงินกับอากาศหรือสารละลาย โดยที่ขนาดยอตกคลื่น และความกว้าง ของสเปกตรัมพลาสมอนเรโซแนนซ์ของวัสดุต่างๆ จะขึ้นอยู่กับขนาดรูปร่าง ประเภทของวัสดุ และสภาพแวดล้อมรอบๆวัสดุนั้น โลหะชนิดอื่นนอกเหนือไปจากทองคำ ก็สามารถแสดงปรากฏการณ์เชิงแสงในลักษณะเดียวกันนี้ได้เช่นกัน เช่นอนุภาคนาโนของเงิน จะมีสีเหลืองเข้ม แทนที่จะเป็นสีเงินวาวที่เราคุ้นเคย อย่างไรก็ตามโลหะส่วนใหญ่ จะมีความถี่สั่นพ้องอยู่ในช่วงใกล้รังสีอุลตราไวโอเลตซึ่งอยู่นอกสเปกตรัมของช่วงแสงที่มองเห็น นอกจากนี้อนุภาคนาโนของโลหะเกือบทุกชนิด ไม่สามารถคงตัวอยู่ในรูปอนุภาคนาโนได้นานในสภาวะแวดล้อมตามปกติทำให้เราไม่ค่อยพบปรากฏการณ์นี้ในโลหะชนิดอื่นๆ

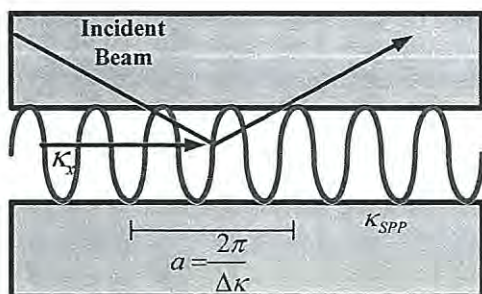
พลาสมอนโพลาไรตอนเชิงผิว (Surface plasmon polaritons : SPPs) คือคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงอินฟราเรด โดยจะเคลื่อนที่ไปตามผิวช่องว่างชั้นการเชื่อมต่อระหว่างโลหะ-ไดอิเล็กทริกที่มีพื้นผิวราบเรียบ มีกลไกการทำงานของคลื่นที่เกี่ยวข้องกันกับการเคลื่อนที่ของประจุในโลหะ (พลาสมอนที่ผิว) และคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดในอากาศหรือไดอิเล็กทริก (โพลาไรตอน) พลาสมอนโพลาไรตอนเชิงผิวนี้ มีความยาวคลื่นน้อยกว่าแสงที่ตกกระทบ (โฟตอน) ดังนั้นพลาสมอนโพลาไรตอนเชิงผิวจะให้การกักเก็บคลื่นที่สูง และมีความหนาแน่นสนามมากกว่าแบบพื้นฐาน ในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวของวัสดุจะเกิดการกักเก็บโหมดความยาวครึ่งคลื่น (Subwavelength) เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.2 โมเดลรูปแบบการสะท้อนกลับหมดสำหรับการคัปปลิงพลาสมอนิกผิวระหว่างโลหะและไดอิเล็กทริกตามทฤษฎีของ Kretschmann และโมเดลของ Otto ในรูปที่ 2.3 แสดงรูปแบบช่องการคัปปลิงสนามคลื่นของพลาสมอนิกผิว พบว่าจำนวนของคลื่นจะเพิ่มตามความถี่ที่สูงขึ้น



รูปที่ 2.2 รูปแบบการสะท้อนกลับหมดสำหรับการคัปปลิงพลาสมอนิกผิวระหว่างโลหะและไดอิเล็กทริก

(ก) โมเดลของ Kretschmann และ (ข) โมเดลของ Otto

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ช่องการคับปลิงสนามคลื่นของพลาสมอนิกที่ผิว

หนึ่งในหัวข้อที่น่าสนใจในการออกแบบวงจรรวมเชิงแสงแบบพลาสมอนิกคือการหาคุณสมบัติการใช้งานที่แท้จริงในแต่ละการประยุกต์ใช้งานในช่วงความยาวคลื่นที่สั้น โดยเฉพาะระยะทางการเคลื่อนที่ของคลื่นพลาสมอนิกในระยะมิลลิเมตรก่อนที่จะเกิดการจางหายของสัญญาณ หมายถึงในการออกแบบนั้นต้องเน้นย้ำความสัมพันธ์ของโครงสร้างกับการกระจายของแสงที่สัมพันธ์กับพลาสมอนิกผิว โดยหากการกักเก็บโหมดของคลื่นมีค่าสูงขึ้น จะสามารถป้องกันการแกว่ง (Damping) ได้มากขึ้น แต่ช่วงระยะในการแพร่คลื่นจะมีค่าลดลง การออกแบบที่นำคลื่นแสงแบบพลาสมอนิก จึงเป็นการออกแบบที่สำคัญในการหาความเหมาะสมระหว่างการกักเก็บโหมดของคลื่นและระยะในการส่งคลื่นให้ได้ค่าสูงที่สุดผ่านการออกแบบวงจรเชิงแสงพลาสมอนิก ส่วนสำคัญคือการออกแบบการเชื่อมต่อระหว่างผิวโลหะกับฉนวน คือเวกเตอร์ของคลื่นในส่วนจินตภาพจะเป็นส่วนกลับของระยะทางในการแพร่กระจายคลื่นโดยที่ส่วนจริงของเวกเตอร์ของคลื่นจะบอกถึงการกักเก็บโหมดของคลื่นในท่อนำคลื่นและคุณสมบัติการกระจายของคลื่นผิวพลาสมอนิกโพลาไรตอนั้น จะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ฉนวนของวัสดุที่นำมาทำท่อนำคลื่น

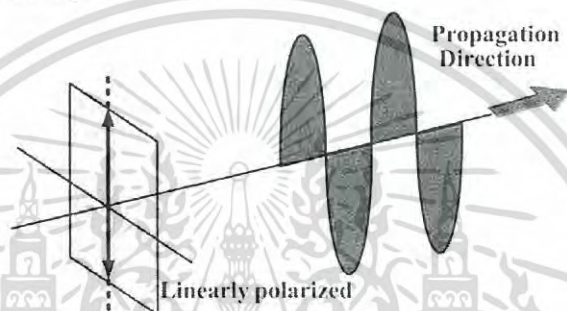
2.2 การโพลาไรซ์ของแสง (Polarization of light)

แสงถือได้ว่าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่สั้น (Oscillate) ไปตามตำแหน่งและเวลา เนื่องจากแสง ณ ตำแหน่งและเวลาใดๆ จะมีทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกัน และสนามทั้งสองยังตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของแสงเสมอ โดยมีขนาดที่สัมพันธ์กันกับอัตราเร็วของแสง ขนาด และทิศทางของสนามแม่เหล็กจะถูกกำหนดด้วยขนาดและทิศทางของสนามไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์คุณสมบัติของแสงจะพิจารณาแต่เพียงสนามไฟฟ้าเท่านั้น และเรียกทิศของสนามไฟฟ้าของแสงว่า “ทิศทางการโพลาไรซ์ของแสง”

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมาจากการสั่นของอะตอมที่อุณหภูมิสูง (Thermal light) จะมีทิศของการโพลาไรซ์ตามทิศการสั่นของอะตอม แต่เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงแบบนี้จะมีอะตอมที่ให้อำนาจแสงจำนวนมาก ทิศการสั่นของอะตอมเหล่านี้จะเป็นแบบสุ่ม (Randomly) ดังนั้น แสงที่ได้ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงจึงมีทิศการโพลาไรซ์แบบสุ่มเช่นกัน โดยจะเรียกว่า “แสงที่ไม่โพลาไรซ์ (Non-polarized light) หรือ แสงธรรมชาติ (Natural light)” แต่ถ้าหากนำแสงที่ไม่โพลาไรซ์มาผ่านตัวกรองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

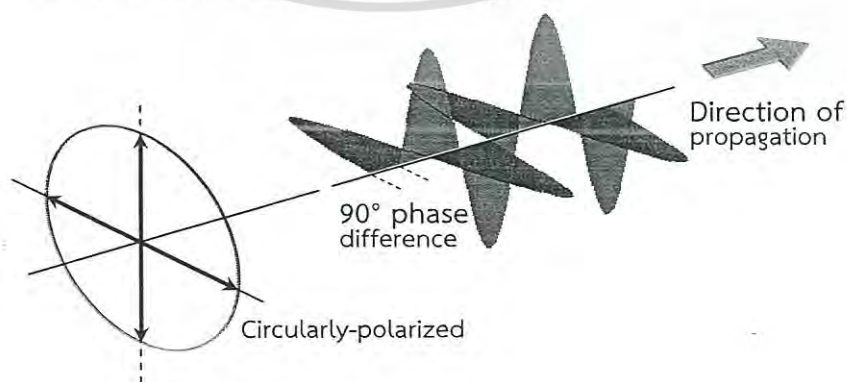
โพลาไรซ์ (Polarizer) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ยอมให้แสงที่มีทิศของการโพลาไรซ์เฉพาะค่าเท่านั้นผ่านออกมาได้ แสงที่ผ่านมาได้นี้จะกลายเป็นแสงที่มีทิศของการโพลาไรซ์ที่แน่นอนและคงที่เรียกว่า “แสงโพลาไรซ์เชิงเส้น (Linearly polarized light) หรือ แสงโพลาไรซ์แบบระนาบ (Plane polarized light)” ดังแสดงในรูปที่ 2.4

สำหรับแสงที่มีการโพลาไรซ์ไม่คงที่ แต่มีการเปลี่ยนแปลงมุมโพลาไรซ์ไปตามตำแหน่งและเวลาที่แน่นอนสม่ำเสมอ เรียกได้ว่าเป็นแสงที่มีการโพลาไรซ์เช่นกัน แต่จะถูกกำหนดให้เป็นการโพลาไรซ์ในอีกสถานะหนึ่ง ซึ่งแบ่งออกได้เป็นแสงโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circularly polarized light) และแสงโพลาไรซ์แบบวงรี (Elliptically polarized light)



รูปที่ 2.4 แสงที่มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น

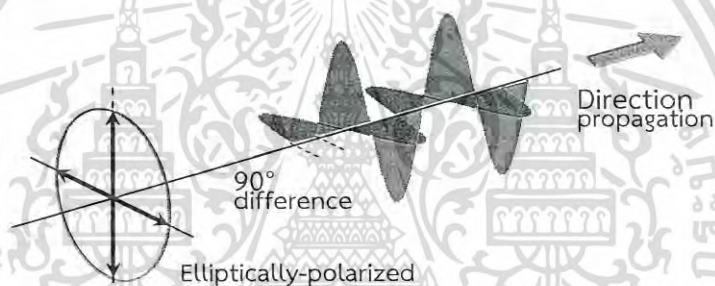
โดยที่แสงโพลาไรซ์แบบวงกลมจะเป็นแสงที่มีองค์ประกอบของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าทั้งสององค์ประกอบตั้งฉากกัน มีขนาด (Amplitude) เท่ากัน แต่องค์ประกอบทั้งสองจะมีเฟสต่างกันอยู่ 90° เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้ารวมที่ตำแหน่งหนึ่งๆ จะพบว่าทิศของสนามไฟฟ้าหรือทิศของการโพลาไรซ์ของแสงที่ผ่านตำแหน่งนั้นจะหมุนเปลี่ยนไปในลักษณะทวนหรือตามเข็มนาฬิกา แบบใดแบบหนึ่งตามเวลาเสมอ มีขนาดคงที่และมีคาบของการหมุนเท่ากับคาบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นๆ หรือถ้าพิจารณาแสง ณ เวลาหนึ่งๆ ทิศของสนามไฟฟ้ารวม หรือทิศของการโพลาไรซ์ของแสงที่ผ่านตำแหน่งต่างๆ ในเวลานั้นจะหมุนทวน หรือตามเข็มนาฬิกาแบบใดแบบหนึ่งไปตามตำแหน่งเสมอ มีขนาดที่คงที่และมีคาบของการหมุนกลับมาซ้ำทิศทางเดิมเท่ากับคาบของคลื่นของแสงดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสงที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับแสงที่มีองค์ประกอบของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่แตกต่างไปจากรูปแบบข้างต้น กล่าวคือ แสงที่มีองค์ประกอบของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากกันทั้งสององค์ประกอบและมีขนาดที่เท่ากัน แต่มีเฟสที่ต่างกันไม่เท่ากับ 0° หรือ 90° หรือองค์ประกอบของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากกันทั้งสององค์ประกอบ มีเฟสต่างกันเท่ากับ 90° แต่มีขนาดที่ต่างกัน เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้ารวมที่ตำแหน่งหนึ่งๆ จะพบว่าทิศของสนามไฟฟ้า หรือทิศของการโพลาไรซ์ของแสงที่ผ่านตำแหน่งนั้น จะหมุนเปลี่ยนไปในทิศทางทวน หรือตามเข็มนาฬิกาแบบใดแบบหนึ่งตามเวลาเสมอ มีขนาดไม่คงที่ เสมือนกับว่าสนามไฟฟ้า หมุนรอบตำแหน่งนั้นเป็นรูปวงรี มีคาบของการหมุนเท่ากับคาบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือถ้าพิจารณา แสง ณ เวลาหนึ่งๆ ทิศของสนามไฟฟ้ารวม หรือทิศของการโพลาไรซ์ของแสงที่ผ่านตำแหน่งต่างๆ ในเวลานั้น จะหมุนทวนหรือหมุนตามเข็มนาฬิกาแบบใดแบบหนึ่งไปตามตำแหน่งเสมอ มีขนาดที่ไม่คงที่แต่มีทิศ การเคลื่อนที่เป็นรูปวงรี และมีคาบของการหมุนกลับมาซ้ำทิศทางเดิมเท่ากับคาบของคลื่นของแสงจะ เรียกการโพลาไรซ์ในรูปแบบนี้ว่า “แสงโพลาไรซ์แบบวงรี” ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสงที่มีการโพลาไรซ์แบบวงรี

2.3 ไบรีฟรินเจนซ์แสง (Optical Birefringence)

ไบรีฟรินเจนซ์เป็นคุณสมบัติเชิงแสงของวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเห (Refractive index) ขึ้นอยู่กับทิศของการโพลาไรซ์ และทิศทางการแพร่กระจายของแสง ค่าไบรีฟรินเจนซ์สามารถพิจารณาได้จากความแตกต่างสูงสุดของค่าดัชนีหักเหภายในเนื้อวัสดุสารนั้น อีกทั้งยังหมายถึงวัสดุนั้นๆ มีค่าดัชนีหักเหของแสงสองค่า หากทำการป้อนแสงให้แพร่กระจายผ่านเนื้อวัสดุสารดังกล่าวจะเกิดปรากฏการณ์ที่ลำแสงแยกตัวออกเป็นสองลำแสงในช่วงที่แสงเดินทางผ่านเนื้อวัสดุสาร ปรากฏการณ์นี้ได้ถูกอธิบายครั้งแรกโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเดนมาร์กในปี ค.ศ. 1670 จากการสังเกตการแพร่กระจายของลำแสงผ่านตัวกลางที่เป็นผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcite) [39] ตัวอย่างของวัสดุพื้นฐานชนิดต่างๆ ที่มีคุณสมบัติไบรีฟรินเจนซ์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1 มีโครงสร้างของเนื้อสารในลักษณะที่เหมือนกับมีแกนสมมาตรหนึ่งตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของแสง เรียกแกนที่ตั้งฉากนี้ว่า “แกนเชิงแสง (Optical axis)” เมื่อทำการป้อนแสงที่มีมุมโพลาไรซ์เชิงเส้นค่าหนึ่งเข้าไปในวัสดุสาร กำหนดให้แสงมีทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวที่ตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉากกับแกนเชิงแสงนี้จะเกิดปรากฏการณ์ที่ลำแสงจะถูกแยกการโพลาไรซ์ออกเป็นสองทิศทางในระนาบที่ตั้งฉากกัน ซึ่งจะมีมุมโพลาไรซ์ที่ขนานและตั้งฉากกับแนวแกนเชิงแสง โดยแสงในทิศทางการโพลาไรซ์ทั้งสองนี้จะมีความเร็วในการเคลื่อนที่ผ่านเนื้อวัสดุสารไม่เท่ากัน เนื่องจากความแตกต่างของค่าดัชนีหักเหในตัวเนื้อสาร และเรียกลำแสงที่มีมุมโพลาไรซ์ตั้งฉากกับแกนเชิงแสงว่า “Ordinary ray” การแพร่กระจายผ่านเนื้อวัสดุในส่วนที่มีดัชนีหักเหของแสงเท่ากับ n_o และเรียกลำแสงที่มีมุมโพลาไรซ์ขนานกับแกนเชิงแสงว่า “Extraordinary ray” จะแพร่กระจายผ่านเนื้อวัสดุสารในส่วนที่มีดัชนีหักเหของแสงเท่ากับ n_e โดยสามารถนำคุณสมบัติเช่นนี้ไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการปรับเปลี่ยนค่าการโพลาไรซ์ของแสงให้เป็นแบบแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น แสงโพลาไรซ์แบบวงกลม หรือแสงโพลาไรซ์แบบวงรีได้ สามารถคำนวณหาค่าไบรีฟรินเจนซ์แสงได้จากสมการ (2.2)

$$\Delta n = n_e - n_o \quad (2.2)$$

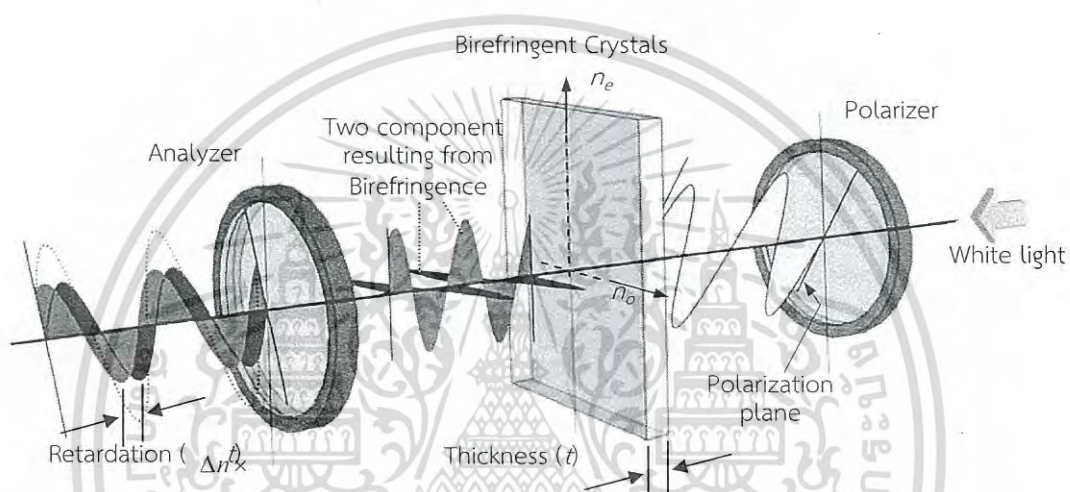
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างค่าไบรีฟรินเจนซ์ของวัสดุสารบางชนิด

Material	n_o	n_e	Δn
Beryl - $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6$	1.602	1.557	-0.045
Calcite - CaCO_3	1.658	1.486	-0.172
Calomel - Hg_2Cl_2	1.973	2.656	+0.683
Ice - H_2O	1.309	1.313	+0.004
Lithium Niobate - LiNbO_3	2.272	2.187	-0.085
Magnesium Fluoride - MgF_2	1.380	1.385	+0.006
Quartz - SiO_2	1.544	1.553	+0.009
Ruby - Al_2O_3	1.770	1.762	-0.008
Rutile - TiO_2	2.616	2.903	+0.287
Sapphire - Al_2O_3	1.768	1.760	-0.008
Sodium Nitrate - NaNO_3	1.587	1.336	-0.251
Tourmaline (complex silicate)	1.669	1.638	-0.031
Zircon - ZrSiO_4	1.960	2.015	+0.055

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ปรากฏการณ์หักเหแบบคู่ของแสงผ่านผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcite - CaCO_3)



รูปที่ 2.8 การปรับมุมโพลาไรซ์ของแสงโดยใช้ Birefringent Crystal

รูปแบบของการเกิดปรากฏการณ์หักเหแบบคู่ของแสงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 มองเห็นภาพแท่งดินสอดผ่านผลึกแคลไซต์เป็นสองแท่ง เกิดจากแสงเดินทางผ่านแท่งผลึกโดยมีทิศทางการแพร่กระจายที่ต่างกันจะมีความเร็วไม่เท่ากันดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น ความต่างเฟสของลำแสง Ordinary ray และ Extraordinary ray จะเพิ่มขึ้นตามความหนาของแท่งผลึกที่แสงแพร่กระจายผ่าน

จากคุณสมบัติของผลึกไบรีฟรินเจนท์ข้างต้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการกำหนดค่าการโพลาไรซ์ให้กับคลื่นแสงตามที่ต้องการได้ โดยพิจารณาจากสมการที่ (2.3) เมื่อ $\Delta n = (n_e - n_o)$ คือค่าไบรีฟรินเจนซ์ของแท่งผลึก λ คือความยาวคลื่นแสงที่พิจารณา L_w คือขนาดความหนาของแท่งผลึก และ $\Delta\phi$ คือความต่างเฟสของลำแสง Ordinary ray และ Extraordinary ray เมื่อแพร่กระจายออกจากแท่งผลึกไบรีฟรินเจนท์

$$\Delta\phi = \frac{2\pi(n_e - n_o)L_w}{\lambda} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเมื่อนำแท่งผลึกดังกล่าวไปจัดวางในระบบดังแสดงในรูปที่ 2.8 แล้วทำการป้อนแสงขาวที่ไม่มีการโพลาไรซ์ (White light) เข้าระบบ (จากทางด้านขวาของภาพ) ผ่านตัวกรองโพลาไรซ์ เพื่อกำหนดระนาบการโพลาไรซ์ให้กับลำแสง จากนั้นคลื่นแสงที่มีการโพลาไรซ์แล้วนี้ จะแพร่กระจายผ่านแท่งผลึกไบรีฟรินเจนต์ โดยคลื่นแสงที่ผ่านแท่งผลึกออกมานี้จะถูกแบ่งออกเป็นสององค์ประกอบที่มีทิศทางการโพลาไรซ์ที่ขนาน และตั้งฉากกับแกนเชิงแสงของแท่งผลึก เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทั้งสองของแสง จะพบว่าองค์ประกอบทั้งสองเกิดการต่างเฟสกันเนื่องจากการแพร่กระจายผ่านแท่งผลึกด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน และทำให้ได้คลื่นแสงขาออกมีระนาบการโพลาไรซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับความต่างเฟสกันขององค์ประกอบทั้งสองนี้ ซึ่งความต่างเฟสดังกล่าว จะมีค่าเท่ากับผลคูณของค่าไบรีฟรินเจนซ์ และความหนาของแท่งผลึกไบรีฟรินเจนต์

2.4 สมการคลื่น (Wave Equation)

ในการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของพลาสมอนิกโพลาริตอนเชิงผิว สามารถอธิบายได้ด้วยสมการของแมกเวลล์ โดยนำไปประยุกต์ใช้กับรอยต่อผิวเรียบระหว่างโลหะตัวนำและไดอิเล็กทริก ประจุที่อยู่ภายนอกและความหนาแน่นของกระแสสามารถหาได้จากสมการเคิลล์ (Curl equations)

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial^2 \vec{D}}{\partial t^2} \quad (2.4)$$

ซึ่งจากสมการ $\nabla \times \nabla \times \vec{E} \equiv \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}$ และค่า $\nabla \cdot (\epsilon \vec{E}) \equiv \vec{E} \cdot \nabla \epsilon + \nabla \epsilon \cdot \vec{E}$ โดยจะเห็นได้ว่าประจุภายนอกมีค่า $\nabla \cdot \vec{D} = 0$, (2.4) สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\nabla \left(-\frac{1}{\epsilon} \vec{E} \cdot \nabla \epsilon \right) - \nabla^2 \vec{E} = -\mu_0 \epsilon_0 \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.5)$$

เมื่อทำการละเว้นการพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงของไดอิเล็กทริก $\epsilon = \epsilon(r)$ บนระยะของความยาวคลื่นเดียว ในสมการที่ (2.5) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการกลางของทฤษฎีคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้เป็น

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{\epsilon}{C^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.6)$$

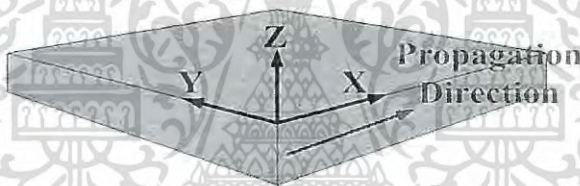
ในเชิงปฏิบัติสมการนี้สามารถเขียนแบ่งแยกในขอบเขตของค่าคงที่ของ ϵ และสมการที่ได้สามารถทำให้เหมาะสมด้วยการใช้ค่าเงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ในสมการที่ (2.6) เป็นรูปแบบในการอธิบายคลื่นที่แพร่กระจายซึ่งสามารถทำได้สองขั้นตอน ขั้นที่หนึ่งคือการกำหนดค่าทั่วไป

ของฮาร์โมนิกที่ขึ้นตามเวลา ดังสมการ $\vec{E}(r,t) = \vec{E}(r)e^{-i\omega t}$ ของสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปในสมการที่ (2.6) จะได้

$$\nabla^2 \vec{E} + k_0^2 \epsilon \vec{E} = 0 \tag{2.7}$$

เมื่อ $k_0 = \omega/c$ คือเวกเตอร์คลื่นของคลื่นที่แพร่กระจายไปในท่อนำคลื่น ดังสมการที่ (2.7) รู้จักกันในชื่อสมการของเฮล์มโฮลทซ์ (Helmholtz equation)

ขั้นตอนต่อมาจึงทำการพิจารณาโครงสร้างพิกัดในการแพร่กระจาย สำหรับวัสดุแบบหนึ่งมิติ เช่น ϵ จะขึ้นอยู่กับพิกัดของพื้นผิว เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งคลื่นที่แพร่กระจายไปตามทิศทางแนวแกน x ของระบบพิกัดคาร์ทีเซียน และแสดงให้เห็นความไม่เปลี่ยนแปลงในแนวแกนตั้งฉาก ในแนวระนาบทิศแนวแกน y ดังรูปที่ 2.9 ดังนั้น $\epsilon = \epsilon(z)$ สามารถประยุกต์ใช้กับปัญหาของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผิวเมื่อระนาบ $z = 0$ จะได้ $\vec{E}(x,y,z) = \vec{E}(z)e^{i\beta x}$ ซึ่งตัวแปรเชิงซ้อน $\beta = kx$ คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลื่นที่เคลื่อนที่และตอบสนองกับองค์ประกอบของเวกเตอร์คลื่นในทิศทาง การแพร่กระจาย จึงได้ปรับปรุงสมการที่ (2.4) ให้อยู่ในรูปแบบของสมการของคลื่น



รูปที่ 2.9 อธิบายโครงสร้างท่อนำคลื่นแบบระนาบ คลื่นแพร่กระจายในทิศทางแกน x พิกัดคาร์ทีเซียน

$$\frac{\partial^2 E(z)}{\partial z^2} + (k_0^2 \epsilon - \beta^2) \vec{E} = 0 \tag{2.8}$$

โดยธรรมชาติแล้วสมการนี้สามารถนำไปใช้กับสมการแม่เหล็ก H โดยสมการที่ (2.8) นี้เป็นจุดเริ่มต้นของการวิเคราะห์โหมดของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่น ซึ่งมีการนำไปประยุกต์ใช้ทั้งเชิงโพโตนิคและออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งหลักการของการใช้สมการนี้เพื่อพิจารณา สนามที่เกิดในพิกัด และการกระจายของคลื่นที่แพร่ ซึ่งมีการอธิบายสมการสนามในองค์ประกอบของ สนามไฟฟ้า E ละ สนามแม่เหล็ก H ด้วยการ ใช้ สมการเคิลสำหรับฮาร์โมนิกตามเวลา $\frac{\partial}{\partial t} \equiv -i\omega$ สมการการคัปปลิงจะได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = i\omega \mu_0 H_x \tag{2.9ก}$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = i\omega \mu_0 H_y \tag{2.9ข}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = i\omega\mu_0 H_z \quad (2.9ค)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -i\omega\epsilon_0\epsilon E_x \quad (2.9ง)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = -i\omega\epsilon_0\epsilon E_y \quad (2.9จ)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = -i\omega\epsilon_0\epsilon E_z \quad (2.9ฉ)$$

สำหรับการแพร่กระจายคลื่นในแนวแกน x คือ $\left(\frac{\partial}{\partial x} = i\beta\right)$ และ ความเป็นเชิงเดี่ยวในแนวแกน y คือ $\left(\frac{\partial}{\partial y} = 0\right)$ สมการระบบสามารถเขียนในรูปอย่างง่ายได้เป็น

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = -i\omega\mu_0 H_x \quad (2.10ก)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - i\beta E_z = i\omega\mu_0 H_y \quad (2.10ข)$$

$$i\beta E_y = i\omega\mu_0 H_z \quad (2.10ค)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = i\omega\epsilon_0\epsilon E_x \quad (2.10ง)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} - i\beta H_z = -i\omega\epsilon_0\epsilon E_y \quad (2.10จ)$$

$$i\beta H_y = -i\omega\epsilon_0\epsilon E_z \quad (2.10ฉ)$$

ระบบนี้มีสองเซตของสองชุดสมการที่สัมพันธ์กัน คุณสมบัติของโพลาริเซชันที่แตกต่างกันของการแพร่กระจายคลื่น เซตแรกคือเซตของโหมดสนามแม่เหล็กตามขวาง Transverse magnetic (TM or p) modes ซึ่งมีเพียงองค์ประกอบของสนาม E_x , E_z และ H_y ที่ไม่เป็นศูนย์ และเซตที่สองคือเซตของโหมดสนามไฟฟ้าตามขวาง Transverse electric (TE or s) modes มีเพียงองค์ประกอบของสนาม H_x , H_z และ E_y ที่ไม่เป็นศูนย์ สำหรับโหมด TM สมการหลักในเทอมของสมการ (2.10) สามารถลดรูปได้เป็น

$$E_x = -i \frac{1}{\omega \epsilon_0 \epsilon} \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (2.11ก)$$

$$E_z = -\frac{\beta}{\omega \epsilon_0 \epsilon} H_y \quad (2.11ข)$$

และสมการคลื่นสำหรับโหมด TM คือ

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} + (k_0^2 \epsilon - \beta^2) H_y = 0 \quad (2.11ค)$$

และสำหรับโหมด TE จะได้เซตรูปแบบที่เหมือนกันคือ

$$H_x = i \frac{1}{\omega \mu_0} \frac{\partial E_y}{\partial z} \quad (2.12ก)$$

$$H_z = \frac{\beta}{\omega \mu_0} E_y \quad (2.12ข)$$

และสมการคลื่นสำหรับโหมด TE คือ

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} + (k_0^2 \epsilon - \beta^2) E_y = 0 \quad (2.12ค)$$

2.5 การเชื่อมต่อแบบเดี่ยวของพลาสมอนิกโพลาริตอนเชิงผิว (Single Interface of Surface Plasmon Polariton)

โครงสร้างพื้นฐานที่สนับสนุน SPPs คือการเชื่อมต่อพื้นผิวเรียบแบบเดี่ยวดังรูปที่ 2.9 ระหว่างวัสดุไดอิเล็กทริก ในส่วนที่ไม่ดูดกลืน ($z > 0$) ด้วยค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ϵ_2 และวัสดุตัวนำอีกด้าน ($z < 0$) อธิบายด้วยฟังก์ชันของไดอิเล็กทริก $\epsilon_1(\omega)$ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุควรมีค่า $Re[\epsilon_1] < 0$ สำหรับวัสดุโลหะ สถานะนี้จะสมบูรณ์ที่ความถี่นั้นๆ ภายใต้ความถี่พลาสมอน ω_p สมการการแพร่กระจายคลื่นในแนวแกน z ของคลื่นตามขวางสามารถหาได้จากการใช้สมการ (2.8) ซึ่งในทั้งสองส่วนเชื่อมต่อหาได้จาก

$$H_y(z) = A_2 e^{i\beta x} e^{-k_2 z} \quad (2.13ก)$$

$$E_x(z) = i A_2 \frac{1}{\omega \epsilon_0 \epsilon_2} k_2 e^{i\beta x} e^{-k_2 z} \quad (2.13ข)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_x(z) = -A_1 \frac{\beta}{\omega \epsilon_0 \epsilon_2} e^{i\beta x} e^{-k_2 z} \quad (2.13ค)$$

สำหรับ $z > 0$ และ

$$H_y(z) = A_1 e^{i\beta x} e^{k_1 z} \quad (2.14ก)$$

$$E_x(z) = -iA_1 \frac{1}{\omega \epsilon_0 \epsilon_1} k_1 e^{i\beta x} e^{k_1 z} \quad (2.14ข)$$

$$E_z(z) = -A_1 \frac{\beta}{\omega \epsilon_0 \epsilon_1} e^{i\beta x} e^{k_1 z} \quad (2.14ค)$$



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของการแพร่กระจาย SPP ที่การเชื่อมต่อแบบเดี่ยวระหว่างโลหะกับไดอิเล็กทริก

สำหรับ $Z < 0$. $k_i \equiv k_{z,i}$ ($i = 1, 2$) คือองค์ประกอบของเวกเตอร์คลื่นในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวที่เชื่อมต่อกัน โดยค่าระหว่างกัน $z = 1/|k_z|$, ซึ่งช่วงที่ลดลงและค่อยๆ หายไปของสนามตั้งฉากกับพื้นผิวตามปริมาณในการกักเก็บของคลื่น โดย H_y และ $\epsilon_i E_z$ ที่ส่วนเชื่อมต่อ ต้องการ $A_1 = A_2$ และ

$$\frac{k_2}{k_1} = -\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (2.15)$$

สัญลักษณ์ในองค์ประกอบของสมการ (2.13 และ 2.14) การจัดกักเก็บในผิวเป็นค่าจริง $Re[\epsilon_i] < 0$ ถ้า $\epsilon_2 > 0$ คลื่นที่ผิวเกิดการแทรกสอดระหว่างวัสดุด้วยสัญลักษณ์ที่ตรงข้ามกันของค่าจริงของค่าความสภาพยอมไฟฟ้าของไดอิเล็กทริก สมการ Re เขียนได้เป็น

$$k_1^2 = \beta^2 - k_0^2 \epsilon_1 \quad (2.16ก)$$

$$k_2^2 = \beta^2 - k_0^2 \epsilon_2 \quad (2.16ข)$$

รวมสมการนี้เข้ากับสมการที่ (2.15) ค่าความสัมพันธ์ในการกระจายของ SPPs จะแพร่กระจายไประหว่างผิวของวัสดุทั้งสอง คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\beta = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}} \quad (2.17)$$

สมการนี้สามารถใช้ได้ทั้งค่า ϵ_1 ที่เป็นค่าจริงและค่าจินตภาพ โดยก่อนที่จะพิจารณาคูณสมบัติของสมการที่ (2.17) นี้ ควรพิจารณาวิเคราะห์สมการที่เป็นไปได้ของ โหมดผิว TE ด้วยการใส่สมการที่ (2.12) สมการองค์ประกอบของสนามสามารถเขียนได้เป็น

$$E_y(z) = A_2 e^{i\beta x} e^{-k_2 z} \quad (2.18ก)$$

$$H_x(z) = -i A_2 \frac{1}{\omega \mu_0} k_2 e^{i\beta x} e^{-k_2 z} \quad (2.18ข)$$

$$H_z(z) = A_2 \frac{\beta}{\omega \mu_0} e^{i\beta x} e^{-k_2 z} \quad (2.18ค)$$

สำหรับ $z > 0$ และ

$$E_y(z) = A_1 e^{i\beta x} e^{k_1 z} \quad (2.19ก)$$

$$H_x(z) = i A_1 \frac{1}{\omega \mu_0} k_1 e^{i\beta x} e^{k_1 z} \quad (2.19ข)$$

$$H_z(z) = A_1 \frac{\beta}{\omega \mu_0} e^{i\beta x} e^{k_1 z} \quad (2.19ค)$$

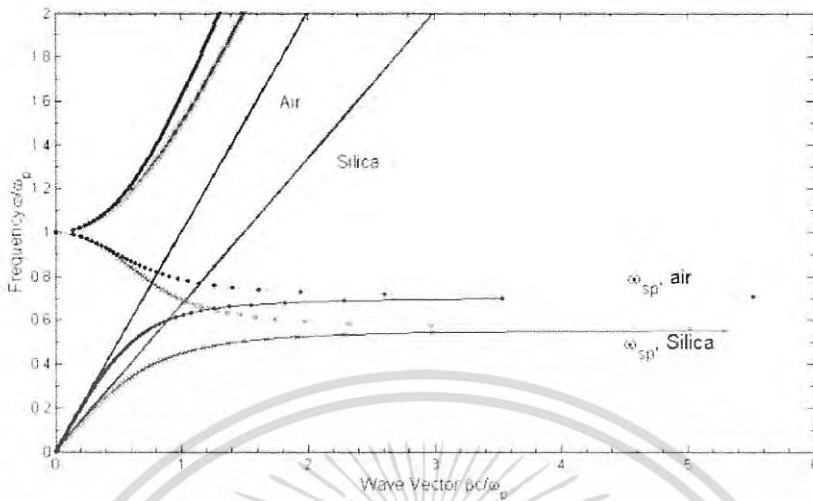
$$A_1(k_1 + k_2) = 0 \quad (2.20)$$

ในการกักเก็บคลื่นที่ผิวมันต้องการให้ค่าจริง $Re[k_1] > 0$ และ $Re[k_2] > 0$ ซึ่งสถานะนี้จะเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อ $A_1 = 0$ ดังนั้นจะได้ $A_2 = A_1 = 0$ ทำให้จะไม่มีโหมดของผิวที่โหมดโพลาไรซ์ของ TE จะมีพลาสมอนโพลาไรตอนเชิงผิวที่โหมดโพลาไรซ์ของ TM เท่านั้น ในรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นค่าที่ได้จากสมการ (2.17) สำหรับโลหะโดยไม่พิจารณาค่าแดมปีงที่อธิบายโดยค่าจริงของฟังก์ชันไดอิเล็กทริกของ Drude ระหว่างการเชื่อมต่ออากาศ air ($\epsilon_2 = 1$) และซิลิกา silica ($\epsilon_2 = 2.25$) สำหรับการพิจารณาเวกเตอร์คลื่นขนาดใหญ่ ค่าความถี่ของ SPPs ที่ใช้ในการอธิบาย ความถี่ที่เกิดพลาสมอนเชิงผิว ω_{sp} คือ

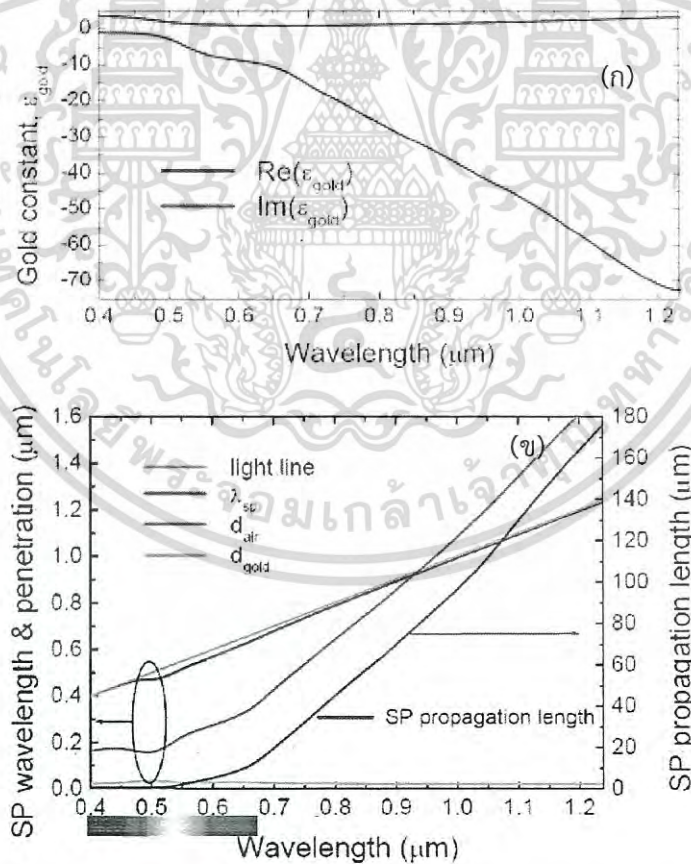
$$\omega_{sp} = \frac{\omega_p}{\sqrt{1 + \epsilon_2}} \quad (2.21)$$

เมื่อ ω_p คือ ความถี่พลาสมา
 ϵ_2 คือค่าไดอิเล็กทริกของตัวนำโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ค่าการกระจายสัมพันธ์ของ SPPs ที่การแทรกสอดระหว่าง โลหะของ Drude ระหว่างอากาศ (air) กับ ซิลิกา (silica) โดยไม่นำเอาค่าการลดทอนทางความถี่มาคิด



รูปที่ 2.12 ค่าความยาวคลื่น SPP ของทองที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การเชื่อมต่อแบบหลายชั้นของพลาสมอนิกโพลาริตอนเชิงผิว (Multiple Interface of Surface Plasmon Polariton)

พลาสมอนโพลาริตอนเชิงผิวในระบบการเชื่อมต่อแบบหลายชั้นจะประกอบไปด้วยตัวนำและไดอิเล็กทริกแบบฟิล์มบางที่แตกต่างกัน โดยในทุกๆระบบจะให้ค่าพลาสมอนโพลาริตอนเชิงผิว ในขอบเขตของการเชื่อมต่อแบบเดี่ยวที่จำกัด เมื่อทำการแบ่งระหว่างการเชื่อมต่อแต่ละส่วนออกจากกัน ขนาดน้อยกว่าความยาวโหมด Z ปฏิกริยาระหว่างพลาสมอนโพลาริตอนเชิงผิวให้ค่าคัปปลิงโหมดที่สูงขึ้น สามารถอธิบายการเชื่อมต่อแบบหลายชั้นได้ดังรูปที่ 2.13 ชั้นโลหะบาง (I) ถูกประกอบอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นไดอิเล็กทริก (II, III) รู้จักกันในชื่อของ “insulator/metal/insulator (IMI)” และแบบที่สองคือชั้นไดอิเล็กทริก (I) เป็นแกนถูกประกอบอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นโลหะเป็น claddings (II, III) เรียกว่า metal/insulator/metal (MIM) ค่าโหมดที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุสามารถหาได้ จากการอธิบายโหมดของ TM ด้วยสมการ (2.20) ที่ไม่เกิดสั้นพ้องในแนวแกน z สำหรับ $z > a$ องค์ประกอบของสนามหาได้จาก

$$H_y = A e^{i\beta x} e^{-k_3 z} \quad (2.22ก)$$

$$E_x = iA \frac{1}{\omega \epsilon_0 \epsilon_3} k_3 e^{i\beta x} e^{-k_3 z} \quad (2.22ข)$$

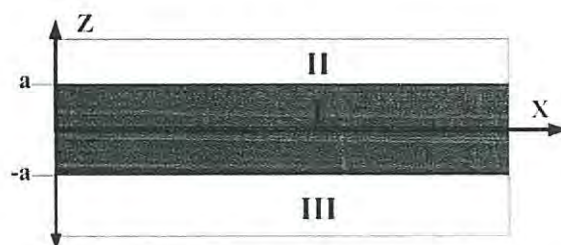
$$E_z = -A \frac{\beta}{\omega \epsilon_0 \epsilon_3} e^{i\beta x} e^{-k_3 z} \quad (2.22ง)$$

สำหรับ $z > -a$ จะได้

$$H_y = B e^{i\beta x} e^{k_2 z} \quad (2.23ก)$$

$$E_x = -iB \frac{1}{\omega \epsilon_0 \epsilon_3} k_2 e^{i\beta x} e^{k_2 z} \quad (2.23ข)$$

$$E_z = -B \frac{\beta}{\omega \epsilon_0 \epsilon_3} e^{i\beta x} e^{k_2 z} \quad (2.23ค)$$



รูปที่ 2.13 โครงสร้างการแพร่กระจาย SPP ที่การเชื่อมต่อแบบหลายชั้น ระหว่างโลหะกับไดอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสนามจะมีค่าลดลงในลักษณะเอกซ์โพเนนเชียลใน แคลดดิ้ง (II) และ (III) และองค์ประกอบของเวกเตอร์คลื่นจะขึ้นอยู่กับจุดเชื่อมต่อคือ $k_i \equiv k_{-i}$ ในบริเวณแกนกลาง $-a < z < a$ โหมดพื้นฐานที่เกิดด้านล่างและด้านบนของการคัปปลิงที่รอยต่อ ได้จาก

$$H_y = Ce^{i\beta x} e^{k_1 z} + De^{i\beta x} e^{-k_1 z} \quad (2.24ก)$$

$$E_x = -iC \frac{1}{\omega \epsilon_0 \epsilon_1} k_1 e^{i\beta x} e^{k_1 z} + iD \frac{1}{\omega \epsilon_0 \epsilon_1} k_1 e^{i\beta x} e^{-k_1 z} \quad (2.24ข)$$

$$E_z = C \frac{\beta}{\omega \epsilon_0 \epsilon_1} e^{i\beta x} e^{k_1 z} + D \frac{\beta}{\omega \epsilon_0 \epsilon_1} e^{i\beta x} e^{-k_1 z} \quad (2.24ค)$$

ในความต้องการความต่อเนื่องของสนาม H_y และ E_x ทำให้ได้

$$Ae^{-k_3 a} = Ce^{k_1 a} + De^{-k_1 a} \quad (2.25ก)$$

$$\frac{A}{\epsilon_3} k_3 e^{-k_3 a} = -\frac{C}{\epsilon_1} k_1 e^{k_1 a} + \frac{D}{\epsilon_1} k_1 e^{-k_1 a} \quad (2.25ข)$$

ที่ $z=a$ และ

$$Be^{-k_2 a} = Ce^{-k_1 a} + De^{k_1 a} \quad (2.26ก)$$

$$-\frac{B}{\epsilon_2} k_2 e^{-k_2 a} = -\frac{C}{\epsilon_1} k_1 e^{-k_1 a} + \frac{D}{\epsilon_1} k_1 e^{k_1 a} \quad (2.26ข)$$

ที่ $z = -a$ ระบบที่เป็นเชิงเส้นของสมการการคัปปลิงทั้งสี่ โดย H_y แทนค่าในสมการทั้งสามช่วงจะได้

$$k_i^2 = \beta^2 - k_0^2 \epsilon_i \quad (2.27)$$

สำหรับ $i=1, 2, 3$ การแก้ไขปัญหาของสมการระบบเชิงเส้น จะอยู่ในรูปสมการไม่ซัดแจ้ง ที่สัมพันธ์กับการกระจายของค่า β และ ω ผ่านสมการ

$$e^{-4k_1 a} = \frac{k_1/\epsilon_1 + k_2/\epsilon_2}{k_1/\epsilon_1 - k_2/\epsilon_2} \frac{k_1/\epsilon_1 + k_3/\epsilon_3}{k_1/\epsilon_1 - k_3/\epsilon_3} \quad (2.28)$$

ถ้าหากความหนาแน่นค่าเป็นอินฟินิตี้ ($a \rightarrow \infty$) สมการที่ (2.28) สามารถลดรูปตั้งสมการที่ (2.10) ซึ่งถ้าหากค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุด้านบนและล่างมีค่าเท่ากัน (II) = (III) คือ $\epsilon_2 = \epsilon_3$ ดังนั้น $k_2 = k_3$ เราสามารถลดรูปสมการที่ (2.28) ได้ และสามารถแบ่งออกเป็นสองเทอมคือ

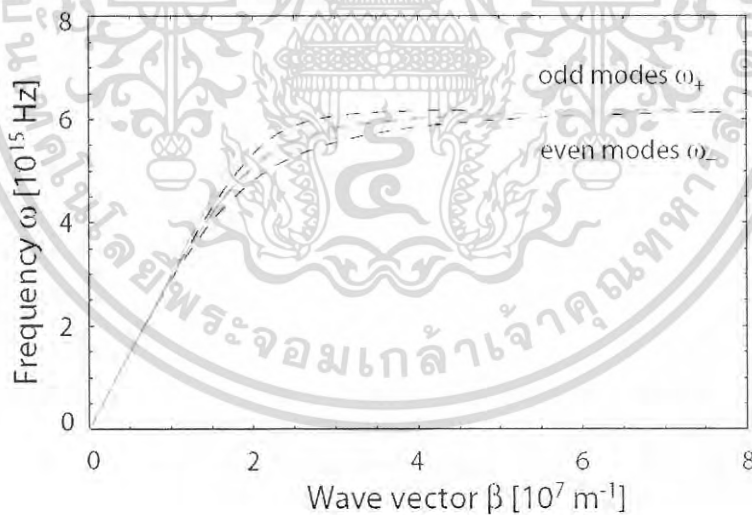
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tanh k_1 a = -\frac{k_2 \varepsilon_1}{k_1 \varepsilon_2} \quad (2.29ก)$$

$$\tanh k_1 a = -\frac{k_1 \varepsilon_2}{k_2 \varepsilon_1} \quad (2.29ข)$$

ในสมการที่ (2.28ก) แสดงให้เห็นโหมดของเวกเตอร์คี่ (odd vector) เกิดขึ้น E_x คือ ฟังก์ชันคี่ ส่วน H_y และ E_z เป็นฟังก์ชันคู่ โดยสมการที่ (2.28ข) จะอธิบายโหมดของเวกเตอร์คู่ E_x คือเป็นฟังก์ชันคู่ H_y และ E_z ฟังก์ชันคี่

ความสัมพันธ์ของการกระจายในสมการที่ 2.29ก และ 2.29ข สามารถประยุกต์เพื่อศึกษาคุณสมบัติโครงสร้างของ IMI and MIM ในการคัปเปิลโหมดของ SPP ในระบบทั้งสอง โดยรูปที่ 2.14 แสดงค่าการกระจายสัมพันธ์ของคัปปลิงโหมดคี่และโหมดคู่ สำหรับ IMI คือ air/silver/air ด้วยโลหะแกนขนาด 100 nm (เส้นประสีเทา) และ 50 nm (เส้นประสีดำ) และค่าการกระจายสัมพันธ์ของคัปปลิงแบบเดี่ยว โหมดคี่และโหมดคู่สำหรับ MI คือ silver/air (เส้นโค้งสีเทา) พื้นฐานฟังก์ชันไดโพลทริกของโลหะเงิน ถูกประมาณค่าจากโมเดลของ Drude จากกราฟจะเห็นได้ว่าโหมดคี่จะมีความถี่ ω_+ ที่สูงกว่า ความถี่ที่ตั้งไว้สำหรับการเชื่อมต่อแบบเดี่ยว SPP และโหมดคู่จะมีความถี่ที่ต่ำกว่า ω_- โดยสำหรับเวกเตอร์คลื่นที่มีขนาดใหญ่ β ที่มีค่า $\text{Im}[\varepsilon(\omega)] = 0$ สามารถจำกัดความถี่ที่ได้จาก



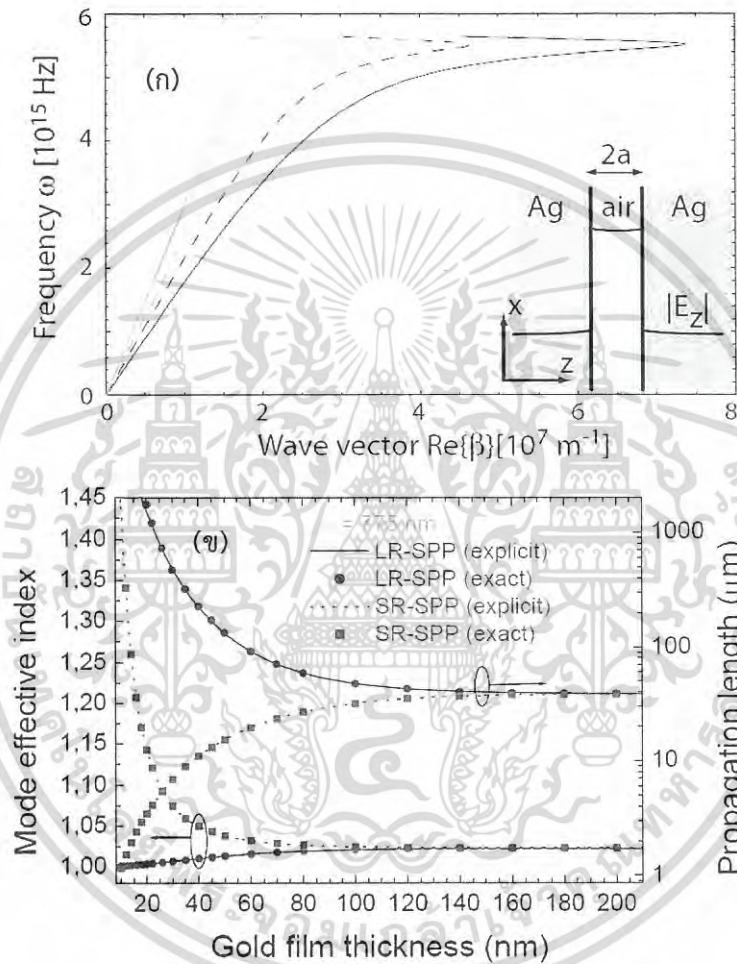
รูปที่ 2.14 ค่าการกระจายสัมพันธ์ของ SPP คัปปลิงโหมดคี่และโหมดคู่สำหรับ IMI และ IM

$$\omega_+ = \frac{\omega_p}{\sqrt{1+\varepsilon_2}} \sqrt{1 + \frac{2\varepsilon_2 e^{-2\beta a}}{1+\varepsilon_2}} \quad (2.30ก)$$

$$\omega_- = \frac{\omega_p}{\sqrt{1+\varepsilon_2}} \sqrt{1 - \frac{2\varepsilon_2 e^{-2\beta a}}{1+\varepsilon_2}} \quad (2.30ข)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหมดคี่นี้นิยมนำมาใช้เพื่อทำการลดขนาดความหนาของฟิล์มโลหะให้ลดลง ในระบบโครงสร้างแบบ MIM ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 2.15 แสดงค่าการกระจายสัมพันธ์ของพลาสมอนโพลาไรตอนเชิงผิว คัปปลิงโหมดคี่และโหมดคู้ สำหรับ MIM คือ silver/air/silver โดยแกนกลางขนาด 50 nm (เส้นประสีเทา) และ 25 nm (เส้นสีดำ) และค่าการกระจายสัมพันธ์ของคัปปลิงแบบเดี่ยว โหมดคี่และโหมดคู้สำหรับ MI คือ silver/air (เส้นโค้งสีเทา) รวมถึง อากาศ (เส้นสีเทา)

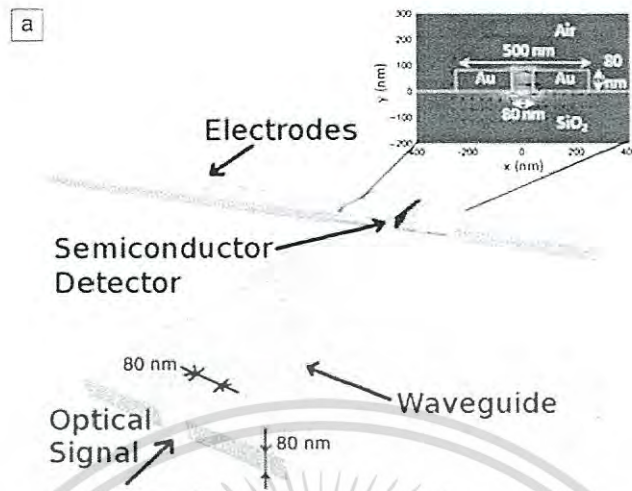


รูปที่ 2.15 (ก) ค่าการกระจายสัมพันธ์ของ SPP คัปปลิงโหมดคี่และโหมดคู้สำหรับ MIM และ MI

(ข) โหมดของ SPP ระยะสั้นและยาววัสดุทองที่ความยาวคลื่น 775 nm

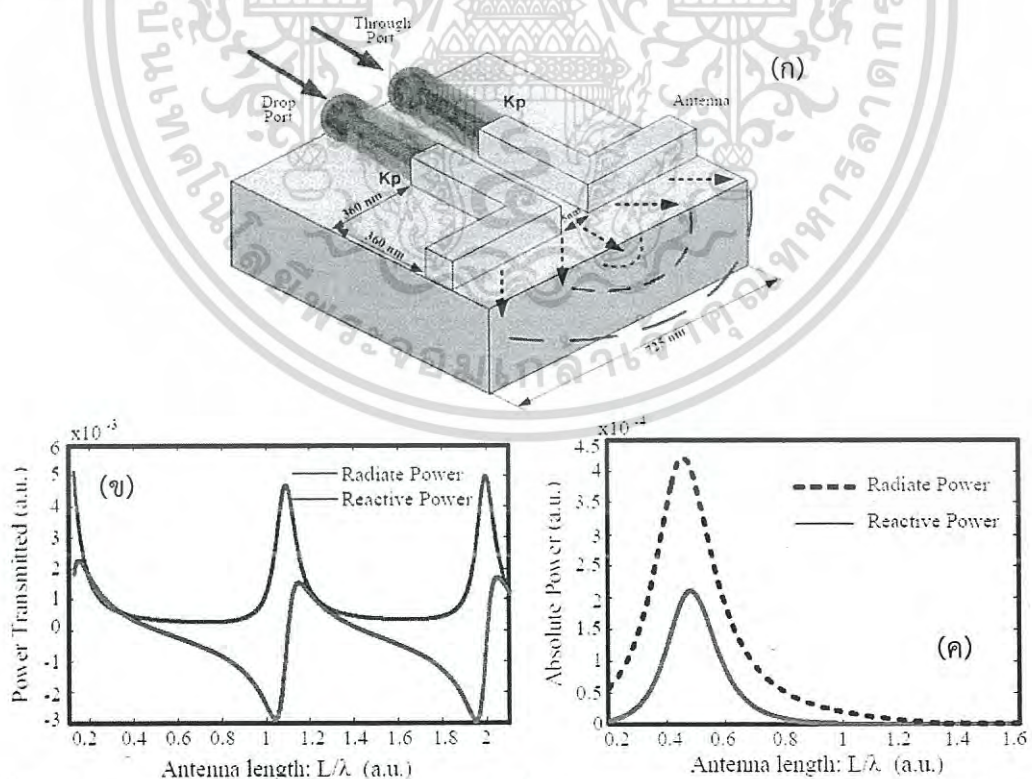
โครงสร้างการเชื่อมต่อแบบหลายชั้นมีการนำเสนอในการนำไปประยุกต์ใช้ในการสื่อสารทางแสง ในรูปแบบของการใช้เพื่อการรวมแสง (Light concentrating) ด้วยความยาวคลื่นย่อย สำหรับดักจับคลื่น รวมถึงการส่งผ่านคลื่น เช่น การสร้างสายอากาศเชิงแสงขนาดนาโน [40] ดังรูปที่ 2.16 ได้นำเสนอวงจรรวมเชิงแสง (Plasmonic integrated circuits) ที่ใช้สำหรับการดักจับแสง (Photodetector) แสงขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ไประหว่างร่องของวัสดุ germanium (Ge) และทำงานที่ความถี่สื่อสารช่วง THz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 วงจรรวมเชิงแสงที่ใช้สำหรับการดักจับแสง [40]

ได้ทำการศึกษารูปแบบการใช้งานแบบไดโพลพลาสมอนิกโพลาริตอนเชิงผิว สำหรับการสร้างสายอากาศขนาดนาโน โดยใช้หลักการการสร้างสัญญาณคู่ไดโพล ที่ได้จากเทคนิคพลาสมอนิกโพลาริตอนเชิงผิว นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ส่งสัญญาณในช่วงความถี่สื่อสาร THz และนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างสนาม TM mode เพื่อเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก [41]



รูปที่ 2.17 (ก) วงจรรวมเชิงแสงที่ใช้สำหรับการส่งคลื่น THz (ข) กำลังงานที่ส่งผ่านเปรียบเทียบกับความยาวสายอากาศขนาดนาโน (ค) กำลังงานสัมบูรณ์ของสายอากาศขนาดนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ท่อนำคลื่นแบบพลาสมอนิก (Plasmonic Waveguide)

คลื่นพลาสมอนิกเชิงผิวจะมีการแพร่กระจายและเคลื่อนที่ไปตามผิวรอยเชื่อมต่อของ โลหะกับ ไดอิเล็กทริกที่มีความเร็วของเฟสที่น้อยกว่าความยาวคลื่นสั้นกว่าโมเมนตัมสูงกว่า และค่าอิมพีแดนซ์ที่สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับคลื่นที่แพร่กระจายในวัสดุไดอิเล็กทริก การลดลงของความยาวคลื่นนี้จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์วงจรรวมขนาดนาโนและท่อนำคลื่นแบบพลาสมอนโพลาไรตอนเชิงผิว ซึ่งจะไม่เหมือนกับวัสดุไดอิเล็กทริกที่โลหะจะมีค่าความยอมไฟฟ้าเป็นเชิงซ้อน ส่วนจินตภาพของค่าความยอมไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้เกิดการสูญเสียกำลังเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านท่อนำคลื่น ในการพิจารณาความถี่แสงช่วงที่ตามองเห็น (Visible) และช่วงอินฟราเรด (Infrared) วัสดุที่ยาวดอย่างทองและเงิน จะมีค่าจินตภาพของความยอมไฟฟ้าต่ำและมักนิยมนำมาใช้ในท่อนำคลื่นแบบ พลาสมอนิก โดยค่าความยอมไฟฟ้าของโลหะหาได้จาก $\epsilon_2 = \epsilon_2' + i\epsilon_2''$ และตอบสนองต่อค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น

$$\beta = \beta' + i\beta'' \quad (2.31)$$

ระยะของการแพร่กระจายของพลาสมอนโพลาไรตอนเชิงผิววก่อนที่กำลังส่งจะลดลงต่ำกว่า $1/e$ สามารถหาได้จาก

$$L = \frac{1}{2\beta''} \quad (2.32)$$

ด้วยท่อนำคลื่นแสงนั้นมีการลดทอนการแพร่กระจายคลื่นสูง จึงมีการศึกษารูปแบบของการคับปลิงรวมถึงโครงสร้างหลายรูปแบบเพื่อเพิ่มโหมดของการกักเก็บให้สูงขึ้น ดังรูปที่ 2.18 (ก)-(ฉ) แสดงชนิดของท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิกที่นิยมใช้ในออกแบบวงจรเชิงแสง คือ (ก) Long-range SPP (LRSP) waveguide (ข) Dielectric loaded surface plasmon waveguide (DLSPW) (ค) Plasmonic slot waveguide (ง) Metal wedge waveguide (จ) V-groove channel waveguide และ (ฉ) Hybrid plasmonic waveguide (HPWG).

วิธีการหนึ่งในการลดการสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นของ SPP ถูกประยุกต์จากโครงสร้างของฟิล์มบางด้วยการใส่วัสดุไดอิเล็กทริกทั้งสองด้าน [42, 43] ดังรูปที่ 2.18 (ก) เป็นโครงสร้างราบเรียบที่สมมาตรด้วยโครงสร้างแคลดดิ้งที่ไม่มีการสูญเสีย การเกิดการสูญเสียของโหมดสมมาตรนี้ลดลงตามความหนาของโลหะที่ลดลงทำให้โหมดในการแพร่จะมีค่าลดลงด้วย โหมดลักษณะนี้เราจะเรียกว่า “Long-range SPP (LRSP) mode” โดยที่ท่อนำคลื่นแบบ LRSP มักนำไปประยุกต์ใช้กับการส่งข้อมูลแพร่กระจายในทิศทางไกล เมื่อต้องการให้มีการกักเก็บสูงมากขึ้นซึ่งทำให้เกิดผลที่ตามมาคือการสูญเสียสูงขึ้นทำให้ต้องใช้ท่อนำคลื่นแสงชนิดอื่น คือการใช้ท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิกแบบเดี่ยวที่ขนาดของโหมดมีค่าน้อยที่ความถี่สั้นพ้องที่ต้องการ อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์นี้สนใจที่จะออกแบบอุปกรณ์เพื่อใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

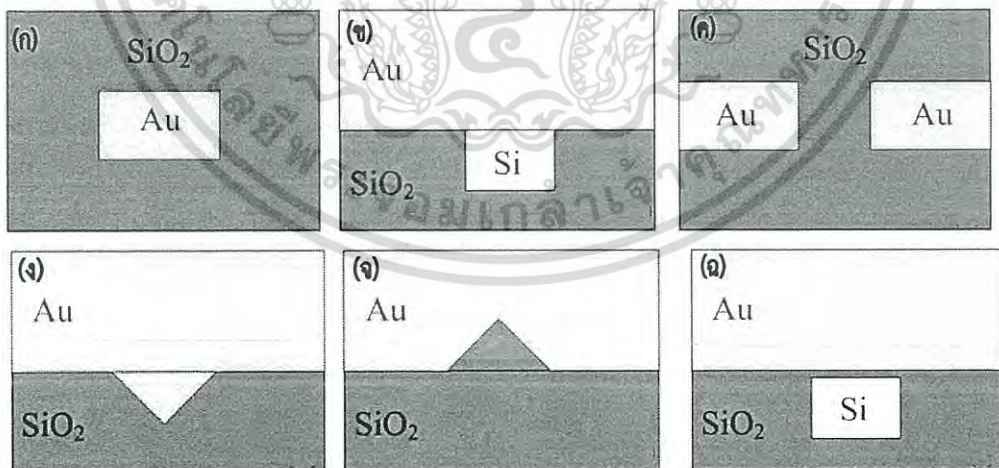
ในช่วงความยาวคลื่น $1.55 \mu\text{m}$ ต้องใช้อุปกรณ์ที่ให้ช่วงของความถี่ต่ำมาก ความเร็วกลุ่มใกล้เคียงกับความเร็วแสงซึ่งท่อนำคลื่นชนิดนี้ไม่สามารถทำงานได้ใกล้เคียงกับความถี่พลาสมอนเชิงผิว

1) ท่อนำคลื่นแสงแบบ DLSPW ประกอบไปด้วยวัสดุที่มีค่าดัชนีสูง และวัสดุที่นำมาทำเคลดดิ้งมีค่าดัชนีต่ำ [44] ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ข) ซึ่งให้ค่าการกักเก็บที่ดีจากการใช้เทคนิคความแตกต่างของดัชนีระหว่าง high index core และ lower index cladding

2) ท่อนำคลื่นแสงแบบช่อง Slot waveguide [40] ประกอบไปด้วยโลหะฟิล์มบาง ใสลงไปในวัสดุฐาน ช่องนี้จะถูกใส่ด้วยอากาศหรือวัสดุไดอิเล็กทริกอื่นๆ ดังรูปที่ 2.18 (ค) ช่องว่างสามารถทำให้มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นได้ดังงานวิจัยที่ [40, 45] โหมดของคลื่นจะถูกนำและกักเก็บไว้ในช่องว่างนี้

3) ท่อนำคลื่นพลาสมอนิกสามารถสร้างให้อยู่ในรูปแบบที่แตกต่างได้เช่นการสร้าง Wedge waveguide และ V-groove channel waveguide ดังรูปที่ 2.18 (ง) และ 2.18 (ค) คุณสมบัติจะคล้ายกับ ท่อนำคลื่นแสงแบบช่อง สามารถให้โหมดของการกักเก็บคลื่นที่สูง [46] ลักษณะของท่อนำคลื่นชนิดนี้ซึ่งเหมาะสมเป็นอย่างมากในการทำงานกับการใช้ในสายใยแก้วนำแสง [47]

4) ท่อนำคลื่นพลาสมอนิกแบบผสมผสานถูกนำเสนอด้วยปัจจัยของความต้องการให้เกิดโหมดของการกักเก็บคลื่นที่สูงและลดจำนวนของแสงที่สูญเสียลง [48] จะประกอบไปด้วย วัสดุไดอิเล็กทริกที่มีดัชนีสูงแยกออกจากชั้นโลหะที่มีดัชนีต่ำกว่า ดังรูปที่ 2.18 (ฉ) เป็นการนำเอาข้อดีของท่อนำคลื่นพลาสมอนิกแบบ DLSPW และแบบช่องมาใช้ร่วมกัน และ โหมด TM ที่ได้ จะอยู่เฉพาะในวัสดุที่มีค่าดัชนีต่ำ ซึ่งรวมถึงสามารถสนับสนุนโหมดของ TE ด้วยค่าดัชนีระหว่างชั้นที่สูงมาก อัตราการสูญเสียและการโพลาไรซ์ รวมถึงการประยุกต์ใช้งาน [48-51]



รูปที่ 2.18 โครงสร้างพื้นฐานของท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิก (ก) LRSP waveguide (ข) DLSPW (ค) plasmonic slot waveguide (ง) Metal wedge waveguide (จ) V-groove channel waveguide และ (ฉ) HPWG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

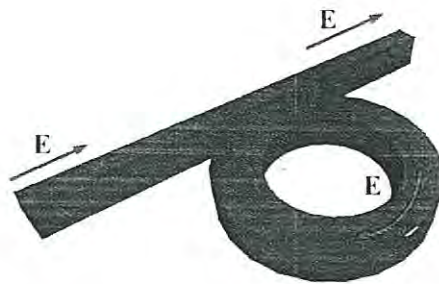
2.8 วงแหวนสั่นพ้องแบบแอดดรอป (Add/Drop ring resonators)

การประยุกต์ใช้วงแหวนสั่นพ้องสำหรับการทำงานเป็นตัวกรองช่วงความถี่ผ่าน (Band pass filter) ได้ถูกนำเสนอโดย E.A. Marcatili ในปี ค.ศ. 1969 [52] โดยตัวกรองความถี่ดังกล่าว มีลักษณะดังรูปที่ 2.19 ซึ่งประกอบด้วย ตัวนำคลื่นที่มีภาคตัดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยม ชั้นในของตัวนำคลื่นจะใช้วัสดุสารที่มีค่าดัชนีหักเหของแสง (Refractive index) ค่าหนึ่ง แล้วทำการหุ้มตัวนำคลื่นนี้อีกชั้นหนึ่ง ด้วยวัสดุสารที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงที่น้อยกว่า [53]

การวิเคราะห์สมการคุณลักษณะการส่งผ่านของตัวกรองในรูปที่ 2.20 ได้นำเสนอการเลือกใช้วัสดุสำหรับสร้างตัวนำสัญญาณที่แตกต่างกัน เช่น AlGaAs-GaAs [54, 55] หรือ Si-SiO₂ [56] และ Si₃N₄-SiO₂ [57] ที่มีขนาดรัศมีของวงแหวนสั่นพ้องที่ใช้งานอยู่ที่ 5 μm และ 30 μm ทำให้ได้แถบสัญญาณที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ (Free spectral range: FSR) อยู่ระหว่าง 20 และ 30 nm ส่วนวงแหวนสั่นพ้องชนิด Passive นั้น จะใช้วัสดุสารชนิด GaInAsP [58] และ AlGaAs-GaAs [59] ซึ่งประสิทธิภาพการทำงานของตัวกรองสัญญาณจะถูกจำกัดด้วยการสูญเสียเนื่องจากการโค้งงอของแท่งตัวนำและการกระเจิงของแสงในตัววงแหวนสั่นพ้อง อย่างไรก็ตามการสูญเสียดังกล่าวอาจได้รับการชดเชยด้วยการเพิ่มวัสดุชนิด Active เข้าไปในตัวกรองสัญญาณที่ใช้งาน [60]



รูปที่ 2.19 ตัวกรองช่องสัญญาณแบบวงแหวนสั่นพ้อง



รูปที่ 2.20 วงแหวนสั่นพ้องที่มีการคัปปลิงเดียวกับแท่งตัวนำคลื่นแบบเส้นตรงหนึ่งแท่ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงแหวนสั่นพ้องที่มีโครงสร้างอย่างง่ายสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.19 เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสนามไฟฟ้า E_i ผ่านตัวคัปปลิง (Coupling) สัญญาณส่วนหนึ่งจะถูกแบ่งผ่านเข้าไปในส่วนของตัวนำวงแหวน ได้เป็นสนามไฟฟ้า E_r และสัญญาณส่วนที่เหลือจากการแบ่งผ่านข้างต้นจะส่งผ่านออกไปที่ปลายอีกข้างหนึ่งของตัวนำคลื่นที่เป็นเส้นตรงได้เป็นสนามไฟฟ้า E_t โดยการพิจารณาค่าของการคัปปลิงระหว่างแท่งตัวนำคลื่นเส้นตรงกับตัวนำคลื่นวงแหวน จะทำให้สามารถคำนวณหาปริมาณของสัญญาณที่ถูกคัปปลิงจากตัวนำคลื่นเส้นตรง ไปยังตัวนำคลื่นวงแหวน หรือจากตัวนำคลื่นวงแหวน ไปยังตัวนำคลื่นเส้นตรงได้ ค่าการคัปปลิงนี้จะขึ้นอยู่กับระยะห่าง และความยาวของช่วงใกล้สัมผัสระหว่างตัวนำทั้งสอง จากโครงสร้างของวงแหวนสั่นพ้องเช่นนี้จะมีผลให้สัญญาณที่มีความยาวคลื่นบางช่วงเท่านั้นที่จะเกิดกำทอน (Resonance) ขึ้นภายในตัวนำคลื่นแบบวงแหวน และสามารถประยุกต์ใช้งานสำหรับการเลือกกรองสัญญาณในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการได้ ด้วยการเลือกปรับขนาดของวงแหวนสั่นพ้องที่เหมาะสมตามสมการ (2.33)

$$m\lambda_m = nL, \quad m = \text{เลขจำนวนเต็ม} \quad (2.33)$$

โดย m คือ Longitudinal mode number, λ_m คือช่วงความยาวคลื่นที่เกิดกำทอน, n คือดัชนีหักเหของวัสดุที่ใช้ทำตัวนำคลื่นแบบวงแหวน และ L คือความยาวเส้นรอบวงของวงแหวนสั่นพ้อง



รูปที่ 2.21 โครงสร้างของวงแหวนสั่นพ้องซึ่งมีสองรูปแบบคือ (ก) Horizontal coupling scheme และ (ข) Vertical coupling scheme

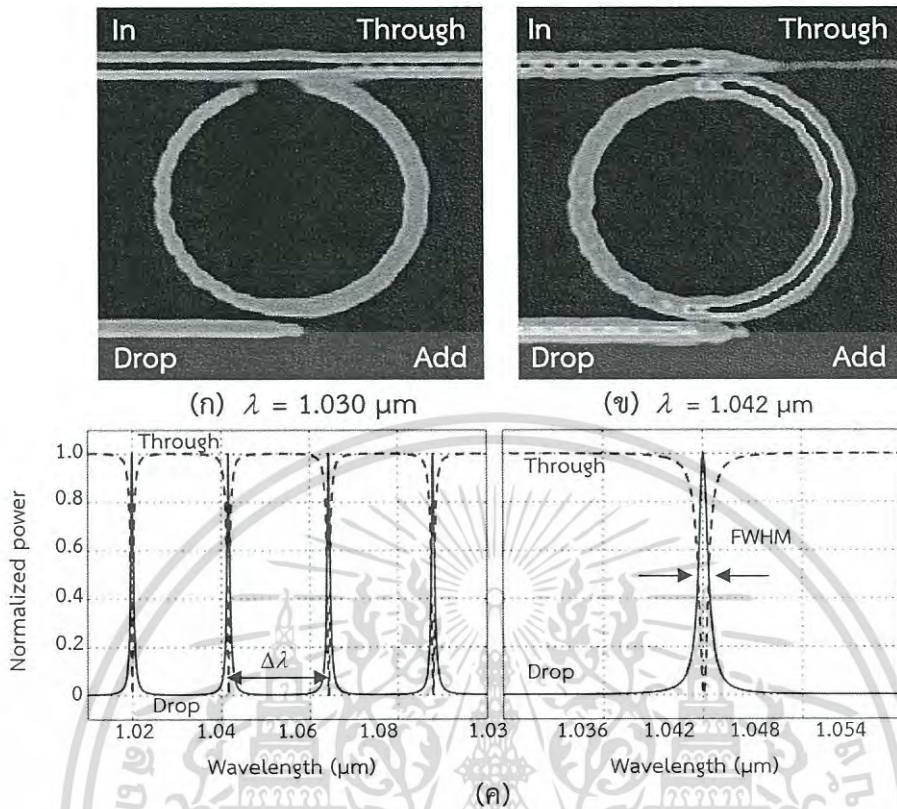
วงแหวนสั่นพ้องสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะของตัวกรองช่วงความยาวคลื่น ตัวมัลติเพล็กซ์ หรือดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสง ตัวแปลงสัญญาณ และประยุกต์ใช้งานเครือข่ายเส้นทาง (Network routing) ได้ โดยทั่วไปวงแหวนสั่นพ้องที่ใช้เป็นตัวกรองสัญญาณจะมีโครงสร้างสองแบบ แสดงดังรูปที่ 2.21 กล่าวคือมีลักษณะที่วงแหวนวางอยู่ระหว่างท่อนำคลื่นแบบขนานสองแท่งในระนาบเดียวกัน หรือวงแหวนวางทับอยู่บนท่อนำคลื่น ซึ่งรูปแบบทั้งสองนี้ จะมีพอร์ตที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบภายนอกได้ทั้งหมด 4 พอร์ต ประกอบด้วยส่วนที่ใช้สำหรับป้อนสัญญาณเข้าได้แก่ อินพุตพอร์ตและแอดพอร์ต และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ให้สัญญาณออกคือ ทูรพอร์ตและดรอพพอร์ต เพื่อทำความเข้าใจถึงการทำงานของวงแหวนสั้นพ้อง ในเบื้องต้นนี้ จะพิจารณาเฉพาะกรณีป้อนสัญญาณเข้าเพียงทิศทางเดียวที่อินพุตพอร์ต โดยไม่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่แอดพอร์ต

โดยทั่วไปการทำงานของวงแหวนสั้นพ้องอธิบายได้โดยการเกิดปฏิสัมพันธ์กัน (Interaction) ของคลื่นแสงความถี่ต่างๆ ที่แพร่กระจายไปตามท่อนำคลื่น แล้วเกิดการแทรกสอด และเกิดกำทอนขึ้นภายในท่อนำคลื่น เช่น เมื่อทำการป้อนสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นหนึ่งเข้าไปที่อินพุตพอร์ต สัญญาณแสงนี้จะแพร่กระจายไปตามท่อนำคลื่นแห่งตรงส่วนบน (ท่อนำคลื่นที่เชื่อมอินพุตพอร์ต และ ทูรพอร์ต) และสัญญาณบางส่วนจะถูกแบ่งผ่านจุดคัปปลิงด้านบน (Coupling 1) แล้วแพร่กระจายเข้าไปในท่อนำคลื่นในส่วนที่เป็นวงแหวนและผ่านจุดคัปปลิงด้านล่าง (Coupling 2) ซึ่งจะทำให้การแบ่งสัญญาณบางส่วนให้ไปปรากฏออกที่ดรอพพอร์ต สัญญาณส่วนที่เหลือจากการคัปปลิงครั้งที่สองจะแพร่กระจายต่อไปตามท่อนำคลื่นวงแหวนจนถึงจุดคัปปลิงด้านล่างอีกครั้งและเกิดการแทรกสอดกับสัญญาณใหม่ที่จุดคัปปลิงเข้ามาจากท่อนำคลื่นแห่งตรงส่วนบน ด้วยรูปแบบการทำงานในลักษณะดังกล่าว การเกิดการแทรกสอดของคลื่นแสงนี้จะเป็นไปในลักษณะ “เสริมกันหรือหักล้างกัน” จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของตัวนำคลื่นชนิดวงแหวนสั้นพ้องว่าสร้างขึ้นจากวัสดุชนิดใด มีขนาดของวงแหวนเท่าใด และค่าการคัปปลิงเป็นสำคัญ กล่าวคือหากสัญญาณที่เหลือจากการคัปปลิงครั้งที่สองแพร่กระจายไปจนถึงจุดคัปปลิงครั้งแรกมีเฟส “ตรงกันข้าม” กับสัญญาณใหม่ที่แพร่กระจายเข้ามา จะทำให้เกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกันทำให้ได้สัญญาณรวมที่เหลืออยู่ในท่อนำคลื่นแบบวงแหวนมีกำลังน้อยลงส่งผลให้สัญญาณขาออกที่ดรอพพอร์ต มีกำลังน้อยลงเช่นกัน และจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “สภาวะกำทอนปิด (Off resonance condition)” ดังรูปที่ 2.22 (ก) ส่วนสัญญาณอินพุตที่เหลือจากอินพุตพอร์ต ที่ไม่ได้ถูกคัปปลิงเข้าไปในท่อนำคลื่นแบบวงแหวนจะแพร่กระจายออกไปที่ทูรพอร์ต ในทางตรงกันข้าม หากสัญญาณที่เหลือจากการคัปปลิงครั้งที่สองแพร่กระจายไปจนถึงจุดคัปปลิงแรกมีเฟสที่ “ตรงกัน” กับสัญญาณที่แพร่กระจายเข้ามาใหม่จะทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน ทำให้ได้สัญญาณรวมที่เหลืออยู่ในท่อนำคลื่นแบบวงแหวนมีกำลังมากขึ้นส่งผลให้สัญญาณขาออกที่ดรอพพอร์ต มีกำลังมากขึ้นเช่นกัน และจะเหลือสัญญาณไปปรากฏที่ทูรพอร์ตน้อยลง ซึ่งจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “สภาวะกำทอน (Resonance condition)” ดังรูปที่ 2.22 (ข)

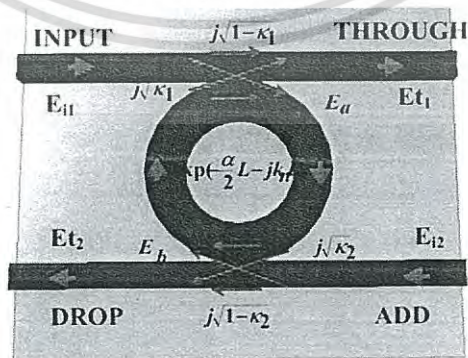
ผลตอบสนองของวงแหวนสั้นพ้องแสดงในรูปที่ 2.22 (ค) การเกิดสภาวะกำทอนพบได้จากการลดลง (Dips) ของกำลังงานของแสงที่ทูรพอร์ต และการเพิ่มกำลังงานของแสงขึ้น (Peaks) ที่ดรอพพอร์ต กล่าวโดยสรุปคือสัญญาณแสงที่มีช่วงความยาวคลื่นที่ทำให้เกิดสภาวะกำทอนจะถูกดรอพสัญญาณออกที่ดรอพพอร์ต ในทำนองเดียวกัน ถ้าทำการป้อนสัญญาณที่มีช่วงความยาวคลื่นที่ทำให้เกิดสภาวะกำทอนนี้เข้าที่แอดพอร์ต สัญญาณใหม่ที่ป้อนเข้าที่แอดพอร์ตนี้จะไปร่วมกับสัญญาณที่เกิดสภาวะกำทอนปิดที่แพร่กระจายมาจากอินพุตพอร์ตและปรากฏออกที่ทูรพอร์ต จากคุณลักษณะการทำงานดังกล่าวจึงสามารถนำอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.21 ไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวกรองสัญญาณแสงแบบแอดดรอพได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 ผลตอบสนองของตัวกรองแอด/ดรอป (ก) สถานะ Off resonance, (ข) สถานะ Resonance และ (ค) ผลตอบสนองต่อความยาวคลื่น

คุณลักษณะการทำงานได้ว่าตัวกรองแบบแอดดรอปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.23 และเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาจะกำหนดให้สัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากการคัปปลิงมีค่าเป็นศูนย์ ($D^2=1$) ซึ่งสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายภายในท่อนำคลื่นดังรายละเอียดดังต่อไปนี้ [60]



รูปที่ 2.23 แผนภาพแสดงวงแหวนสั่นพ้องแบบคัปปลิงคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_a = E_{i1} j\sqrt{\kappa_1} + E_b \sqrt{1-\kappa_1} e^{\frac{\alpha L}{2^2} - jk_n \frac{L}{2}} \quad (2.34)$$

$$E_b = E_a \sqrt{1-\kappa_2} e^{\frac{\alpha L}{2^2} - jk_n \frac{L}{2}} \quad (2.35)$$

$$E_a = \frac{E_{i1} j\sqrt{\kappa_1}}{1 - \sqrt{1-\kappa_1} \sqrt{1-\kappa_2} e^{\frac{\alpha L}{2} - jk_n L}} \quad (2.36)$$

$$E_b = \frac{E_{i1} j\sqrt{\kappa_1}}{1 - \sqrt{1-\kappa_1} \sqrt{1-\kappa_2} e^{\frac{\alpha L}{2} - jk_n L}} \cdot \sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n \frac{L}{2}} \quad (2.37)$$

$$E_{i1} = E_b j\sqrt{\kappa_1} e^{\frac{\alpha L}{2^2} - jk_n \frac{L}{2}} + E_{i1} \sqrt{1-\kappa_1} \quad (2.38)$$

$$E_{i2} = E_a j\sqrt{\kappa_2} e^{\frac{\alpha L}{2^2} - jk_n \frac{L}{2}} \quad \text{at } E_{i2} = 0 \quad (2.39)$$

โดย E_{i1} แทนสนามไฟฟ้าขาเข้าที่อินพุตพอร์ต, E_{i1} แทนสนามไฟฟ้าขาออกที่ทรูพอร์ต, E_{i2} แทนสนามไฟฟ้าขาออกที่ดรอพพอร์ต, E_a และ E_b แทนสนามไฟฟ้าที่ถูกคัปปลิงเข้าไปในวงแหวนสั้น พ้อง κ_1 และ κ_2 คือสัมประสิทธิ์การคัปปลิงระหว่างตัวนำคลื่นเส้นตรงกับตัวนำคลื่นวงแหวน และ L แทนขนาดเส้นรอบวงของวงแหวน

จากสมการ (2.34) – (2.39) จะสามารถสร้างสมการส่งผ่านสำหรับทรูพอร์ตและดรอพพอร์ตได้ดังสมการ (2.40) และ (2.42) ตามลำดับ

Through port:

$$\frac{E_{t1}}{E_{i1}} = \frac{-\kappa_1 \sqrt{1-\kappa_2} e^{\frac{\alpha L}{2} - jk_n L} + \sqrt{1-\kappa_1} - (1-\kappa_1) \sqrt{1-\kappa_2} e^{\frac{\alpha L}{2} - jk_n L}}{1 - \sqrt{1-\kappa_1} \sqrt{1-\kappa_2} e^{\frac{\alpha L}{2} - jk_n L}} \quad (2.40)$$

$$\frac{E_{t1}}{E_{i1}} = \frac{-\sqrt{1-\kappa_2} e^{\frac{\alpha L}{2} - jk_n L} + \sqrt{1-\kappa_1}}{1 - \sqrt{1-\kappa_1} \sqrt{1-\kappa_2} e^{\frac{\alpha L}{2} - jk_n L}} \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

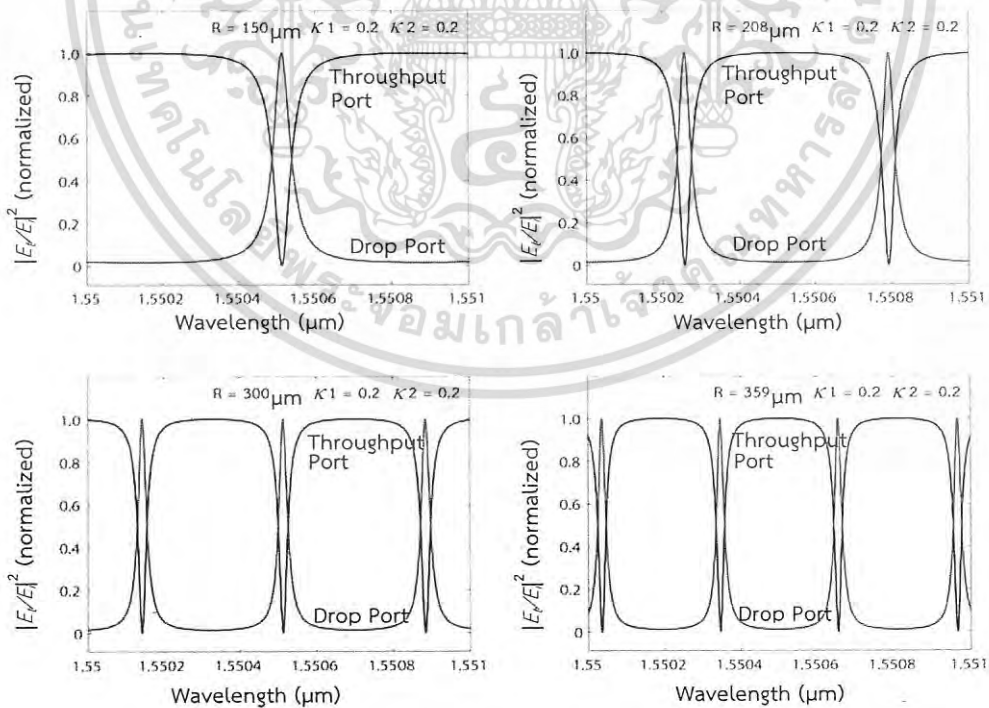
Drop port:

$$\frac{E_{i2}}{E_{i1}} = \frac{-\sqrt{\kappa_1 \kappa_2} e^{\frac{\alpha L}{2} - jk_n \frac{L}{2}}}{1 - \sqrt{1 - \kappa_1} \sqrt{1 - \kappa_2} e^{\frac{\alpha}{2} L - jk_n L}} \quad (2.42)$$

และจากสมการส่งผ่าน (2.40) และ (2.42) สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสัญญาณแสงขาออกที่ทรูพอร์ต: I_{i1} กับความเข้มของสัญญาณแสงขาเข้าที่อินพุตพอร์ต: I_{i1} และความเข้มของสัญญาณแสงขาออกที่ดรอปพอร์ต: I_{i2} กับความเข้มของสัญญาณแสงขาเข้าที่อินพุตพอร์ต: I_{i1} ได้ดังสมการที่ (2.43) และ (2.44)

$$\frac{I_{i1}}{I_{i1}} = \left| \frac{E_{i1}}{E_{i1}} \right|^2 = \frac{1 - \kappa_1 - 2\sqrt{1 - \kappa_1} \sqrt{1 - \kappa_2} e^{\frac{\alpha}{2} L} \cos(k_n L) + (1 - \kappa_2) e^{-\alpha L}}{1 + (1 - \kappa_1)(1 - \kappa_2) e^{-\alpha L} - 2\sqrt{1 - \kappa_1} \sqrt{1 - \kappa_2} e^{\frac{\alpha}{2} L} \cos(k_n L)} \quad (2.43)$$

$$\frac{I_{i2}}{I_{i1}} = \left| \frac{E_{i2}}{E_{i1}} \right|^2 = \frac{\kappa_1 \kappa_2 e^{\frac{\alpha}{2} L}}{1 + (1 - \kappa_1)(1 - \kappa_2) e^{-\alpha L} - 2\sqrt{1 - \kappa_1} \sqrt{1 - \kappa_2} e^{\frac{\alpha}{2} L} \cos(k_n L)} \quad (2.44)$$



รูปที่ 2.24 คุณลักษณะการส่งผ่านของวงแหวนสั่นพ้องแบบคัปปลิงคู่กรณีปรับรัศมี R

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแผนภาพของวงแหวนสั่นพ้องแบบคัปปลิงคู่ดังรูปที่ 2.23 เมื่อกำหนดเส้นรอบวงของวงแหวนเป็น L ($L = 2\pi R$ โดยที่ R แทนรัศมีของวงแหวนซึ่งมีค่าระหว่าง 359-150 μm) ค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิง $\kappa_1 = \kappa_2 = 0.2$ การลดทอนของความเข้มแสงภายในวงแหวน $\alpha = 0$ สัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากการคัปปลิง (Intensity insertion loss) $\gamma = 0$ ค่าคงที่ของการแพร่กระจายของคลื่นแสง $k_{\parallel} = 2\pi m / \lambda$ โดยดัชนีหักเหของวัสดุที่ใช้สร้างตัวนำคลื่น $n = 3.34$ จะสามารถจำลองคุณลักษณะการส่งผ่านของวงแหวนสั่นพ้องแบบคัปปลิงคู่ได้ดังรูปที่ 2.24 ซึ่งจะพบว่าสามารถเลือกกรองสัญญาณในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการให้ปรากฏออกที่ทรอปพอร์ตได้ โดยการเลือกใช้วงแหวนสั่นพ้องที่มีขนาดรัศมีที่เหมาะสมกับช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการให้เกิดสภาวะกำหนด

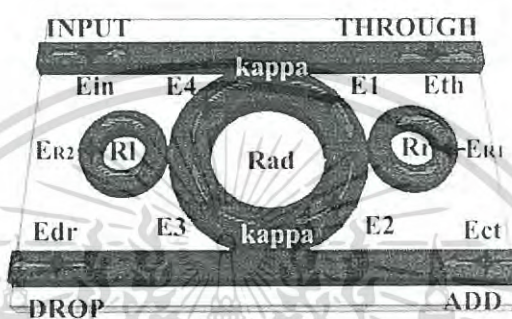
ตารางที่ 2.2 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการปรับโครงสร้างสำหรับวงแหวนสั่นพ้องระดับไมโคร เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ได้ศึกษา

Tuning parameters	Controlled variables	Mechanism
Resonance wavelength	Refractive index	Thermo-optics [65-67]
	Refractive index	Electro-optics [68]
	Refractive index	Free carrier injection [69, 70]
	Cavity size	Strain control (MEMS) [71-73]
Resonator loss	Propagation loss	Metal-attachment (MEMS) [61]
	Propagation loss	Electro-absorption [62]
	Propagation amplification	Gain trimming [63,64]
Power coupling ratio	Effective coupling coefficient	Interferometry [74]
	Surrounding refractive index	Thermo-optics [76]
	Coupling gap	Fluidic mixture [77]
		Gap tuning (MEMS) [75,78]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 วงแหวนสั้นพ้องแบบประยุกต์ (Modified Add/Drop Resonator)

จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงแหวนสั้นพ้องและตัวกรองแอดดรอปสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ เพื่อสร้างอุปกรณ์เชิงแสงที่มีโครงสร้างที่แตกต่างและคุณสมบัติในการเพิ่มโหมตของคลื่นในท่อนำคลื่นขึ้นมา โดยทำการทดลองเพื่อประยุกต์ใช้งานด้วยการเพิ่มวงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กที่ประกอบเข้าด้านข้างคัปปลิงตัวกรองแอดดรอปเชื่อมต่อกันดังแสดงรูปที่ 2.25 [79-82]



รูปที่ 2.25 แผนภาพแสดงระบบวงแหวนสั้นพ้องแบบประยุกต์. R_s : รัศมีของวงแหวน κ_s : สัมประสิทธิ์การคัปปลิง (Coupling coefficients) R_d : รัศมีของวงแหวนแอดดรอป และ A_{effs} : พื้นที่หน้าตัดของตัวนำคลื่น (Effective areas)

การทำงานของระบบเริ่มต้นจากการป้อนสัญญาณพัลส์แสงแบบเกาส์เซียน (Gaussian pulse) สร้างขึ้นได้โดยง่ายจากแหล่งกำเนิดแสงธรรมดา (Light source) เป็นสัญญาณอินพุต (E_m) ป้อนให้กับระบบวงแหวนสั้นพ้องดังแสดงในรูปที่ 2.25 มีองค์ประกอบของขนาดของสนามไฟฟ้า (E_0) ค่าลดทอนของสัญญาณ (α) และค่าคงที่เฟส (ϕ_0) ดังสมการ (2.45) L แทนระยะการแพร่กระจายของสัญญาณแสง (Propagation distance) หรือความยาวของท่อนำคลื่น (Waveguide length) ที่แสงแพร่กระจายผ่าน

$$E_m(t) = E_0 e^{-\alpha L + j\phi_0(t)} \quad (2.45)$$

ค่าดัชนีหักเหของวัสดุที่ใช้เป็นตัวนำคลื่นจะเปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มของแสงที่แพร่กระจายผ่านดังสมการ (2.46)

$$n = n_0 + n_2 I = n_0 + n_2 \left(\frac{P}{A_{eff}} \right) \quad (2.46)$$

โดยที่ n_0 และ n_2 คือค่าดัชนีหักเหของวัสดุแบบเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้น I และ P คือค่าความเข้ม และกำลังของแสงตามลำดับ ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำคลื่น (Effective mode core area) แทนด้วย A_{eff} ซึ่งจะมีขนาดตั้งแต่ 0.10 ถึง $0.50 \mu\text{m}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสัญญาณอินพุตแพร่กระจายเข้าไปในวงแหวนสั้นพ้องจะเกิดสภาวะสั้นพ้องขึ้นกับสัญญาณแสงในช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับรัศมีของวงแหวน โดยสามารถพิจารณาอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าขาออก E_{out} กับสนามไฟฟ้าขาเข้า E_{in} ได้ดังสมการ (2.47) เป็นคุณลักษณะส่งผ่านของวงแหวนสั้นพ้องเดี่ยว

$$\left| \frac{E_{out}}{E_{in}} \right|^2 = (1-\gamma) \left[1 - \frac{(1-(1-\gamma)x^2)\kappa}{(1-x\sqrt{1-\gamma}\sqrt{1-\kappa})^2 + 4x\sqrt{1-\gamma}\sqrt{1-\kappa}\sin^2(\frac{\phi}{2})} \right] \quad (2.47)$$

โดย κ คือ สัมประสิทธิ์การคัปปลิง $x = \exp(-\alpha L/2)$ คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียของสัญญาณแสงที่แพร่กระจายผ่านวงแหวนในแต่ละรอบ $\phi_0 = kLn_0$ และ $\phi_{NL} = kLn_2(P/A_{eff})$ คือการเลื่อนเฟส (Phase shifts) เชิงเส้น และไม่เป็นเชิงเส้นตามลำดับ $k = 2\pi/\lambda$ คือค่าคงที่ของการแพร่กระจายคลื่นในสูญญากาศ L แทนระยะทางการแพร่กระจายของสัญญาณแสง (Propagation distance) และ α คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเชิงเส้น (Linear absorption coefficient) เนื่องจากวงแหวนสั้นพ้องใน รูปที่ 2.25 จะเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม (R_1 , R_2 และ R_3) ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงแหวนสั้นพ้องตัวแรก จะเป็นสัญญาณอินพุตให้กับวงแหวนสั้นพ้องตัวถัดไปตามลำดับ ในขณะที่ตัวกรองสัญญาณแอดดรอป จะถูกใช้เพื่อกรองสัญญาณที่ได้จากเอาต์พุตของวงแหวน R_3 (มีลักษณะเหมือนสัญญาณ Chaotic noise) เพื่อให้ได้แถบสัญญาณแสงที่เหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้งานต่อไป ซึ่งคุณลักษณะการส่งผ่านของตัวกรองสัญญาณแอด/ดรอปจะเป็นไปตามสมการที่ (2.48) และ (2.49)

$$\left| \frac{E_t}{E_m} \right|^2 = \frac{(1-\kappa_4) - 2\sqrt{1-\kappa_4} \cdot \sqrt{1-\kappa_5} e^{\frac{\alpha}{2}L} \cos(k_n L) + (1-\kappa_5) e^{-\alpha L}}{1 + (1-\kappa_4)(1-\kappa_5) e^{-\alpha L} - 2\sqrt{1-\kappa_4} \cdot \sqrt{1-\kappa_5} e^{\frac{\alpha}{2}L} \cos(k_n L)} \quad (2.48)$$

$$\left| \frac{E_d}{E_m} \right|^2 = \frac{\kappa_4 \kappa_5 e^{-\frac{\alpha}{2}L}}{1 + (1-\kappa_4)(1-\kappa_5) e^{-\alpha L} - 2\sqrt{1-\kappa_4} \cdot \sqrt{1-\kappa_5} e^{\frac{\alpha}{2}L} \cos(k_n L)} \quad (2.49)$$

โดย E_t และ E_d แทนสนามไฟฟ้าขาออกของทรูพอร์ตและดรอปพอร์ตตามลำดับ ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตที่ได้นี้สามารถควบคุมได้โดยการกำหนดค่าสัดส่วนการคัปปลิง และขนาดรัศมีตัวนำคลื่นวงกลมของตัวกรองแอด/ดรอปที่เหมาะสม [81, 82] กำหนดให้ n คือดัชนีหักเหของตัวนำคลื่น $L = 2\pi R d$ แทนความยาวของตัวนำคลื่น โดยที่ $R d$ คือรัศมีของวงแหวนตัวกรองแอดดรอป κ_4 และ κ_5 คือสัมประสิทธิ์การคัปปลิงของตัวกรองแอด/ดรอป $k_n = 2\pi m/\lambda$ คือค่าคงที่ของการแพร่กระจายคลื่นในตัวกลางที่มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดัชนีหักเหเท่ากับ n ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเชิงเส้น การสูญเสียภายในตัวนำคลื่น (Waveguide loss) $\alpha = 0.5 \text{ dBmm}^{-1}$ และค่าการสูญเสียความเข้มแสงเนื่องจากการคัปปลิง (Coupler intensity loss) $\gamma = 0.1$ จากระบบวงแหวนสั้นพ้องในรูปที่ 2.25 สัญญาณแสงอินพุตที่ป้อนเข้าไปในระบบจะเปลี่ยนเป็นสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete signal) มีลักษณะเหมือนถูกแบ่งเป็นชิ้นบางๆ และถูกขยายขนาดของสัญญาณขึ้นภายในวงแหวนสั้นพ้อง R_1 - R_3 เป็นผลมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของตัวนำคลื่น [82]

2.10 หลักการพื้นฐานของแอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์เชิงแสง (Optical Add/Drop Multiplexers: OADM)

การสื่อสารเชิงแสงในปัจจุบันมีการพัฒนาอุปกรณ์เชิงแสงเพื่อตอบสนองการใช้งานที่แตกต่างกัน แต่อุปกรณ์หนึ่งที่เป็นตัวสำคัญในการใช้งานในเครือข่ายและสามารถตอบสนองการทำงานแบบแบ่งความยาวคลื่น WDM คือแอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์เชิงแสง (Optical add/drop multiplexers: OADMs) ทำงานตอบสนองในการรวมและแยกความยาวคลื่นที่สนใจที่ต้องการหรือ เฉพาะตัวนั้นๆ รวมถึงการสลับไปยังโหนดที่ต้องการด้วยซึ่งเราสามารถแบ่งชนิดของอุปกรณ์ OADM [83] ได้ดังนี้

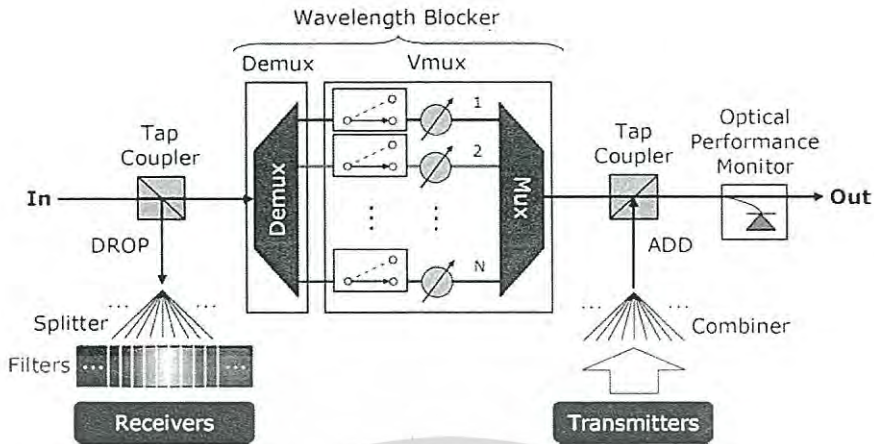
2.10.1 แอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์แบบถาวร (Fixed add/drop multiplexers: FOADMs)

ให้ช่องสัญญาณหรือความยาวคลื่นที่ถาวรกับโหนดนั้นๆ โดยพื้นฐานแล้วจะเป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจากวงจรกรองฟิล์มบาง (Thin-film filters: TFFs) ซึ่งมีเพียงความยาวคลื่นที่เฉพาะตัว สามารถ add เข้า หรือ drop ออกจากอุปกรณ์จากชุด multichannel stream ในปัจจุบันอุปกรณ์ที่ใช้งาน คือ configurable (COADMs) ซึ่งทางฝ่ายผลิตสามารถตั้งและปรับค่าจำนวนของช่องสัญญาณที่ต้องการกรองเฉพาะ หากช่องสัญญาณมีความหนาแน่นสูงเช่น ขนาด 50 GHz channel FOADM จะต้องใช้งานร่วมกับตัวแยกความถี่เชิงแสง (optical frequency interleaver) เพื่อช่วยในการแยกช่องสัญญาณที่มีความหนาแน่นสูงออกจากกัน และยังมีผลกระทบที่เกิดจากอุณหภูมิด้วย

2.10.2 แอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์แบบบล็อกเกอร์หรือบรอดแบนด์ (Blocker or broadband add/drop multiplexers: BOADMs)

เป็น OADMs ชุดแรกที่นำมาใช้ในเชิงธุรกิจ เนื่องจากสามารถตั้งค่าช่องสัญญาณหรือความยาวคลื่นเฉพาะ เนื่องจากมีโมดูล wavelength blocker (WB) หรือโมดูล variable multiplexer/demultiplexer (VMux/Demux) ที่ใช้ในการเปลี่ยนช่องสัญญาณแบบไดนามิกตามระดับการลดทอนสัญญาณที่สูงที่สุด ดังนั้นจึงนิยมนำไปใช้งานสำหรับการสื่อสารเชิงแสงผ่านอากาศว่าง free-space optics ตัวสวิตชิงใน Micro-electro-mechanical systems (MEMS) รวมถึง liquid crystal devices (LCDs) หรือ liquid crystal on silicon (LCoS) ซึ่ง BOADM นิยมใช้ในเครือข่ายแบบ metropolitan area networks มี 32 หรือ 40 ช่องสัญญาณด้วยช่องว่างระหว่างช่อง 100 GHz

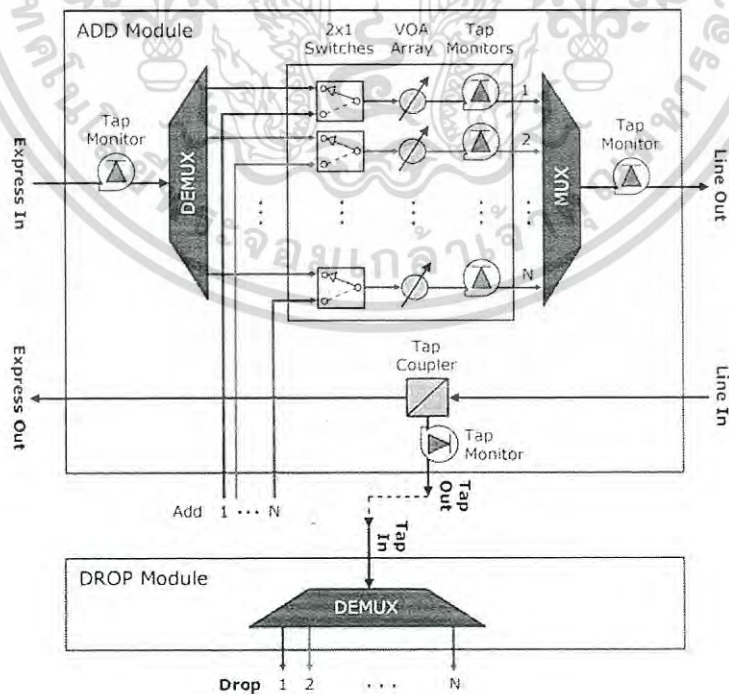
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 สถาปัตยกรรมของระบบแอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์แบบบล็อกเกอร์หรือบรอดแบนด์

2.10.3 แอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์แบบปรับระบบอัตโนมัติ (Reconfigurable add/drop multiplexers: ROADMs)

เป็นอุปกรณ์ที่มีรูปแบบการปรับความถี่ระบบแบบอัตโนมัติ คือใช้อินเตอร์ของโนดหรือจำนวนของสายเชื่อมต่อกับโนดนั้นๆ มาใช้ในการคำนวณ อุปกรณ์จะเป็นลักษณะของ Programmable Logic Control (PLC) ซึ่งสามารถรองรับได้ถึง 48 โหนด ที่ 10 Gbps และ 16 โหนด ที่ 40 Gbps ด้วยการมอดูเลตสัญญาณแสงแบบ differential phase-shift keying (DPSK) และแบบ duobinary และประกอบไปด้วยโมดูลของ wavelength selective switch (WSS) ที่สามารถเลือกความยาวคลื่นที่ต้องการได้

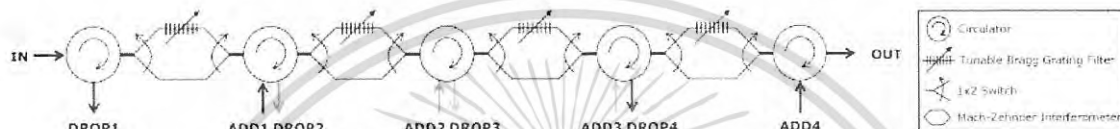


รูปที่ 2.27 สถาปัตยกรรมระบบของแอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์แบบปรับระบบอัตโนมัติ PLC ROADM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.4 แอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์แบบปรับความยาวคลื่น (Tunable add/drop multiplexers: TOADMs)

เป็นอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์ที่เน้นความง่ายในการใช้งาน ที่ใช้อุปกรณ์ปรับค่าช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ wavelength/passband-tunable filters ทำการเลือกช่วงที่ต้องการซึ่งจะติดช่วงข้างเคียงมาด้วย แต่จะทำการใช้ตัวกรองอีกรอบเพื่อทำการกรองเฉพาะความยาวคลื่นที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.28 ใช้วงจรกรองที่สร้างด้วย Mach-Zehnder interferometers 2 ทาง 4 ชุด และ circulators 3 ทาง 4 ชุด ในการแยกความยาวคลื่นที่ต้องการ



รูปที่ 2.28 สถาปัตยกรรมระบบของ TOADM ด้วย tunable Bragg grating filters.

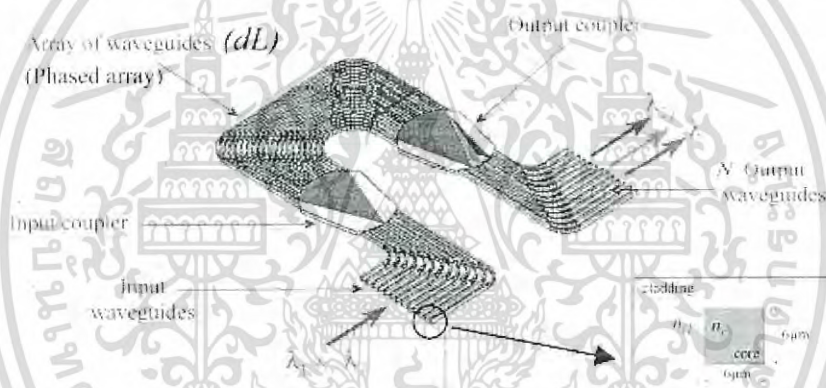
FOADM	BOADM	ROADM		
Thin Film Filter (TFF) Based OADM	Wavelength Blocker Based OADM	Planar Lightwave Circuit (PLC) ROADM	Wavelength Selective Switch (WSS)	Wavelength Crossconnect (WXC)
<ul style="list-style-type: none"> • 2 multi-λ ports (1 In, 1 Out) + 2N single-λ ports (N Add, N Drop) • Pre-defined channels / bands dropped / added at a static node 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 multi-λ ports (1 In, 1 Out) • Blocks or attenuates λ's • No built-in Add or Drop or power monitoring • Used in 'Broadcast & Select' architecture 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 multi-λ ports (1 In, 1 Out) + 2N single-λ ports (N Add, N Drop) • One 1x2 switch per λ • Switches λ's from In / Add to Out / Drop • Built-in power monitors 	<ul style="list-style-type: none"> • N+1 multi-λ ports (1 In, 1 Out, N-1 Add or Drop or mesh or expansion) • Switches λ's from In / Mesh In / Add to Out / Mesh Out / Drop • No built-in power monitors 	<ul style="list-style-type: none"> • 2N multi-λ ports (N-1 In or Mesh In or expansion, 1 Add, N-1 Out or Mesh Out or expansion, 1 Drop) • Switches λ's from In / Mesh In / Add to Out / Mesh Out / Drop
TOADM				
Passband Tunable TOADM		Wavelength Tunable TOADM		
<ul style="list-style-type: none"> • 4 multi-λ ports (1 In, 1 Out, 1 Add, 1 Drop) • Add / Drop ports: add / drop up to N adjacent λ's in pre-defined band 		<ul style="list-style-type: none"> • 2 multi-λ ports (1 In, 1 Out), 2N single-λ ports (N Add, N Drop) • Add/Drop ports: add / drop any λ on any port 		

รูปที่ 2.29 ฟังก์ชันเปรียบเทียบการทำงานของโมดูลของ OADMs แบบต่างๆ [83]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 โครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ท่อนำคลื่นแสงแอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์ (OADM Waveguide)

ในการออกแบบท่อนำคลื่นแสงเพื่อการทำงานแบบแอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์นั้น มีกระบวนการหลายรูปแบบซึ่งสามารถจัดตามโครงสร้างในการออกแบบได้สามกลุ่มคือ Array waveguide Grating (AWG) [84], Mach-Zehnder interferometer (MZI) ด้วย fiber bragg gratings (FBG) [85] วงแหวนสั้นพ้องไมโครแบบคัปปลิงแนวตั้ง (Vertical coupled ring resonator) และ Optical circulator [86] เนื่องจาก AWG มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการสร้างวงจรรวมขนาดใหญ่แต่ทนต่อความเปลี่ยนแปลงของระบบได้น้อย และ MZI ที่เป็นวงจรที่ใช้ FBG ที่เกิดปัญหารบกวนจากการแทรกสอดข้างเคียง (Cross talk) ดังนั้นจึงสนใจใช้ท่อนำคลื่นแสงในรูปแบบของ optical circulator มาออกแบบเนื่องจากมีความง่ายในการสร้าง ความทนต่อการเปลี่ยนแปลงและสามารถนำไปประยุกต์ได้ในงานที่หลากหลาย



รูปที่ 2.30 ท่อนำคลื่นเซาะร่องแบบอาร์เรย์

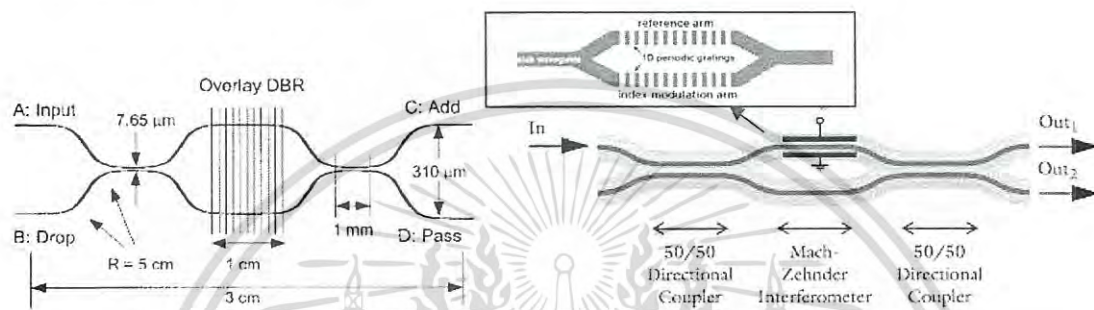
2.11.1 ท่อนำคลื่นเซาะร่องแบบอาร์เรย์ (Array Waveguide Grating)

อุปกรณ์นี้ทำหน้าที่ในการแยกสัญญาณแสงหลายๆ สัญญาณที่มีค่าความยาวคลื่นต่างกันออกจากกัน อาศัยหลักการของการแทรกสอดของคลื่นแสง ทำงานลักษณะของอาร์เรย์ของเฟส จำนวนของท่อนำคลื่นจะมีจำนวนเท่ากับความยาวคลื่นที่ต้องการจะส่ง โดยทั่วไปจะถูกออกแบบให้มีความยาวคลื่นแตกต่างกันสองเท่า หรือ เป็น 4, 16, 32, 64 เป็นต้น มีตั้งแต่ ขนาด 40 ช่องสัญญาณ 80 ช่องสัญญาณ ตามขนาดและจำนวนของความยาวคลื่น ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ต้องอาศัยค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระ ที่แคบในการแยกชัดจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าปัญหาหลักของ AWG ได้แก่ ปัญหาเรื่องความสูญเสียทางแสงทั้ง insertion loss และ crosstalk ปัญหาเรื่องขนาดของอุปกรณ์ AWG และปัญหาเรื่องอุณหภูมิที่ทำให้ค่าดัชนีหักเหของวัสดุเปลี่ยนไปเวลาใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.2 ท่อนำคลื่นเซาะร่องแบบ MZI-Grating

ใช้โครงสร้างมาตรฐานของ Mach-Zehnder interferometer มาใช้ โดยเพิ่ม grating เข้ามาเพื่อทำการแยกความยาวคลื่นออกจากกัน เมื่อป้อนอินพุตเข้าไปยังอินพุตพอร์ต สัญญาณที่ได้จะออกยังพาสส์พอร์ต สามารถเปลี่ยนแปลงช่องทางเอาท์พุตได้จากการป้อนอินพุตเข้ายังแอดพอร์ตหรือดรอพพอร์ต ข้อดีคือเป็นอุปกรณ์ขนาดเล็ก สามารถใช้งานเป็นตัวแยกความยาวคลื่น แต่มีข้อเสียที่เกิด Insertion loss ที่สูงที่เป็นผลกระทบจากการทำ grating



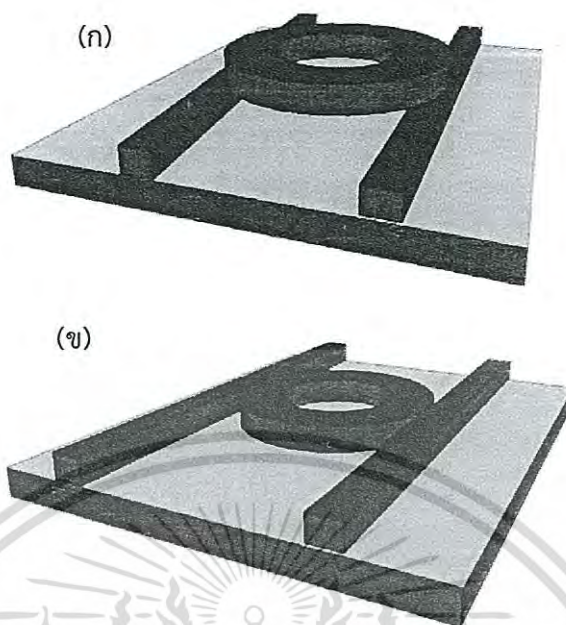
รูปที่ 2.31 ท่อนำคลื่นแสงเซาะร่องแบบ Mach-Zehnder interferometer

2.11.3 วงแหวนสั่นพ้องไมโครแบบคัปปลิงแนวตั้ง (Vertical coupling ring resonator)

มีลักษณะเป็นท่อนำคลื่นแบบตรงตัดสลับกันและใช้วงแหวนสั่นพ้องขนาดเล็กมาก $10\text{--}20\ \mu\text{m}$ ที่ความยาวคลื่นเฉพาะมาคัปปลิงในแนวตั้ง คุณสมบัติมีแบนด์วิดท์ที่ $0.1\text{--}1.0\ \text{nm}$ จะสามารถให้ค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระ $10\text{--}25\ \text{nm}$ จากแบนด์วิดท์ที่ได้ สามารถให้ค่าประสิทธิภาพ Q ที่สูง ($1500\text{--}15,000$) ข้อดีของระบบคือ การคัปปลิงระหว่างท่อนำคลื่นบัสตรงกับวงแหวนสามารถควบคุมค่าความแม่นยำได้ แต่ข้อเสียคือหากในการสร้างเกิดการผิดพลาดจากการคัปปลิงแนวตั้งจะทำให้ท่อนำคลื่นไม่สามารถทำงานอย่างถูกต้อง

2.11.4 วงแหวนสั่นพ้องไมโครแบบคัปปลิงแนวนอน (Horizontal coupling ring resonator)

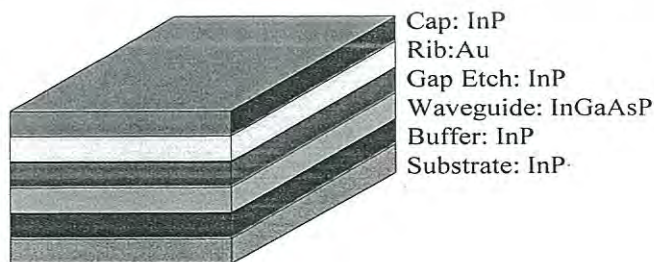
แอดดรอพมัลติเพล็กซ์เซอร์แบบวงแหวนสั่นพ้องวงกลมที่วงแหวนมีความยาวคลื่นเฉพาะมาคัปปลิงในแนวนอนสามารถให้ค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระสูงและให้ค่าประสิทธิภาพ Q ที่สูง การคัปปลิงระหว่างท่อนำคลื่นบัสตรงกับวงแหวนสามารถควบคุมค่าความแม่นยำได้ดีกว่าแบบแนวตั้ง



รูปที่ 2.32 ท่อนำคลื่นแสง OADM waveguide แบบวงแหวนสั้นพ้องไมโครแบบคัปปลิง (ก) แนวตั้ง (ข) แนวนอน

2.12 การประดิษฐ์ท่อนำคลื่น (Optical Waveguide Fabrication)

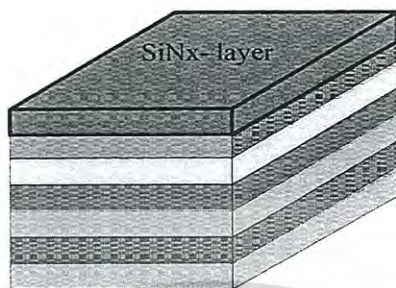
การประดิษฐ์ท่อนำคลื่นแบ่งออกได้เป็นสามส่วนประกอบหลักคือ ส่วนของท่อนำคลื่น ส่วนของการคัปปลิง และส่วนของวงแหวน แต่ละส่วนจะมีการก่อดิสคิไม่เท่ากันเพื่อทำหน้าที่ต่างกัน สำหรับการประดิษฐ์ท่อนำคลื่นจะสร้างจากแผ่นฟิล์มของชั้นสารสำเร็จรูปที่มีชั้นตามที่ต้องการ ขั้นตอนในการประดิษฐ์ท่อนำคลื่นในงานนี้เป็นการจำลองคุณลักษณะการทำหน้าที่เป็นตัวกรองสัญญาณแอดดรอป ประดิษฐ์ขึ้นจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ InGaAsP/InP ชั้นของโครงสร้างประกอบด้วยวัสดุหลัก 3 ส่วน คือส่วนที่ทำหน้าที่เป็นแกนสำหรับเป็นทางเดินแสงคือ GaInAsP ส่วนที่ทำหน้าที่เป็นแคลดดิ้งคือ InP และส่วนทองที่ทำการเคลือบด้านบน ดัชนีหักเหของแกนและแคลดดิ้งคือ 3.14 และ 3.17 ตามลำดับการจัดเรียงชั้นสารของอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 การจัดเรียงชั้นสารอุปกรณ์ท่อนำคลื่นแสงแอดดรอปแบบวงแหวน

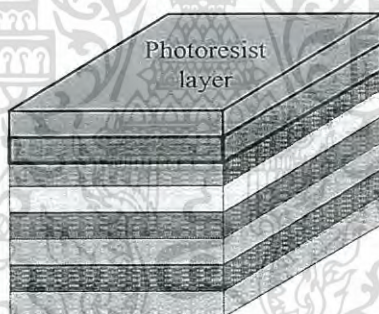
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนแรกคือการปลูกฟิล์ม SiNx โดยวิธี PECVD (Plasma enhanced chemical vapor deposition) ใช้เป็นหน้ากากในการกัดเซาะ (Etching mask) เพื่อทำเป็นท่อนำคลื่น



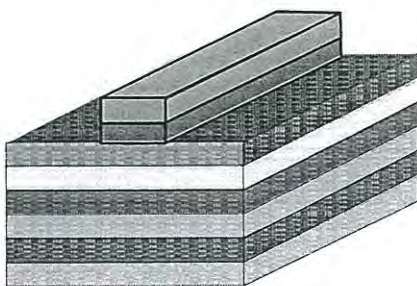
รูปที่ 2.34 การปลูกชั้นสาร SiNx เพื่อทำเป็นหน้ากาก

กระบวนการถัดไปจะเป็นการทำโครงสร้างของชั้น SiNx ซึ่งกระทำโดยใช้วิธีโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) สารกันแสง (Photoresist) ซึ่งเป็นโพลีเมอร์และมีความไวต่อแสงจะใช้ AZ5214 ดังรูปที่ 2.35 หลังจากนั้นจะทำการฉายแสงลงบนสารกันแสงที่ทำหน้ากากไว้ระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งจะทำให้สารกันแสงบริเวณที่โดนแสงจะแข็งตัวและทำการล้างสารกันแสงส่วนที่เหลือด้วยน้ำยา MIF724



รูปที่ 2.35 การปลูกชั้นสารกันแสง

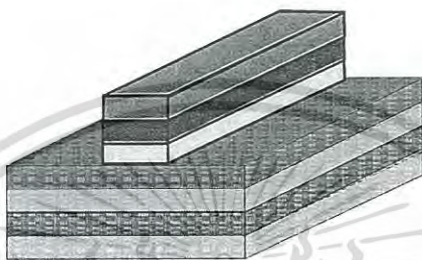
สารกันแสงที่เหลือจากการกัดด้วยน้ำยาก็จะใช้เป็นหน้ากากสำหรับการกัดในขั้นตอนการกัดแห้งด้วยวิธี RIE (Reactive ion etching) วิธีนี้จะใช้แก๊ส CHF_3 และ O_2 ช่วยในการกัด ผลที่ได้จากการกัดแสดงดังรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 การทำโครงสร้างของชั้นสาร SiNx

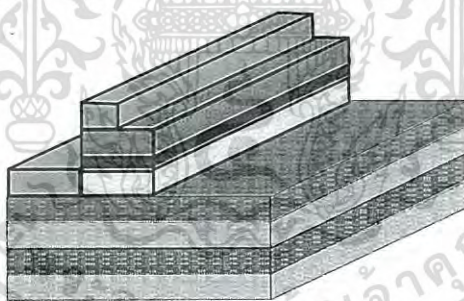
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นก็ทำการล้างสารกันแสงที่เคลือบอยู่ออกไปและโครงสร้างของชั้นสาร SiN_x ที่เหลือก่อนหน้านี้อาจใช้เป็นหน้ากากในขั้นตอนกัดแห้งชั้นสารถัดไปด้วยวิธี RIE ดังรูปที่ 2.37 ในที่นี้แก๊สที่ใช้ในการกัดก็คือ CH_4 , H_2 ในขั้นตอนนี้จะมีการเติมแก๊ส O_2 ลงไปในปริมาณเล็กน้อยก็เพื่อที่จะลดการก่อตัวของโพลีเมอร์ ในระหว่างการกัดแห้งและยังช่วยลดความขรุขระทางผนังด้านข้างของท่อนำคลื่นให้น้อยลง กระบวนการกัดจะควบคุมด้วยเครื่องเอลลิปโซมิเตอร์ (Ellipsometer) และ แมสสเปกโตรสโกปี (Mass spectroscopy) โดยการกัดจะหยุดลงเมื่อถึงชั้นสาร InP ที่อยู่กึ่งกลาง



รูปที่ 2.37 การกัดเซาะเพื่อทำเป็นท่อนำคลื่น

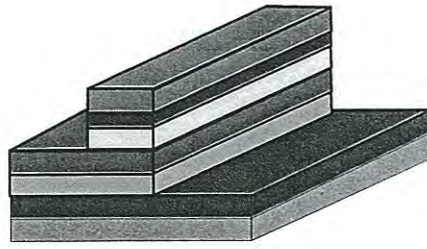
การกัดแห้งในขั้นตอนถัดไปก็คือการแสดงให้เห็นการกัดลึกในส่วนผนังด้านนอกของท่อนำคลื่น บริเวณที่เป็นส่วนโค้ง ชั้นสาร SiN_x จากขั้นตอนก่อนหน้านี้และสารกันแสงจะใช้เป็นหน้ากากในกระบวนการกัดลึกในขั้นตอนนี้ ขั้นตอนการทำแสดงดังรูปที่ 2.38



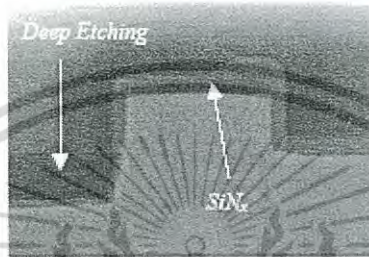
รูปที่ 2.38 การจัดเตรียมท่อนำคลื่นสำหรับกระบวนการกัดลึก

สารกันแสงที่ใช้เคลือบจะปกคลุมเฉพาะส่วนที่เป็นท่อนำคลื่นและชั้นสาร SiN_x จากขั้นตอนก่อนหน้านี้จะใช้เป็นหน้ากากในการกัดเซาะ การจัดเรียงสารกันแสงให้อยู่ในแนวตรงก็เพื่อควบคุมไม่ให้ความกว้างของท่อนำคลื่นเปลี่ยนแปลงขณะทำการกัด การกัดในขั้นตอนนี้จะกระทำด้วยวิธี RIE แต่ไม่ต้องเติมแก๊ส O_2 สารกันแสงจะถูกล้างออกหลังจากการกัดแห้งโดยใช้ออกซิเจนพลาสมา แผนภาพการทำท่อนำคลื่นที่มีการกัดลึกแสดงดังรูปที่ 2.39 และภาพถ่าย SEM ของท่อนำคลื่นในบริเวณที่เป็นส่วนโค้งที่ทำการกัดลึกแสดงดังรูปที่ 2.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.39 ท่อนำคลื่นในบริเวณที่เป็นส่วนโค้งเมื่อทำการกัดลึก



รูปที่ 2.40 ภาพถ่าย SEM ของท่อนำคลื่นที่มีการกัดลึก

ในการปรับปรุงผนังด้านข้างท่อนำคลื่นให้มีความเรียบเพื่อลดผลการสูญเสียเนื่องจากการโค้งงอ จะใช้สายละลาย H_2SO_4 , H_2O_2 และ H_2O เป็นตัวละลาย โครงสร้างสุดท้ายของท่อนำคลื่นแสดงดังรูป



รูปที่ 2.41 โครงสร้างท่อนำคลื่นในบริเวณส่วนโค้ง

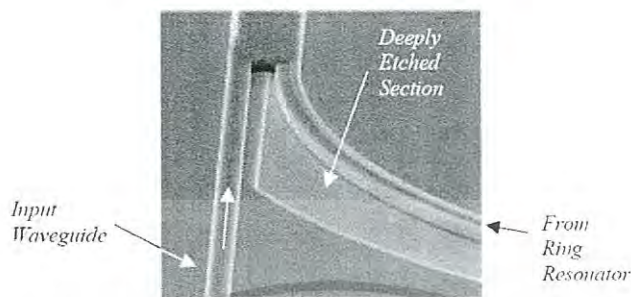
ภาพถ่าย SEM บริเวณด้านหน้าของท่อนำคลื่นที่เป็น อินพุต หรือ เอาท์พุท โดยไม่ต้องผ่าน ขั้นตอนการกัดลึกก่อนที่จะเข้าสู่บริเวณคัปปลิง แสดงดังรูปที่ 2.42



รูปที่ 2.42 ภาพถ่าย SEM ของท่อนำคลื่นที่เป็นทางเข้าของแสงอินพุต

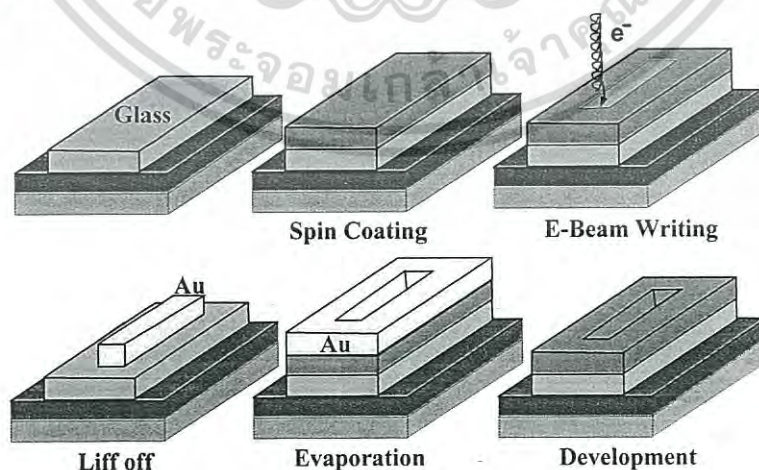
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพถ่าย SEM ของท่อนำคลื่นในบริเวณส่วนโค้งที่มีการกัดลึกเพื่อป้องกันการแผ่ของสัญญาณเข้าไปในวงแหวนก่อนที่จะทำการคับปลิง แสดงดังรูปที่ 2.43



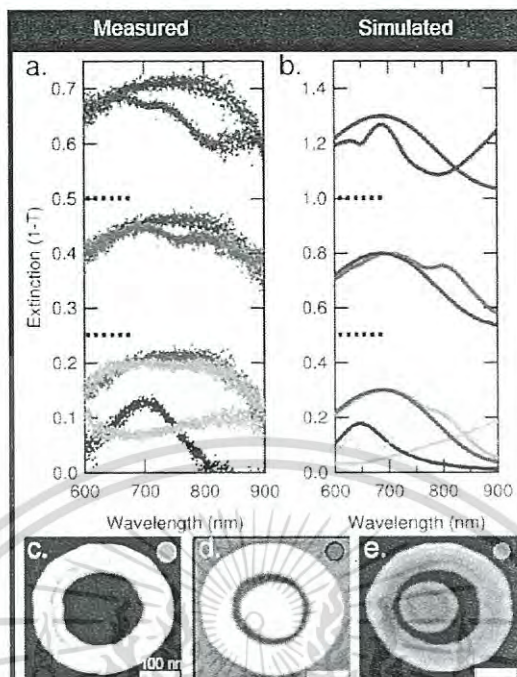
รูปที่ 2.43 ภาพถ่าย SEM ของท่อนำคลื่นบริเวณส่วนโค้งที่มีการกัดลึก

หลังจากได้ท่อนำคลื่นแล้วจึงใช้กระบวนการ Electron beam lithography (EBL) เป็นวิธีการหนึ่งของนาโนลิโทกราฟี คือวิธีการสร้างโครงสร้างระดับนาโน โดยการใช้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เพื่อสร้างแบบแผนเฉพาะของโครงสร้างอย่างละเอียดบนพื้นผิววัตถุตั้งต้น วิธีการนี้ถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมการสร้างแผงวงจรรไฟฟ้าในปัจจุบัน ใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมการปล่อยลำกระสุนอิเล็กตรอนลงสู่พื้นผิวของวัตถุ เป็นพื้นผิวที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบางตามแบบแผนที่ได้ออกแบบไว้ (อาจจะพื้นผิวของพอลิเมอร์) ทำให้เกิดร่องรอยการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวที่ได้เคลือบไว้ จากนั้นก็ทำการระเหยอนุภาคที่ต้องการเพื่อเคลือบและใช้เป็นโครงสร้างนาโน จากนั้นก็นำทั้งส่วนที่ระเหยไปเคลือบและส่วนที่เคลือบด้วยฟิล์มบางออก สุดท้ายก็จะได้โครงสร้างนาโนตามแบบที่ได้กำหนดไว้ การสร้างโครงสร้างนาโนที่เกิดขึ้นนี้จะมีคุณภาพสูง และวิธีการนี้สามารถนำไปใช้ได้กับหลากหลายพื้นผิววัสดุอีกด้วย



รูปที่ 2.44 ขั้นตอนการทำงานตามวิธีการของ EBL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.45 ผลการสร้างท่อนำคลื่นแอดดรอปตามขั้นตอนการทำงานด้วยวิธีการของ EBL

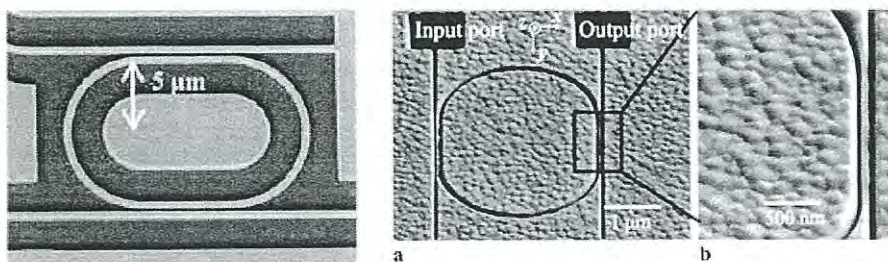
2.13 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในการออกแบบท่อนำคลื่นแสงแบบพลาสมอนิกโพลาไรตอนเชิงผิวนั้น เราเลือกพิจารณาอุปกรณ์ลักษณะแอดดรอปมัลติเพล็กซ์ที่ต้องมีการทำงานแบบพลาสมอนิก โดยมีงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาสองรูปแบบคือ แบบ Plasmonic ring และแบบ Dielectric ring

2.13.1 วงแหวนแบบพลาสมอนิก (Plasmonic ring: PR)

1) วงแหวนพลาสมอนิกแบบเกือกม้า (Racetrack plasmonic ring) [87]

เป็นวงแหวนลักษณะแอดดรอป มีการคัปปลิงด้วยโลหะที่ส่วนกลางวงแหวนตรงกลาง เป็นวงแหวนที่มีระยะในการคัปปลิงที่มากกว่าแบบวงแหวนปกติโดยจะให้ค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพสูงถึง 15000 แสดงดังรูปที่ 2.46

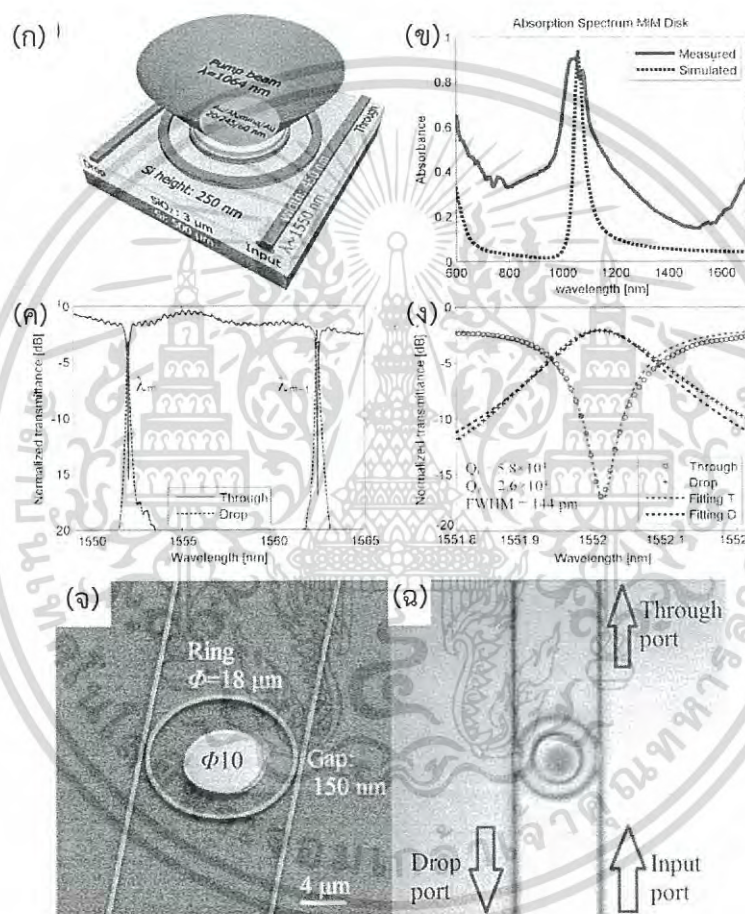


รูปที่ 2.46 วงแหวนแบบวงแหวนพลาสมอนิกเรซแทรค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) วงแหวนพลาสมอนิกแบบกลม (Circular plasmonic ring)

ได้ถูกนำเสนอ [88] เพื่อใช้งานเป็นฟิลเตอร์ในรูปแบบที่ 2.40 ซึ่งสร้างเป็นวงแหวนซิลิกอน (Silicon-microring-based optical add-drop filter) ด้วยการใช้การพิดที่วงแหวนกลางด้วยความร้อน เป็นโครงสร้างลักษณะแบบ metal-insulator-metal (MIM) จากผลการทำงานได้ค่าตอบสนองทางเวลาที่ 13.7 ms และมีการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นที่กรองได้ตามความแรงของสัญญาณที่ป้อนเข้าไปยังท่อนำคลื่นคือ 60pm/mW. แสดงดังรูปที่ 2.47



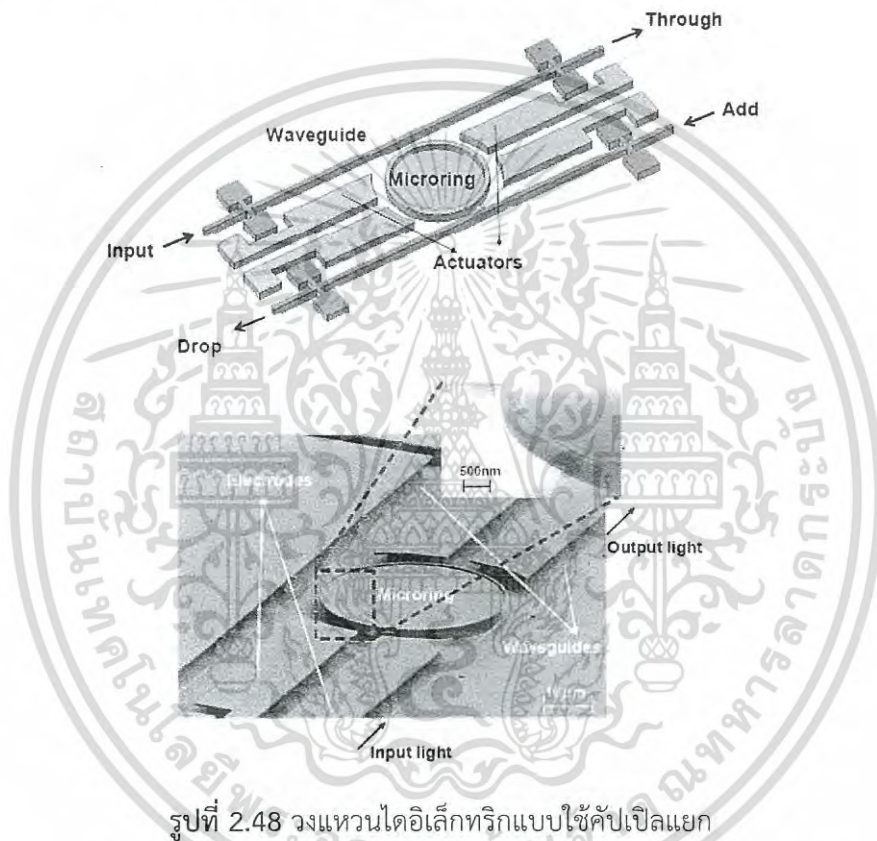
รูปที่ 2.47 (ก) ไดอะแกรมโครงสร้างของวงแหวนพลาสมอนิกแบบกลม (ข) ผลเปรียบเทียบการจำลองและการวัดเมื่อมีรัศมี 10 nm (ค) สเปกตรัมการส่งผ่านสัญญาณที่ทรูพอร์ตและดรอพพอร์ต และ (ง) การวัดผลสเปกตรัมการส่งผ่านสัญญาณที่ทรูพอร์ตและดรอพพอร์ตที่ความยาวคลื่น 1552.0 nm ด้วยโมเดลการแตมป์ (จ) โครงสร้างจริงของวงแหวนพลาสมอนิกแบบกลม และ (ฉ) การป้อนสัญญาณที่พอร์ตต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

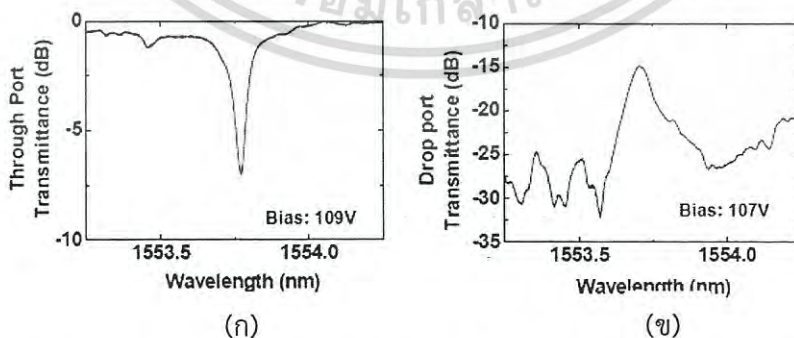
2.10.2 วงแหวนแบบไดอิเล็กทริก (Dielectric ring)

1) วงแหวนไดอิเล็กทริกแบบใช้คัปเปิลแยก (Split coupled dielectric ring)

โครงสร้างของวงแหวนแบบแอคโตรอปไดอิเล็กทริก ใช้โลหะมาสร้างเป็นแอคทูเอเตอร์ (Actuator) ที่ด้านข้างของวงแหวน แสดงในรูปที่ 2.48 แต่ทำการแยกโลหะออกเพื่อให้สัญญาณแสงเกิดการเคลื่อนที่ผ่านระหว่างร่องของคัปเปิลโลหะ ทำงานในโหมดของนาโน ขนาดของวงจรถือคือ $140 \mu\text{m}$ ขั้วอิเล็กโทรดขนาด $40 \mu\text{m}$ วงแหวนเส้นพ้องขนาด $1.15 \mu\text{m}$ ช่องว่างระหว่างท่อนำคลื่นและอิเล็กโทรดคือ $3.85 \mu\text{m}$ ทำงานที่ความยาวคลื่น 1553.75 nm ความถี่ 10 GHz [89]



รูปที่ 2.48 วงแหวนไดอิเล็กทริกแบบใช้คัปเปิลแยก

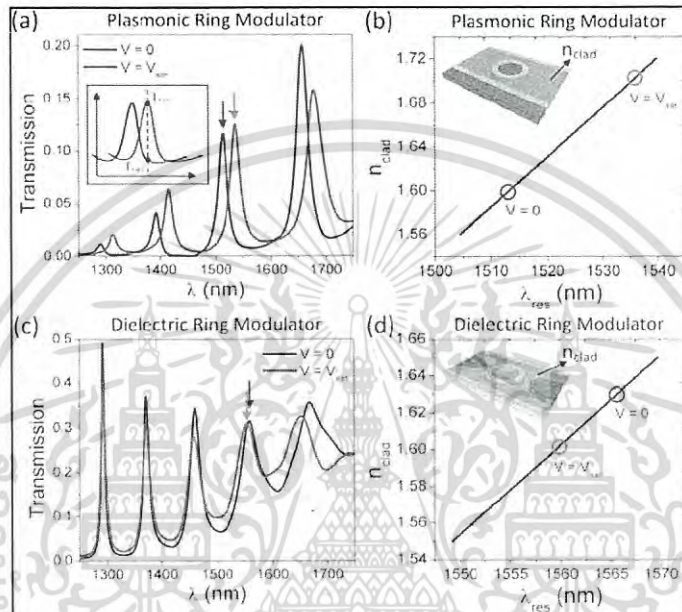


รูปที่ 2.49 การวัดสเปกตรัมการส่งผ่านของวงแหวนไดอิเล็กทริกแบบใช้คัปเปิลแยก (ก) สัญญาณทรูพอร์ต และ (ข) สัญญาณดรอปพอร์ต

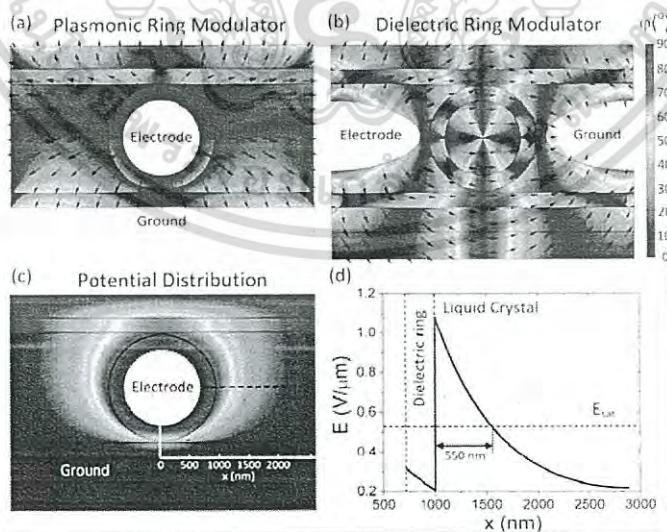
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) วงแหวนไดอิเล็กทริกแบบใช้คัปเปิลวงรี (Elliptic coupled Dielectric ring)

ได้ถูกนำเสนอใน [90] ซึ่งเป็นวงจรกึ่งอิล็กทรอนิกส์-โฟโตนิก ทำงานที่ความยาวคลื่นย่อย ดังรูปที่ 2.50 แสดงโครงสร้างของท่อนำคลื่นสองรูปแบบ โดยจะมีโครงสร้างหลักเป็นแอตดรอปและมีการใช้โลหะ ทำการสร้างเป็นวงจรรันพ้องทางแสง และเป็นขั้วอิล็กโทรดไปในตัวให้ค่าระดับสัญญาณที่มีอูเลตสูงถึง -10.85 dB ขนาดของโครงสร้างมี 720 nm, 280 nm, 290 nm, 40 nm และ 200 nm



รูปที่ 2.50 โครงสร้างของท่อนำคลื่นแบบวงแหวนพลาสมอนิก และวงแหวนไดอิเล็กทริก



รูปที่ 2.51 สเปกตรัมการส่งผ่านของวงแหวนไดอิเล็กทริกแบบใช้คัปเปิลวงรีและโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของโครงสร้างจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Reference	Structure	Wavelength	FWHM	FSR	Response Time	Q factor
[1] Silicon microring resonators with 1.5- μm radius	Ring = 1.5 μm Height =250 nm Width =440 nm Gap =340 nm	1.55 μm	0.17 nm	13nm	NA.	9,000
[2] Experimental demonstration of plasmonic racetrack resonators with a trench structure	Ring= 1.5 μm Width =100 nm Depth= 500nm Gap= 50nm	0.633 μm	NA.	NA.	NA.	15,000
[3] Photothermally tunable silicon-microring-based optical add-drop filter through integrated light absorber	Ring= 18 μm Au/Al ₂ O ₃ /Au =20/245/60 nm, Width =450 nm Height =250 nm.	1.55 μm	0.144nm	10.4nm	13.7 μs	58,000
[4] Tunable MEMS Actuated Microring Resonators (Ag)	Ring = 3 μm Width = 220nm Height =250nm	1.55 μm	0.4nm	11 nm	NA.	80,000
[5] Field-effect active plasmonics for ultracompact electro-optic switching (Ag)	Radius=720nm Height =250 nm Width = 280nm Gap =40 nm	1.513 μm	20nm	100 nm	NA.	75,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบพลาสมอนิกแอตตรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์แบบผสม

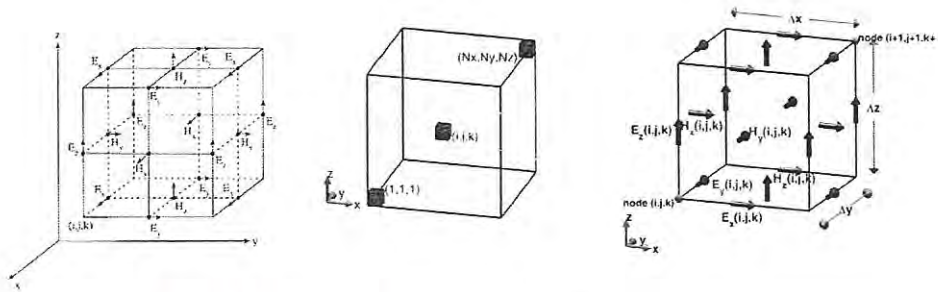
พลาสมอนิกโพลาริตอนเชิงผิวคือคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระตุ้นและแพร่กระจายเคลื่อนไประหว่างผิวของวัสดุสองชนิดคือตัวนำที่เป็นโลหะและวัสดุไดอิเล็กทริก โดยคลื่นผิวสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นผ่านการคับปลิงของสนามผ่านไปยังพลาสมาอิเล็กตรอนของตัวนำนั้น สามารถอธิบายกระบวนการนี้ผ่านสมการคลื่น ซึ่งในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบท่อนำคลื่นแสงด้วยวิธีผลต่างสี่บเนื่องจำกัดในโดเมนเวลา การออกแบบโปรแกรมด้วยวิธีผลต่างสี่บเนื่องจำกัดในโดเมนเวลาด้วยโปรแกรม MATLAB และ optiFDTD และการออกแบบพลาสมอนิกแอตตรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์แบบดั้งเดิมและผสม

3.1 การออกแบบท่อนำคลื่นแสงด้วยวิธีผลต่างสี่บเนื่องจำกัดในโดเมนเวลา (Finite Difference Time Domain: FDTD)

วิธีผลต่างสี่บเนื่องจำกัดในโดเมนเวลา เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่นิยมใช้หาผลเฉลยทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง วิธีผลต่างสี่บเนื่องจำกัดในโดเมนเวลา ถูกเสนอครั้งแรกโดยยี่ (Yee) [91] ในปี ค.ศ 1966 เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ยืดหยุ่นและสะดวกในการแก้ปัญหาเวกเตอร์อนุพันธ์ของสมการแมกซ์-เวลล์โดยทำให้อยู่ในรูปแบบไม่ต่อเนื่องหรือดิสครีต ใช้กริดสนามไฟฟ้า (Electric Field: \vec{E}) และกริดสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field: \vec{H}) เพื่อทำการปรับปรุงสมการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในโดเมนการคำนวณให้อยู่ในเทอมของสนามในโดเมนเวลานิยมนำมาใช้ทั้งในการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและการคำนวณเชิงแสง

3.1.1 แนวความคิดของยี่ (Yee's Method)

แนวความคิดของยี่เป็นแนวความคิดพื้นฐานของวิธีผลต่างสี่บเนื่องจำกัดในโดเมนเวลา ทำการแก้ปัญหาทั้งสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กโดยนำเสนอในโดเมนเวลา และอวกาศว่างโดยใช้สมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equation) แทนที่จะแก้ปัญหาสถาปัตยกรรมไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กเพียงอย่างเดียวด้วยสมการคลื่น ซึ่งเหมือนกับสูตรสมการอินทิกรัลสนามรวมในวิธีโมเมนต์ เมื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของทั้ง \vec{E} และ \vec{H} บนพื้นผิวของโครงสร้างวัสดุ การใช้ข้อมูลของทั้ง \vec{E} และ \vec{H} จะได้ผลเฉลยที่ดีกว่าการใช้สนามชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงอย่างเดียว คุณสมบัติวัสดุทางไฟฟ้าและแม่เหล็กสามารถกำหนดได้โดยทำเป็นแบบจำลองที่มีลักษณะเฉพาะของแต่ละสนามได้ ถ้ามีทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น



รูปที่ 3.1 ตำแหน่งขององค์ประกอบ \vec{E} และ \vec{H} ในเซลล์ของยี่

ส่วนประกอบของสนาม \vec{E} และ \vec{H} ในอวกาศว่างสองมิติ ทุกส่วนประกอบของสนาม \vec{E} จะถูกล้อมรอบด้วยสี่ส่วนประกอบของสนาม \vec{H} และทุกส่วนประกอบของสนาม \vec{H} จะถูกล้อมรอบด้วยสี่องค์ประกอบของสนาม \vec{E} ดังแสดงในรูปที่ 3.28 จะได้รูปร่างง่ายของอวกาศว่างสองมิติ ซึ่งประกอบไปด้วยแถวลำดับที่เชื่อมต่อกันตามกฎคอนทัวร์ของฟาราเดย์และกฎคอนทัวร์ของแอมแปร์ ผลของนิพจน์ผลต่างสี่บเนื่องจำกัดสำหรับอนุพันธ์อวกาศว่างที่ใช้ในตัวดำเนินการเคิร์ลจะเป็นผลต่างสี่บเนื่องจำกัดแบบตรงกลาง ในกรณีที่มีความต่อเนื่องของสนามสัมผัส \vec{E} และ \vec{H} ข้ามรอยต่อของวัสดุที่มีชนิดต่างกัน และรอยต่อขนานกับแกนพิกัดของกริด ผลเฉลยของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ต้องทำการแมตซ์เงื่อนไขขอบเขตสนามที่รอยต่อ โดยเพียงทำการกำหนดสภาพยอมและความซึมซาบได้ของวัสดุที่แต่ละตำแหน่งส่วนประกอบของสนาม ถ้าเป็นตาข่าย (Mesh) ทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากของยี่ มีลักษณะการประมาณพื้นผิวและรูปทรงภายในของโครงสร้างที่สนใจเป็นแบบขั้นบันได กำหนดความละเอียดของอวกาศว่างจากขนาดของหน่วยเซลล์แลตทิซ (Lattice) ด้วยการใช้วิธีผลต่างสี่บเนื่องในสมการแมกซ์เวลล์ ผลที่ได้ตามเวลา \vec{E} และ \vec{H} [91, 92]

3.1.2 เงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืนชั้นแมตซ์สมบูรณ์ (Perfectly Matched Layer: PML)

ข้อจำกัดของการจำลองแบบวิธีผลต่างสี่บเนื่องจำกัดในโดเมนเวลาด้วยคอมพิวเตอร์ คือเมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางไปถึงปลายโดเมนการคำนวณที่ได้จำกัดไว้ในทิศทางแนวแกน x และ y สมการผลต่างสี่บเนื่องจำกัดจะไม่สามารถหาค่าส่วนประกอบสนามที่สัมผัสขอบนอกโดเมนการคำนวณได้ ยังเกิดการสะท้อนกลับที่ขอบของโดเมนการคำนวณ ซึ่งทำให้เกิดค่าผิดพลาดขึ้นในบริเวณโดเมนที่กำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาอยู่ เพื่อที่จะกำจัดหรือทำให้สนามเกิดการสะท้อนกลับให้น้อยลง ดังนั้นจึงใช้เงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืนชั้นแมตช์สมบูรณ์ (Perfectly Matched Layer: PML) [93] เป็นเงื่อนไขที่คำนวณได้จากสมการของแมกซ์เวลล์ ในโดเมนที่ประกอบไปด้วย

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega\epsilon_0\epsilon_r(\omega)\vec{E} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu_0\mu_r(\omega)\vec{H} \quad (3.2)$$

เมื่อ $\epsilon_r(\omega)$ และ $\mu_r(\omega)$ คือค่าความยอมไฟฟ้าและค่าความยอมแม่เหล็กของอากาศว่าง คำนวณทุกๆสนามที่เข้าไปยังชั้นเงื่อนไขขอบเขตใน PML จะถูกดูดกลืน และจะใช้เงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืน (Absorbing Boundary Condition : ABC) วางไว้ที่ปลายโดเมนการคำนวณ เพื่อให้โดเมนการคำนวณเปรียบเสมือนมีขนาดเป็นระยะอนันต์ได้มีการพัฒนาแนวความคิดของ ABC มาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้มีประสิทธิภาพการดูดกลืนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มากที่สุด จนในปัจจุบันได้ใช้ PML ABC ซึ่งเป็น ABC ที่มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากที่สุดแนวความคิดของ PML ABC มาจากสมการแมกซ์เวลล์ ในการพิจารณาที่แบบแผนคลื่น TM ในสองมิติ จะแบ่งส่วนประกอบสนามไฟฟ้าออกเป็นสองส่วนประกอบ ซึ่งทำให้สมการแมกซ์เวลล์กระจายออกมาเป็นสมการผลต่างสี่บเนื่องจำกัดที่ใช้ร่วมกับ PML ABC ได้ทั้งหมด 4 สมการ คือ

$$\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} + \sigma_y^* H_x = -\frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (3.3)$$

$$\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} + \sigma_x^* H_y = \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (3.4)$$

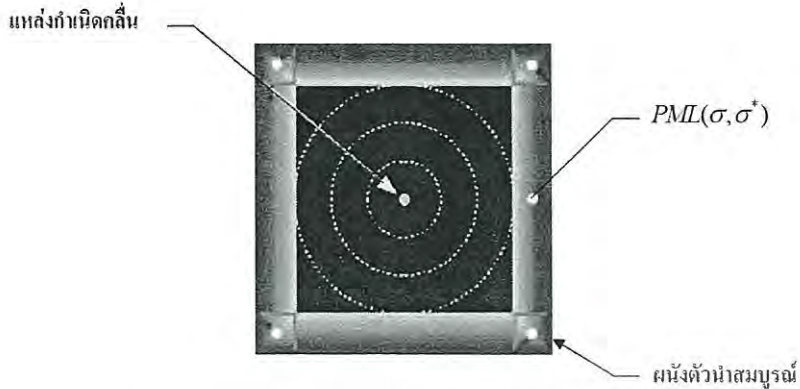
$$\epsilon \frac{\partial E_{zx}}{\partial t} + \sigma_x E_{zx} = \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad (3.5)$$

$$\epsilon \frac{\partial E_{zy}}{\partial t} + \sigma_y E_{zy} = -\frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (3.6)$$

$$\vec{E}_z = E_{zx} + E_{zy} \quad (3.7)$$

เมื่อ σ_x และ σ_y เป็นสภาพนำทางไฟฟ้าในทิศทาง x และ y ตามลำดับ ส่วน σ_x^* และ σ_y^* เป็นสภาพต้านทานทางแม่เหล็กสมมูลในทิศทาง x และ y ตามลำดับ โดยที่แต่ละชั้นของ PML ABC จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขการแมตช์ $\frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma^*}{\mu}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของกริด FDTD สองมิติที่มี PML ABC

จากสมการ (3.3-3.6) จะได้อิมพีแดนซ์ของคลื่นในตัวกลางที่มีความสูญเสียเท่ากับในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย และทำให้ไม่มีการสะท้อนเกิดขึ้นเมื่อคลื่นระนาบแพร่กระจายตั้งฉากข้ามรอยต่อระหว่างสองตัวกลางนี้ ตัวกลางที่มีความสูญเสียนำมาใช้ที่ปลายโดเมนการคำนวณ FDTD โดยที่ประสิทธิภาพการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นของ PML ที่ใช้วิเคราะห์ เพื่อที่จะทำให้เข้าใจแนวคิดของ PML ABC ได้ง่ายขึ้น พิจารณาโครงสร้างกริด FDTD สองมิติ ที่มีโดเมนการคำนวณล้อมรอบด้วย PML ABC ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยมีผนังตัวนำสมบูรณ์อยู่ขอบนอกสุด ที่ขอบด้านซ้ายและขวา แต่ละ PML จะมี σ_x และ σ_x^* ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของสมการ (3.3-3.6) โดยมี $\sigma_y = \sigma_y^* = 0$ เพื่อไม่ให้เกิดการสะท้อนที่ PML กลับเข้ามาในโดเมนการคำนวณ ในทำนองเดียวกัน ที่ขอบด้านล่างและด้านบน แต่ละ PML จะมี σ_y และ σ_y^* เป็นไปตามเงื่อนไขของสมการ (3.3-3.6) โดยมี $\sigma_x = \sigma_x^* = 0$ และที่มุมทั้งสี่ที่มีการซ้อนทับกันของ PML จะมี $\sigma_x, \sigma_x^*, \sigma_y$ และ σ_y^* เป็นไปตามเงื่อนไขของสมการ (3.3-3.6) รูปแบบการแบ่งชั้น PML ควรจะมีการเพิ่มขึ้นของสภาพนำทางไฟฟ้า และสภาพต้านทานทางแม่เหล็กสมมูลอย่างราบเรียบ โดยมีความสัมพันธ์กับความลึกของ PML ในแต่ละชั้น ρ ซึ่งรูปแบบการแบ่ง PML โดยทั่วไปจะมีสภาพนำทางไฟฟ้าอยู่ในเทอมของฟังก์ชันเอกซโพเนนเชียลคือ

$$\sigma(\rho), \sigma_{\max}(\rho/\delta)^m \quad (3.8)$$

เมื่อ δ เป็นความลึกทั้งหมดของ PML, σ เป็นได้ทั้ง σ_x และ σ_y , m เป็นอันดับการเพิ่มขึ้นของ σ และ σ_{\max} เป็นค่าสภาพนำทางไฟฟ้ามากที่สุดซึ่งหาได้จากการกำหนดค่าของตัวร่วมการสะท้อนที่มุมศูนย์ องศา $R(0)$ มีความสัมพันธ์เป็น

$$R(0) = e^{-2\sigma_{\max}\delta/(N+1)\epsilon_0 c} \quad (3.9)$$

เมื่อได้ค่าของสภาพนำไฟฟ้าใน PML แต่ละชั้นแล้ว จะหาค่าของสภาพต้านทานทางแม่เหล็กสมมูลใน PML แต่ละชั้นได้โดยใช้สมการ (3.33) และในการทำขั้นเวลาในบริเวณ PML จะต้องเป็นการทำขั้นเวลาแบบเอกซโพเนนเชียลเพื่อจำลองผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การทำชั้นเวลาแบบเอกซ์โพเนนเชียล

ในบริเวณของ PML ABC จะใช้การทำชั้นเวลาแบบเอกซ์โพเนนเชียล เพื่อให้สนามที่แพร่กระจาย ในบริเวณนี้ถูกกลทอนลงอย่างรวดเร็ว พิจารณาระบบสมการของแมกซ์เวลล์ในตัวกลางนำไฟฟ้า (3.10) ถึง (3.13) ทำการจัดรูปใหม่จะได้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งเป็น

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} + \frac{\sigma_y^*}{\mu} H_x = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} + \frac{\sigma_x^*}{\mu} H_y = \frac{1}{\mu} \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial E_{zx}}{\partial t} + \frac{\sigma_x}{\varepsilon} E_{zx} = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial E_{zy}}{\partial t} + \frac{\sigma_y}{\varepsilon} E_{zy} = -\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (3.13)$$

ทำการแก้สมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งนี้ โดยกำหนดค่าเริ่มต้นให้ที่เวลา $t=0$ ของแต่ละ ส่วนประกอบสนามมีค่าเป็นศูนย์ แล้วทำผลเฉลยที่ได้ให้อยู่ในรูปของสมการผลต่างสลับเนื่องจำกัดซึ่งจะได้ สมการผลต่างสลับเนื่องจำกัดที่มีการทำชั้นเวลาแบบเอกซ์โพเนนเชียล ที่ใช้ในการจำลองผลการทำงานของ อุปกรณ์เชิงแสงเป็น

$$H_x|_{i,j}^{n+1/2} = e^{-\sigma_y^* \Delta t / \mu} H_x|_{i,j}^{n-1/2} + \frac{1 - e^{-\sigma_y^* \Delta t / \mu}}{\sigma_y^*} \cdot \left(\frac{E_z|_{i,j-1/2}^n - E_z|_{i-1/2,j}^n}{\Delta y} \right) \quad (3.14)$$

$$H_y|_{i,j}^{n+1/2} = e^{-\sigma_x^* \Delta t / \mu} H_y|_{i,j}^{n-1/2} + \frac{1 - e^{-\sigma_x^* \Delta t / \mu}}{\sigma_x^*} \cdot \left(\frac{E_x|_{i+1/2,j}^n - E_x|_{i-1/2,j}^n}{\Delta x} \right) \quad (3.15)$$

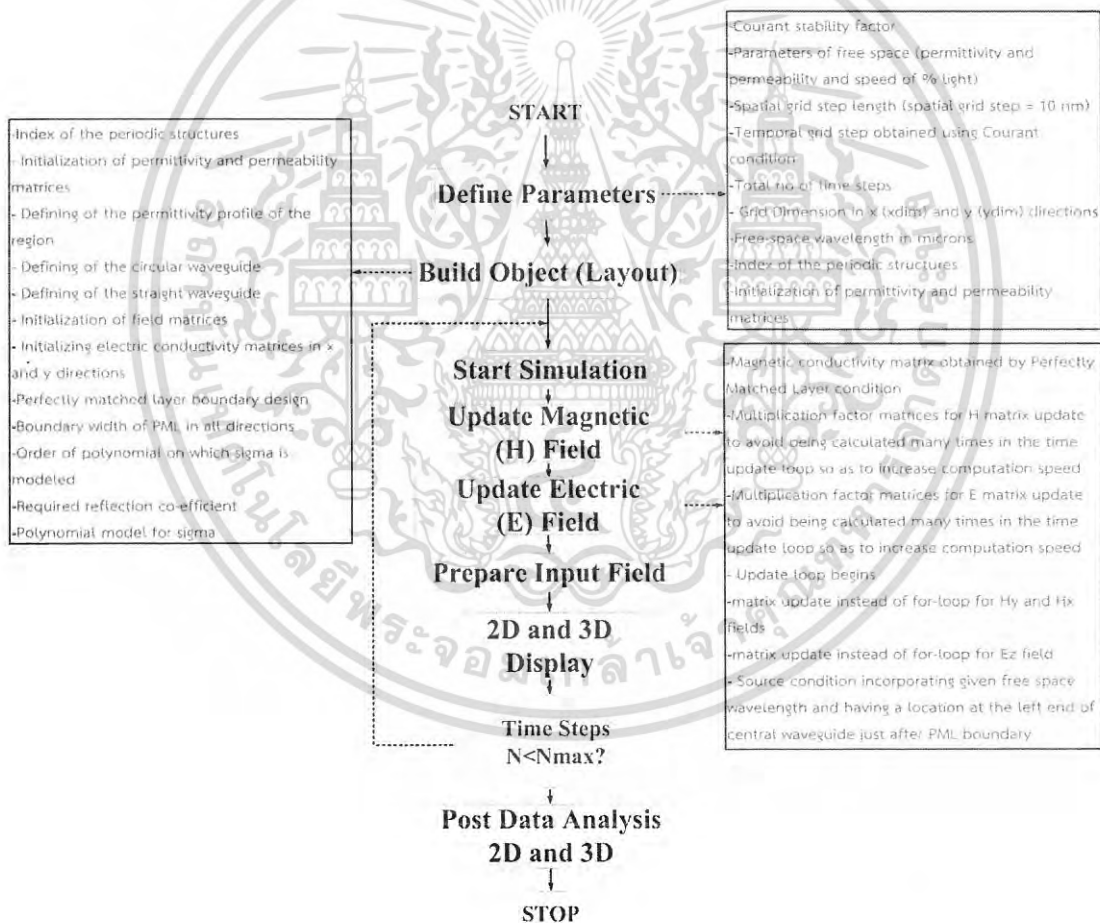
$$E_{zx}|_{i,j}^{n+1} = e^{-\sigma_x \Delta t / \varepsilon} E_{zx}|_{i,j}^n + \frac{1 - e^{-\sigma_x \Delta t / \varepsilon}}{\sigma_x} \cdot \left(\frac{H_y|_{i+1/2,j}^{n+1/2} - H_y|_{i-1/2,j}^{n+1/2}}{\Delta x} \right) \quad (3.16)$$

$$E_{zy}|_{i,j}^{n+1} = e^{-\sigma_y \Delta t / \varepsilon} E_{zy}|_{i,j}^n + \frac{1 - e^{-\sigma_y \Delta t / \varepsilon}}{\sigma_y} \cdot \left(\frac{H_x|_{i,j-1/2}^{n+1/2} - H_x|_{i,j+1/2}^{n+1/2}}{\Delta y} \right) \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

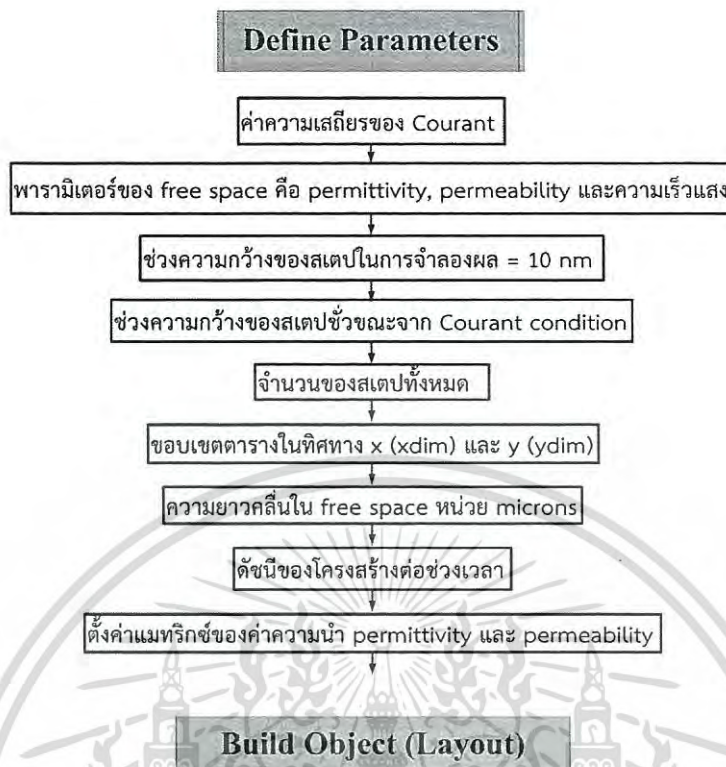
3.2 การออกแบบและจำลองการทำงานของวงจรเชิงแสงพลาสมอนิกโพลาริตอนเชิงผิวด้วยโปรแกรม MATLAB

ในการออกแบบโครงสร้างวงจรเชิงแสงหรือวงแหวนคลื่นพ้องที่ประกอบไปด้วยท่อนำคลื่นแสงแบบตรงได้มีการนำเสนอโดย Taflove และ Hagness [92] ที่ทำการสร้างการจำลองโครงสร้างวงจรเชิงแสงแบบคัปปลิงด้วยวงแหวนคลื่นพ้องเดี่ยว ด้วยการใช้ MATLAB ผ่านการเขียนโค้ด m.file การจำลองผลจะใช้กระบวนการ FDTD ในการพิจารณาผล ได้นำโปรแกรมมาพัฒนาเพื่อการจำลองผลโครงสร้างแบบท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิก รวมถึงโครงสร้างแบบอื่น ซึ่งต้องอาศัยการสร้างโครงสร้างสถาปัตยกรรมใหม่ การสร้างชั้นการดูดกลืนคลื่นการนำไฟฟ้า รวมถึงการแสดงผลในลักษณะ 3 มิติ แสดงในรูปที่ 3.13 โพล์ชาร์ตของโปรแกรม ใช้โครงสร้างลูบในการจำลองผลแบบ FDTD ของยี่



รูปที่ 3.3 โพล์ชาร์ตของ โปรแกรมจำลองผล FDTD ด้วย MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 โฟลว์ชาร์ตของ โปรแกรมย่อยจำลองผลเพื่อรับค่าตัวแปรเริ่มต้น FDTD ด้วย MATLAB

การกำหนดค่าตัวแปรพื้นฐานในการจำลองผลโครงสร้าง MATLAB ด้วยวิธีผลต่างสี่บเนื่องจำกัด ในโดเมนเวลานั้น เริ่มต้นด้วยการกำหนดค่าความเสถียรของโครงสร้างของคูเรนต์ ตั้งค่าตัวแปรของอากาศ-ว่าง ค่าความยอมไฟฟ้า ความนำแม่เหล็ก ความเร็วแสง และกำหนดให้ช่องความกว้างระหว่างสตาปแต่ละ ช่วงคือ 10 nm และจะได้จำนวนสตาปในการจำลอง ทำการกำหนดขอบเขตด้านแกน x และ แกน y ของ โครงสร้างทั้งหมดในการจำลองผล นำค่าทั้งหมดที่ได้เทียบช่วงสตาปของเวลา จะได้แมทริกซ์ของค่าความ ยอมไฟฟ้าและความนำแม่เหล็กเพื่อใช้คำนวณโครงสร้าง



รูปที่ 3.5 โฟลว์ชาร์ตของ โปรแกรมย่อยจำลองผลเพื่อสร้างโครงสร้างท่อนำคลื่นและกำหนดค่าPML ใน FDTD ด้วย MATLAB

จากการกำหนดค่าตัวแปรพื้นฐานในการจำลองผลโครงสร้าง ได้ช่วงสเกลคาบของการจำลองผล จึงเริ่มทำการกำหนดโครงสร้างของอุปกรณ์ โดยโครงสร้างแอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์แบบวงแหวน ต้องทำการกำหนดโครงสร้างวงแหวนและท่อนำคลื่นแบบตรง รวมทั้งชั้นของโลหะ ในแต่ละชั้นจะมีค่าความนำและความยอมไฟฟ้าต่างกัน ในแนวแกน x และ y หลังจากนั้นจึงออกแบบขอบเขตของ PML ที่ได้จากหัวข้อที่ได้นำเสนอก่อนหน้านี้ในโปรแกรมที่จะเกิดการกระจายคลื่นในทุกทิศทาง ผลลัพธ์ที่ได้คือโพลีโนเมียลในอันดับต่างๆจากสัมประสิทธิ์การหักเหในแต่ละช่วง เพื่อนำไปจำลองผลด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดในโดเมนเวลาต่อไป



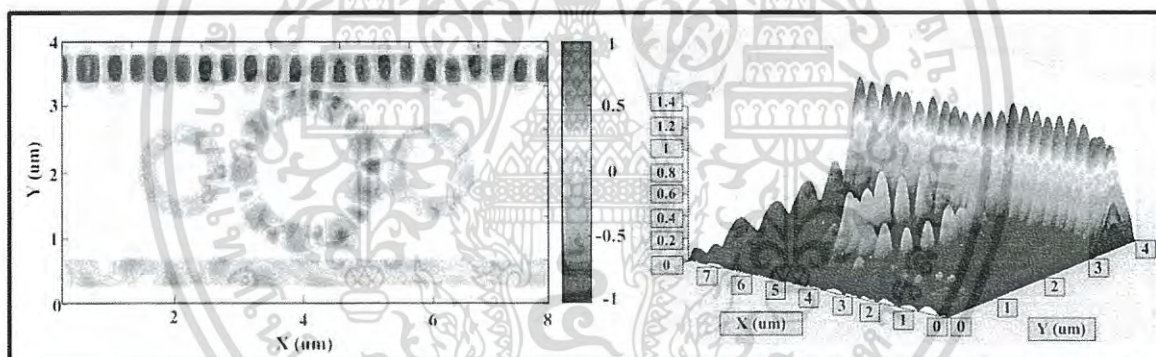
รูปที่ 3.6 โฟลว์ชาร์ตของ โปรแกรมย่อยเพื่อจำลองผลสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กใน FDTD ด้วย MATLAB

การจำลองผลด้วยวิธีผลต่างสี่บเนื่องจำกัดในโดเมนเวลาแสดงขั้นตอนตามโฟลว์ชาร์ตโปรแกรมย่อยเพื่อจำลองผลสนามไฟฟ้าและแม่เหล็ก โดยนำค่าเมทริกซ์ของค่าความนำแม่เหล็กและค่าความยอมไฟฟ้าที่ได้จาก PML จากสมการ (3.14) ถึง (3.17) คูณเข้ากับเมทริกซ์ของแพคเตอร์สนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าและทำการอัปเดตสนามตามสแตปเวลา หลังจากได้โครงสร้างเมทริกซ์สนามทั้งหมดแล้วจึงทำการป้อนอินพุตจากส่วนการสร้างสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณเกาส์เซียน

ในการจำลองผลเริ่มจากการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆที่จำเป็นสำหรับอุปกรณ์ยกตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.7 แสดงจะเดินทางไปในท่อนำคลื่นจากด้านซ้ายไปยังด้านขวาและคัปปลิงเข้าไปยังวงแหวน โปรแกรมได้กำหนดโครงสร้างอุปกรณ์เพื่อสร้างตาข่ายเมชในโดเมน $3 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$ ด้วยความหนาแน่นของโครงสร้างที่ 450 nm ค่าดัชนีหักเหกำหนดไว้ที่ 3.14 สัญญาณอินพุตเป็นคลื่นไซน์ $1.55 \mu\text{m}$ ส่วนสำคัญคือการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืนชั้นแมตซ์สมบรูณ์คือ 30 และปรับให้เหมาะสมกับโหมดของคลื่นส่งผลต่อค่าการกระจายแสง และการจำลองผล FDTD จนกระทั่งค่ากำหนดสุดท้ายของลูป

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของท่อนำคลื่น ในการจำลองใน MATLAB

Waveguide Parameter			
R_{ad}	1 μm	$\alpha(\text{dBmm}^{-1})$	0.1
R_l	0.5 μm	γ	0.01
R_r	0.5 μm	A	0 dBm
K_1	0.5	Courant SF	$S=1/(2^{0.5})$
K_2	0.5	W (um)	0.4
K_3	0.3	d (um)	0.35
K_4	0.3	Time total	10,000
$A_{\text{eff}} (\text{um}^2)$	0.25	Wavelength	1.55
n_0	3.34	L(um)	0.8



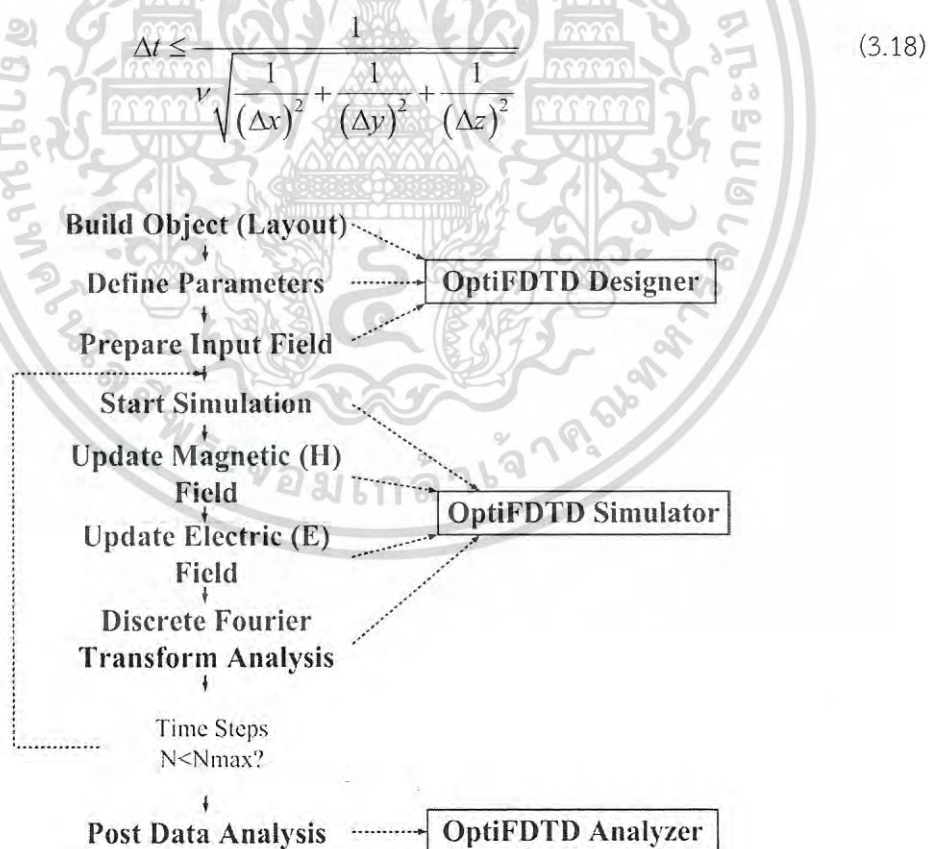
รูปที่ 3.9 ผลที่ได้แบบเรียลไทม์ของการออกแบบโครงสร้างในระนาบ XY ในการจำลองด้วย MATLAB

ดังรูปที่ 3.9 แสดงการจำลองผลแบบเรียลไทม์ของการจำลองผล FDTD ด้วยโปรแกรม MATLAB ที่ได้ทำการออกแบบ โดยแสดงขนาดของโครงสร้างวงแหวน $Rd = 1 \text{ um}$ และ $Rl = Rr = 0.5 \text{ um}$ โครงสร้างท่อตรงยาว 8 um และโหมดของคลื่นที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่น ที่เกิดภายในวงแหวนขนาด มีค่า $m=8$ ผลที่ได้ขนาดสัญญาณที่รูพอร์ต คือ 0.7 W โดยสัญญาณที่เกิดภายในวงแหวน คือ 0.3 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบและจำลองการทำงานของวงจรงเชิงแสงพลาสมอนิกโพลาริตอนเชิงผิวด้วยโปรแกรม optiFDTD

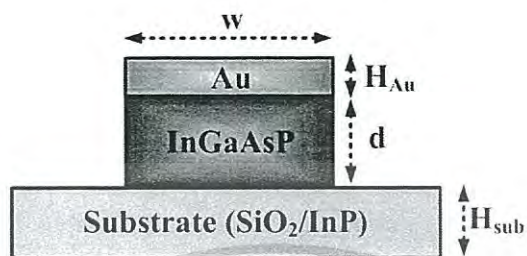
โปรแกรมมาตรฐาน optiFDTD เป็นโปรแกรมการจำลองระบบเชิงแสงที่มีความแม่นยำสูง มีโพลีชาร์ตไดอะแกรม ดังรูปที่ 3.7 จะเริ่มจากการสร้างชั้นโครงสร้างเพื่อจำลองผล กำหนดค่าตัวแปรต่างๆ การเตรียมสัญญาณอินพุตแล้วจึงเริ่มการจำลองผลโปรแกรม ด้วยการสร้างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามโครงสร้างสมการแมกซ์เวลล์ที่ได้จากยี่เซลล์ จากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์ด้วยดิสครีตฟูเรียร์ การจำลองผลจะใช้สเตปทั้งในสเปซและเวลาต้องอาศัยความแม่นยำ การคำนวณค่าการกระจายและความเสถียรของระบบ FDTD พื้นฐานแล้วจะใช้การแบ่งตาข่ายจุดออกเป็น “10 เซลล์ต่อ 1 ความยาวคลื่น” กระบวนการนี้จะเป็รณการคำนวณเชิงปริมาตร ดังนั้นค่าสูงที่สุดของขนาดที่สามารถนำมาใช้คำนวณสเตปตามกฎของคูเรนท์-ฟรีดริชส์-เลวี Courant-Friedrichs-Levy (CFL) สำหรับการจำลองผลแบบ 3D FDTD เงื่อนไขความเสถียรเชิงตัวเลขเป็นเงื่อนไขที่กำหนดให้ผลเฉลยเชิงตัวเลขที่ได้จากการจำลองแบบ FDTD มีค่าลู่เข้าผลเฉลยที่ถูกต้อง



รูปที่ 3.10 แผนผังการทำงานของโปรแกรมจำลองผล optiFDTD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบแอดคอปป์มัลติเพล็กซ์เซอร์ในโปรแกรม optiFDTD ได้ออกแบบตามค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3.2 โดยทำการออกแบบอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.11 ซึ่งแสดงภาคหน้าตัดขวางที่ใช้ในการสร้างพลาสมอนิกโพลาริตอนเชิงผิวในวัสดุ



รูปที่ 3.11 โครงสร้างพารามิเตอร์คุณสมบัติของท่อนำคลื่นในการจำลองผล

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของท่อนำคลื่น

Parameter	Symbol	Typ.	Unit
SiO ₂ /InP substrate	H _{sub}	2	μm
InGaAsP waveguide width	W	400	nm
InGaAsP waveguide height	d	350	nm
TE Propagation losses @1550nm	TE	2.5-4.5	dB/cm
TM Propagation losses @1550nm	TM	2.5-4.5	dB/cm

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของท่อนำคลื่นที่เคลือบด้วยทอง (Au)

Parameter	Symbol	Typ.	Unit
Gold film height	H _{Au}	100	nm
Gold film width	W _{Au}	400	nm
Propagation losses @1550nm	α	0.1	dB/μm
Propagation Length (1/e:damping) @1550nm	L _{sp}	10	μm
Mode effective index @1550nm	N _{eff}	1.237	
Coupling length	L _c	1.2	μm
Pitch		0.355	μm ⁻¹
Insertion losses	αL	3	dB
Bandwidth	BW	55	nm
1dB loss alignment tolerance		±2	μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบพลาสมอนิกแอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์

จากการทดลองได้ทำการศึกษาและออกแบบอุปกรณ์แอดดรอปมัลติเพล็กซ์เซอร์เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกับท่อนำคลื่นแสงที่ได้นำเสนอ ในการทดลองแบ่งออกเป็นสามโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นวงแหวนเช่นกันคือ

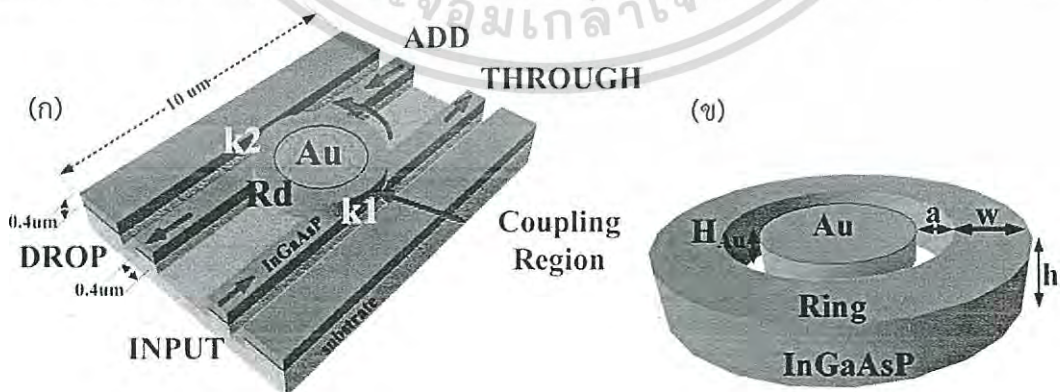
- 1) โครงสร้างวงแหวนสั้นพ้องแบบพลาสมอนิก (Plasmonic Ring resonator : PRR) [89]
- 2) โครงสร้างวงแหวนสั้นพ้องแบบไดอิเล็กทริก (Dielectric Ring resonator : DRR) [90]
- 3) โครงสร้างวงแหวนสั้นพ้องแบบผสม (Hybrid Ring resonator : HRR)

โครงสร้างที่ได้ออกแบบจากการใช้วงแหวนสั้นพ้องแอดดรอปและทำการคัปปลิงวงแหวนกลางด้วยโลหะ สามารถวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆที่เกิดขึ้นได้ กำหนดตัวแปรที่ต้องการศึกษา 7 คุณลักษณะคือ

- ผลกระทบจากโครงสร้างของท่อนำคลื่น
- ผลกระทบจากการคัปปลิง
- ผลกระทบจากความยาวคลื่น
- ผลกระทบจากค่าความนำไฟฟ้า
- ผลกระทบจากการตอบสนองทางเวลา
- ผลกระทบจากชนิดของโลหะ
- ผลกระทบต่อ ค่าพีลีสเปกตรัมอิสระ ค่ากำลังงานสูงสุดครั้งคลื่น และค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพ

3.4.1 โครงสร้างวงแหวนสั้นพ้องแบบพลาสมอนิก

วงแหวนสั้นพ้องแบบพลาสมอนิก คือโครงสร้างที่อาศัยหลักการของพลาสมอนิกที่เกิดขึ้นในโลหะเป็นหลัก โดยอาศัยหลักการคัปปลิงโลหะที่จุดศูนย์กลางของวงแหวนในลักษณะของแผ่นวงกลม ดังรูปที่ 3.12 และค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างและจำลองผลการทำงานแสดงในตารางที่ 3.4

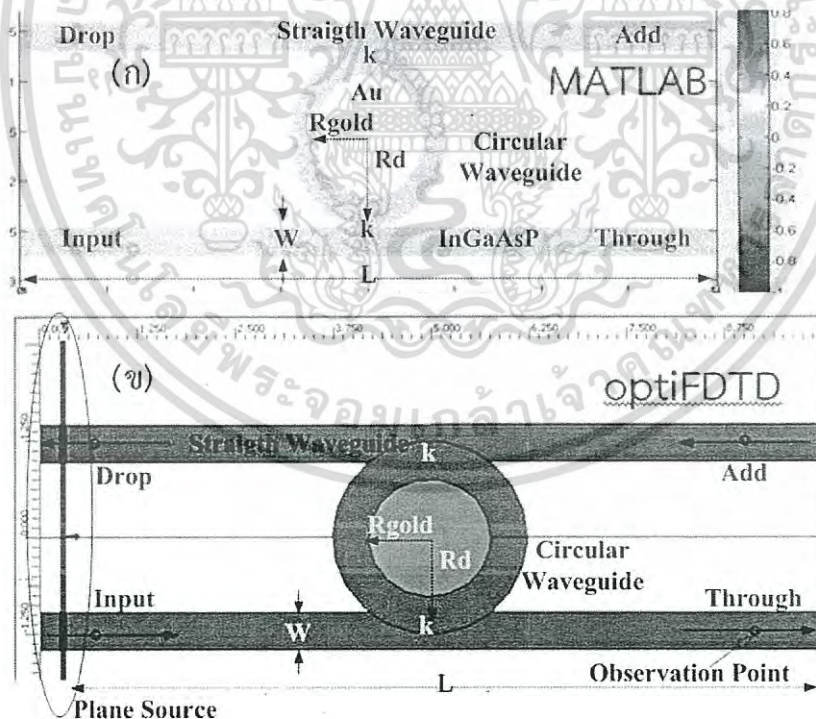


รูปที่ 3.12 โครงสร้างวงแหวนสั้นพ้องแบบพลาสมอนิก (ก) โครงสร้างอุปกรณ์ (ข) การคัปปลิงด้วยโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของโครงสร้างวงแหวนสั่นพ้องแบบพลาสมอนิก

Waveguide Parameter			
R_d	1 μm	$\alpha(\text{dBmm}^{-1})$	0.1
R_{gold}	900 nm	γ	0.01
a	100 nm	A	1 V/m
Metal	Au	h	0.4 μm
K_1	0.5	Courant SF	$S=1/(2^{1/2})$
K_2	0.5	W	0.4 μm
K_3	0.3	d	0.4 μm
K_4	0.3	Time total	10,000
$A_{\text{eff}} (\text{um}^2)$	0.25	Wavelength	1.55
n_0	3.34	L(um)	10 μm
Dielectric Material	InGaAsP/InP	Mode Effective	1.207



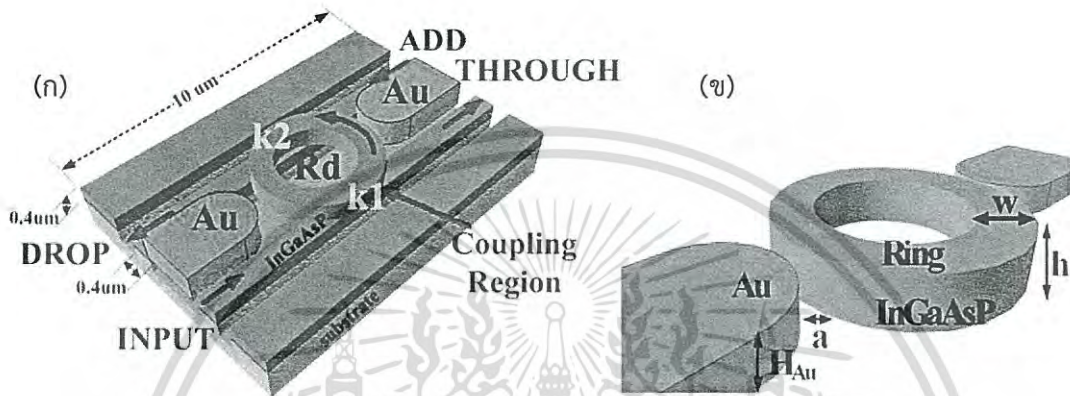
รูปที่ 3.13 โครงสร้างวงแหวนสั่นพ้องแบบพลาสมอนิก (ก) ออกแบบด้วยโปรแกรม MATLAB

(ข) ออกแบบด้วยโปรแกรม optiFDTD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 โครงสร้างวงแหวนสั่นพ้องแบบไดอิเล็กทริก

วงแหวนสั่นพ้องแบบไดอิเล็กทริก คือโครงสร้างที่อาศัยหลักการของพลาสมอนิกที่เกิดขึ้นในไดอิเล็กทริกเป็นหลัก โดยอาศัยหลักการคัปปลิงโลหะที่จุดด้านข้างทั้งสองของศูนย์กลางของวงแหวนในลักษณะของแผ่นพาราโบล่า ดังรูปที่ 3.14 และค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างและจำลองผลการทำงานแสดงในตารางที่ 3.5

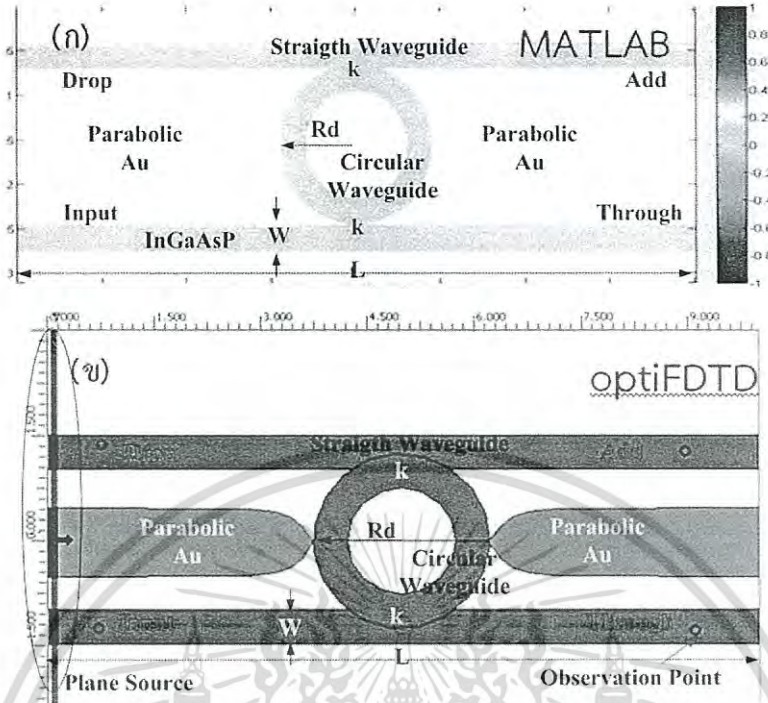


รูปที่ 3.14 โครงสร้างวงแหวนสั่นพ้องแบบไดอิเล็กทริก

ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของโครงสร้างวงแหวนสั่นพ้องแบบไดอิเล็กทริก

Waveguide Parameter			
R_d	1 μm	$\alpha(\text{dBmm}^{-1})$	0.1
Parabola Au	0.6x3.3 μm	γ	0.01
a	10 nm	A	1 V/m
Metal	Au	h	0.4 μm
K_1	0.5	Courant SF	$S=1/(2^{1/2})$
K_2	0.5	W	0.4 μm
K_3	0.3	d	0.4 μm
K_4	0.3	Time total	10,000
$A_{\text{eff}} (\text{um}^2)$	0.25	Wavelength	1.55
n_0	3.34	L(um)	10 μm
Dielectric Material	InGaAsP/InP	Mode Effective	1.207

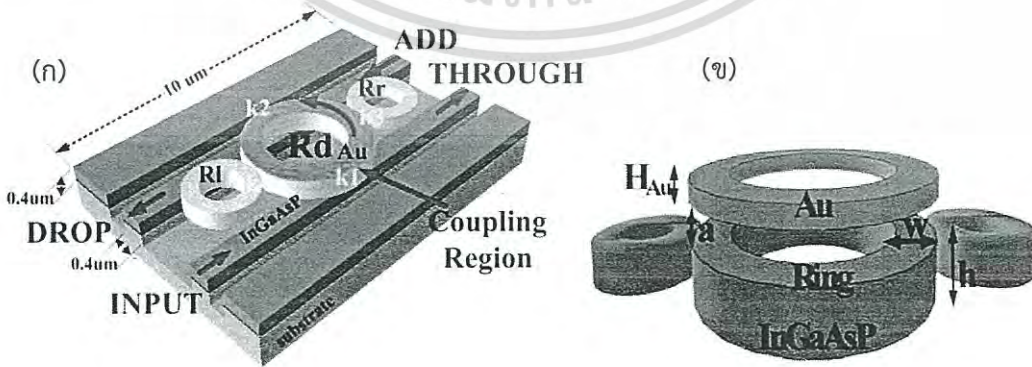
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 โครงสร้างวงแหวนสั่นพ้องแบบไดอิเล็กทริก (ก) ออกแบบด้วยโปรแกรม MATLAB (ข) ออกแบบด้วยโปรแกรม optiFDTD

3.4.3. โครงสร้างวงแหวนสั่นพ้องแบบผสม

วงแหวนสั่นพ้องแบบผสม คือโครงสร้างที่อาศัยหลักการของพลาสมอนิก ที่เกิดขึ้นในโลหะและไดอิเล็กทริกด้วยการผสมข้อดีของทั้งสองแบบ ทำให้เกิดโครงสร้างแบบหลายชั้น โดยอาศัยหลักการคัปปลิงโลหะที่จุดด้านบนของศูนย์กลางของวงแหวนในลักษณะของแผ่นโลหะวงกลม และวงแหวนไดอิเล็กทริก ด้านข้าง ดังรูปที่ 3.16 และค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างและจำลองผลการทำงานแสดงในตารางที่ 3.6

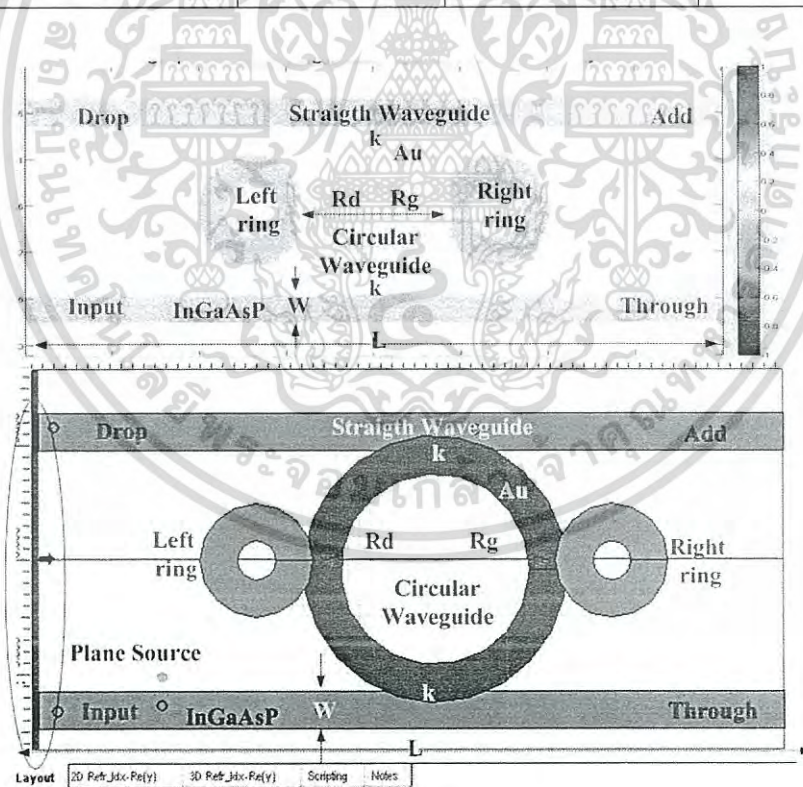


รูปที่ 3.16 โครงสร้างวงแหวนสั่นพ้องแบบผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

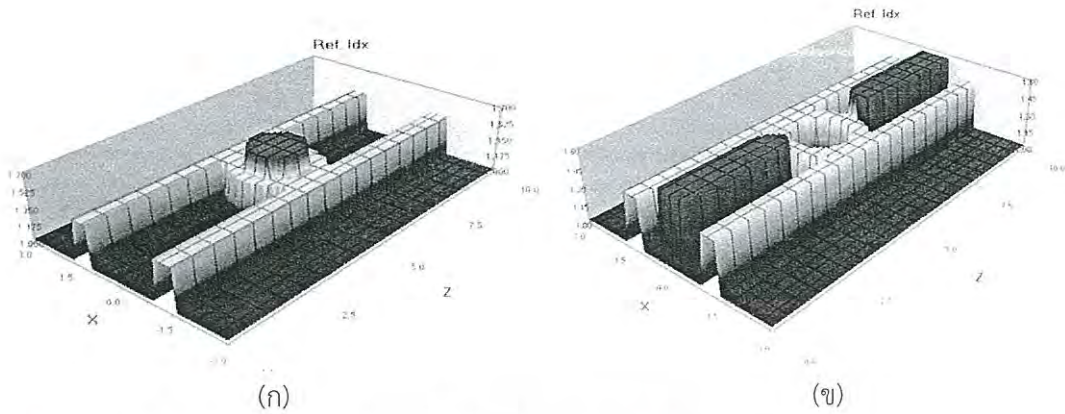
ตารางที่ 3.6 ค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของโครงสร้างวงแหวนสี่ฟองแบบผสม

Waveguide Parameter			
R_d	$1\mu\text{m}$	$\alpha(\text{dBmm}^{-1})$	0.1
$R_l=R_r$	$0.5\mu\text{m}$	γ	0.01
a	100 nm	A	1 V/m
Metal	Au	h	$0.4\mu\text{m}$
K_1	0.5	Courant SF	$S=1/(2^{1/2})$
K_2	0.5	W	$0.4\mu\text{m}$
K_3	0.3	d	$0.4\mu\text{m}$
K_4	0.3	Time total	10,000
$A_{\text{eff}} (\mu\text{m}^2)$	0.25	Wavelength	1.55
n_0	3.34	L(um)	$10\mu\text{m}$
Dielectric Material	InGaAsP/InP	Mode Effective	1.207



รูปที่ 3.17 โครงสร้างวงแหวนสี่ฟองแบบผสม (ก) ออกแบบด้วยโปรแกรม MATLAB (ข) ออกแบบด้วยโปรแกรม optiFDTD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 ค่าดัชนีการหักเหของโครงสร้างในการจำลองผลในโปรแกรม optiFDTD (ก) วงแหวนสั่นพ้องแบบพลาสมอนิก และ (ข) วงแหวนสั่นพ้องแบบไดอิเล็กทริก



รูปที่ 3.19 การออกแบบโครงสร้างเพื่อจำลองผลที่นำคลื่นแสงพลาสมอนิกด้วยโปรแกรม optiFDTD ค่าดัชนีการหักเหของวงแหวนสั่นพ้องพลาสมอนิกแบบผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

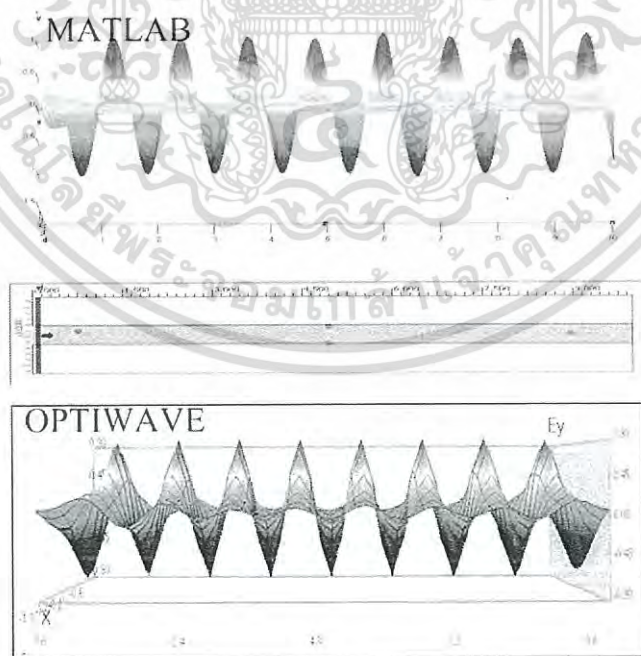
บทที่ 4

ผลจำลองการทำงาน

ในบทนี้นำเสนอผลการจำลองการทำงานของระบบที่ออกแบบด้วยกระบวนการ FDTD วิเคราะห์ผลการสร้างแอตดรอพลาสโมนิกมัลติเพล็กซ์แบบผสมที่ได้ออกแบบ การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานและ ประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบกับแอตดรอพลาสโมนิกมัลติเพล็กซ์แบบอื่นๆ

4.1 การเปรียบเทียบการทำงานของโปรแกรมจำลองโครงสร้างท่อนำคลื่นแสง

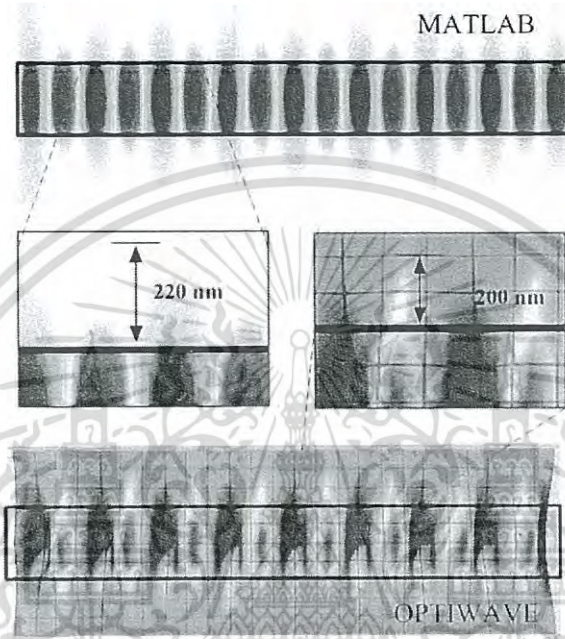
ในการออกแบบโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงหรือวงแหวนสั่นพ้องที่นำไปจำลองประสิทธิภาพการทำงานด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดในโดเมนเวลา ประกอบไปด้วยท่อนำคลื่นแสงแบบตรงและวงแหวนได้มีการนำเสนอโดย Taflove และ Hagness [92] ผ่านการเขียนโปรแกรม m.file ในโปรแกรม MATLAB ซึ่งได้นำโปรแกรมมาพัฒนาเพื่อการจำลองผลโครงสร้างแอตดรอพลาสโมนิกมัลติเพล็กซ์แบบผสม รวมถึงโครงสร้างแบบอื่นๆ ซึ่งต้องอาศัยการสร้าง โครงสร้างสถาปัตยกรรมใหม่ การสร้างชั้นการดูดกลืนคลื่น การนำไฟฟ้า รวมถึงการแสดงผลในลักษณะ 3 มิติ ที่ได้ค่าตัวแปรเพื่อวิเคราะห์และนำไปใช้ในโปรแกรมมาตรฐาน optiFDTD ผลการจำลองการทำงานด้วยท่อนำคลื่นแสงแบบตรงนำเสนอดังรูปที่ 4.1



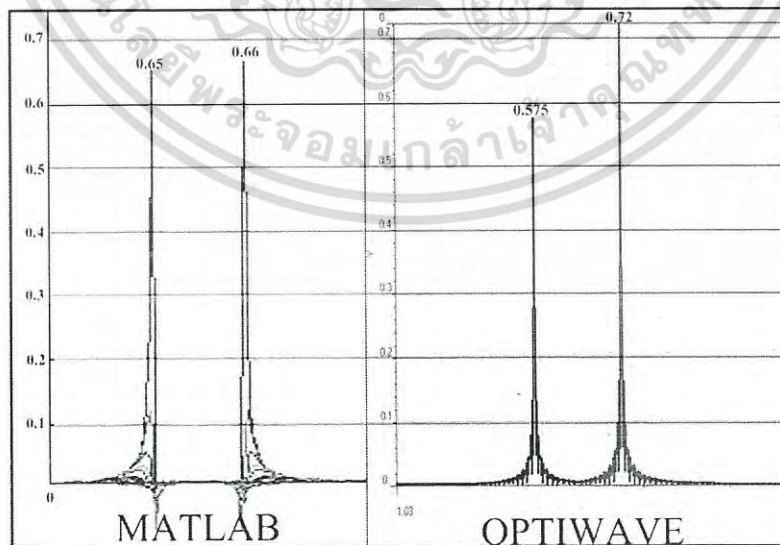
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบการจำลองผลท่อนำคลื่นแบบตรงด้วย MATLAB และ optiFDTD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 เมื่อทำการป้อนอินพุตเกาส์เซียน 1 V/m ไปยังท่อนำคลื่นแสงที่ยาว $10\ \mu\text{m}$ กว้าง $400\ \text{nm}$ สูง $300\ \text{nm}$ พบว่า มีโหมดในท่อนำคลื่น 8 โหมด มีระดับพลังงานที่สูง $0.98\ \text{V/m}$ ในโปรแกรม MATLAB และ $0.9\ \text{V/m}$ ในโปรแกรม optiFDTD ในรูปที่ 4.2 แสดงการกระจายของแสงที่ออกจากท่อนำคลื่นด้วยโปรแกรม MATLAB ให้ค่าการกระจายที่ $220\ \text{nm}$ และโดยโปรแกรม optiFDTD ให้ค่าการกระจายที่น้อยกว่า $220\ \text{nm}$ ขนาดของสัญญาณที่ผิวของท่อนำคลื่นทั้งสองโปรแกรมในรูปที่ 4.3



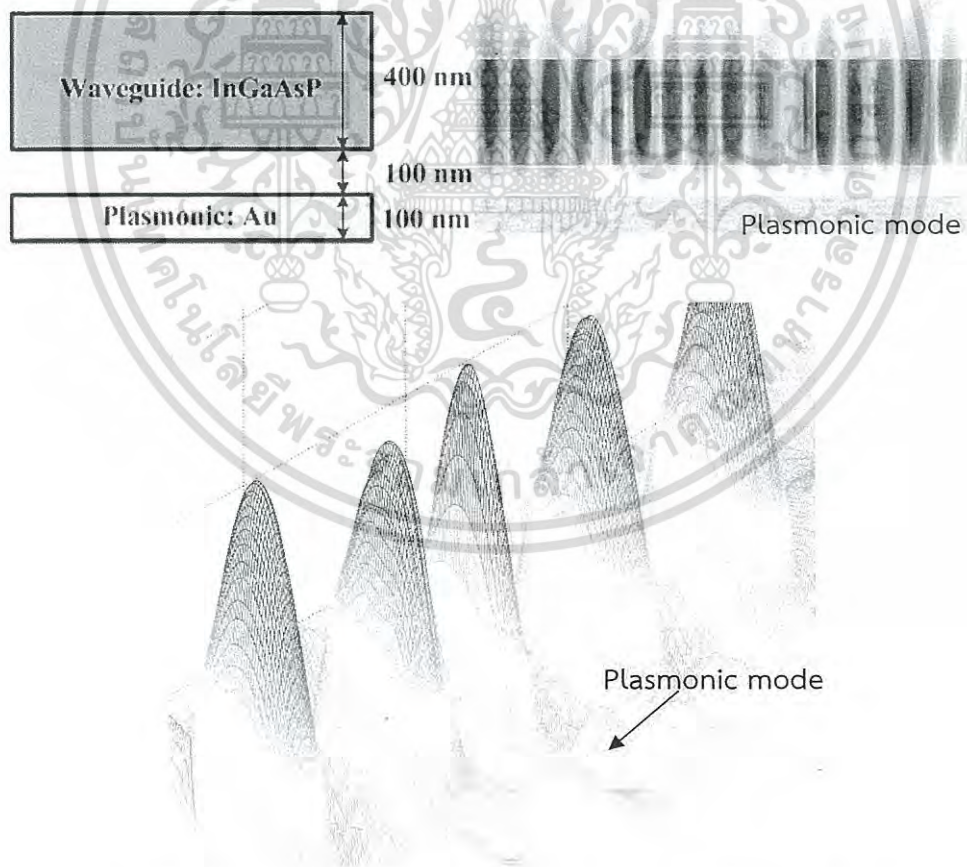
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบการจำลองผลการกระจายของแสงในท่อนำคลื่นแบบตรงด้วยโปรแกรม MATLAB และโปรแกรม optiFDTD



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบการจำลองผลการกระจายของแสงในท่อนำคลื่นแบบตรง

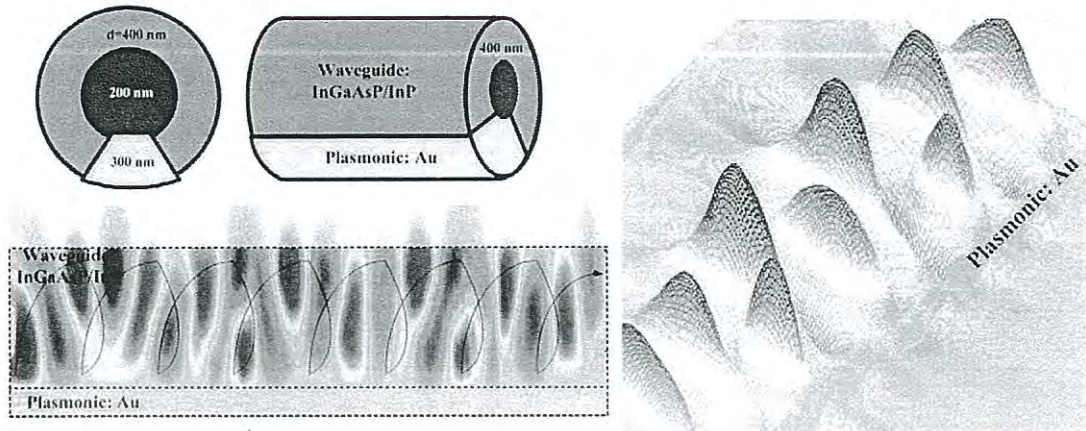
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการพิจารณาความแตกต่างระหว่างสองโปรแกรมในการกระจายดังรูปที่ 4.2 พบว่าคลื่นในท่อนำคลื่นมีโหมดที่เท่ากันในเวลาที่ใช้ในการจำลองผลเดียวกัน อินพุต 1V/m เวลาในการจำลองผล 10,000 รอบ และพบว่าโปรแกรม MATLAB จะมีค่าการกระจายออกจากท่อนำคลื่นที่สูงกว่าโปรแกรม optiFDTD 20 nm ขึ้นอยู่กับค่า PML ของวัสดุที่เราได้กำหนด ในรูปที่ 4.3 ได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB และ optiFDTD เมื่อพิจารณาขนาดของคลื่นที่เคลื่อนที่ที่ผิวของวัสดุ สำหรับโปรแกรม MATLAB ได้ทำการวัดค่าการกระจายที่ผิวของท่อนำคลื่นตรงได้ 0.65 และ 0.66 V/m ตามลำดับ (หน้าตัดในแนวแกน y) และเมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรม optiFDTD ค่าการกระจายที่ผิวของท่อนำคลื่นตรงได้ 0.575 และ 0.72 V/m ตามลำดับ ซึ่งในการวัดที่แตกต่างกันมากของขอบทั้งสองด้านเนื่องจากการวางของ จุดสังเกต (Observation point) ในโปรแกรม optiFDTD พิจารณาความแตกต่างระหว่างทั้งสองโปรแกรมพบว่า ในการจำลองผลมีค่าใกล้เคียงกัน แตกต่างกัน 0.05 V/m คิดเป็น 5% ในรูปที่ 4.4 แสดงผลการจำลองการทำงานในโหมดของพลาสมอนิกเมื่อมีการนำโลหะ (Au) มาคัปปลิงกับท่อนำคลื่นแสงไดอิเล็กทริก (InGaAsP) ช่องว่างมีขนาด 100nm พบว่าด้านที่มีการคัปปลิงด้วยโลหะมีการกระจายที่ต่ำกว่า และมีโหมดของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนภายในโดย

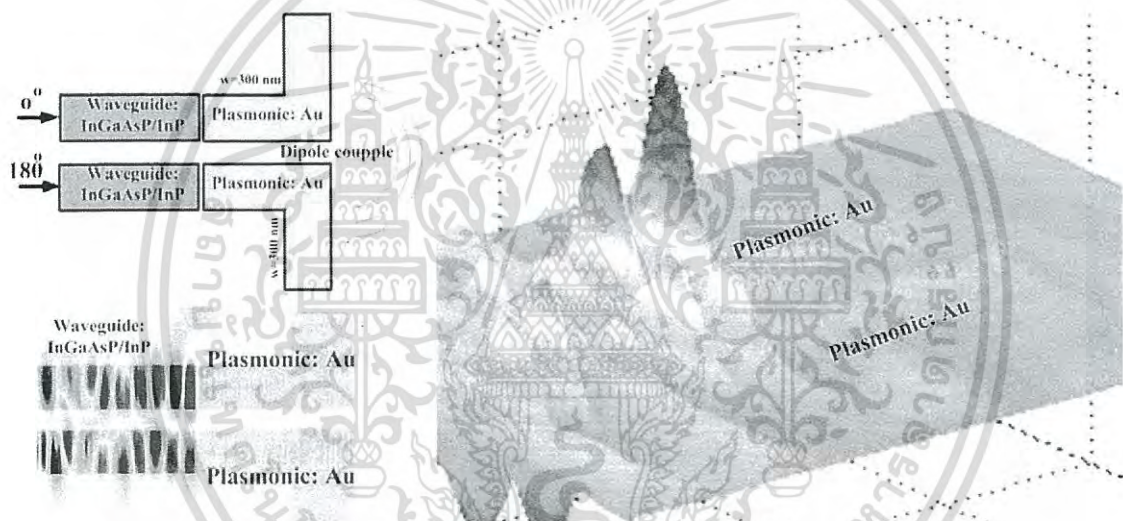


รูปที่ 4.4 การจำลองผลการกระจายของแสงในท่อนำคลื่นแบบพลาสมอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 การจำลองผลการกระจายของแสงในท่อนำคลื่นทรงกลมเขาระ่องแบบพลาสมอนิก



รูปที่ 4.6 การจำลองผลการกระจายของแสงในท่อนำคลื่นสายอากาศขนาดนาโนแบบพลาสมอนิก

ในรูปที่ 4.5 และ 4.6 เป็นการทดสอบโปรแกรมจำลองผลด้วยวิธีการ FDTD โดยใช้ MATLAB โครงสร้างของแสงในท่อนำคลื่นทรงกลมเขาระ่องแบบพลาสมอนิก และท่อนำคลื่นสายอากาศขนาดนาโนแบบพลาสมอนิกตามลำดับ พบว่าโปรแกรมที่ได้ออกแบบสามารถจำลองผลต่างทางเวลาได้ใกล้เคียงกับการทำงานจริงของโปรแกรมมาตรฐานตามรูปที่ 4.2 และ 4.3 ทำให้สามารถออกแบบโครงสร้างผ่านโปรแกรม MATLAB ได้แต่เนื่องจากโปรแกรม MATLAB ไม่สามารถนำโครงสร้างที่ได้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่นเพื่อหาประสิทธิภาพการทำงาน จึงได้ใช้โปรแกรม optiFDTD ที่เป็นมาตรฐานในการจำลองหาประสิทธิภาพจากการหาค่าตัวแปรต่างๆที่เหมาะสมผ่านการใช้ MATLAB

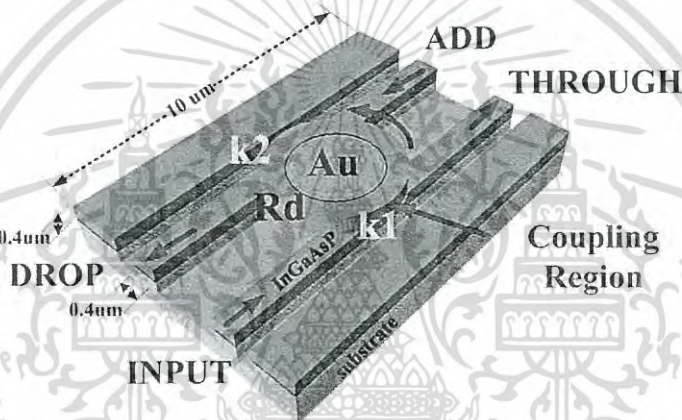
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 โครงสร้างวงแหวนสั่นพ้องพลาสมอนิกที่ใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพ

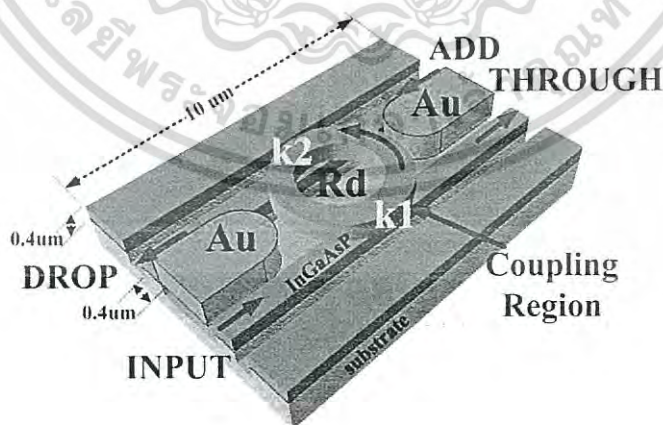
จากการทดลองได้ทำการศึกษาและออกแบบวงแหวนสั่นพ้องเพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับท่อนำคลื่นแสงที่ได้นำเสนอ ในการทดลองแบ่งออกเป็นสามโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นวงแหวนเช่นกัน คือ

- 1) โครงสร้างวงแหวนสั่นพ้องแบบพลาสมอนิก (Plasmonic Ring resonator : PRR) [89]
- 2) โครงสร้างวงแหวนสั่นพ้องแบบไดอิเล็กทริก (Dielectric Ring resonator : DRR) [90]
- 3) โครงสร้างวงแหวนสั่นพ้องแบบผสมผสาน (Hybrid Ring resonator : HRR)

ดังรูปที่ 4.7-4.9 แสดงโครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงที่ได้ทำการออกแบบจากการใช้วงแหวนสั่นพ้องแอดดรอปและนำมาคัปปลิงวงแหวนกลางด้วยทอง ซึ่งสามารถวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆที่เกิดขึ้นได้

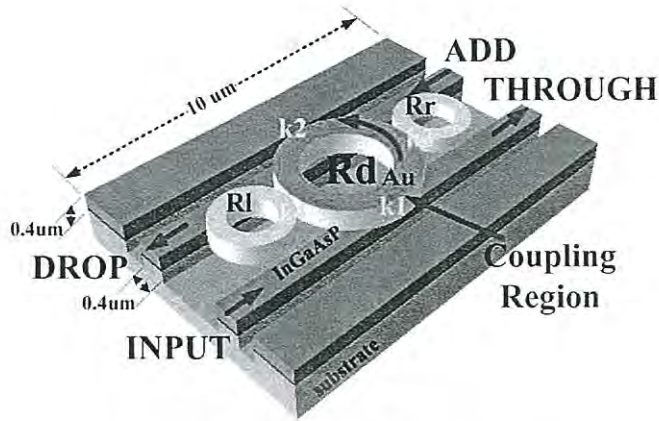


รูปที่ 4.7 โครงสร้างวงแหวนสั่นพ้องแบบพลาสมอนิก



รูปที่ 4.8 โครงสร้างวงแหวนสั่นพ้องแบบไดอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 โครงสร้างวงแหวนสั่นพ้องแบบผสม

4.3 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของท่อนำคลื่นแสง

ผลกระทบที่เกิดจากความยาวคลื่น ขนาดของท่อนำคลื่น วัสดุที่ใช้สร้างรวมถึงค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพได้นำเสนอในส่วนนี้ ซึ่งจะบอกถึงคุณสมบัติของวงแหวนสั่นพ้องพลาสมอนิกแบบผสม ที่ได้ นำเสนอและประสิทธิภาพที่จะนำไปใช้สร้างเป็น OADM โดยวัสดุที่มีดัชนีหักเหของแสงที่สูงเช่น ซิลิกอน และ InGaAsP ได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบท่อนำคลื่นแสงและทำการสร้างชั้นคัปปลิงด้านบนด้วยทอง (Au) สิ่งหนึ่งที่พิจารณาเป็นอย่างมากสำหรับวงแหวนสั่นพ้องพลาสมอนิกคือ ค่าโหมดการกักเก็บที่สูง (high mode confinement) ซึ่งโหมดพลาสมอนิกจะมีค่าลดลงเมื่อเคลื่อนที่ออกห่างจากความถี่สั่นพ้องพลาสมอนิกเชิงผิว ดังนั้นจึงต้องการออกแบบวงแหวนสั่นพ้องให้มีช่วงความยาวคลื่นสั้น มีโหมดขนาดเล็ก มีค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพสูงและรักษาการลดทอนให้ต่ำ การวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆที่เกิดผลกระทบต่อ ประสิทธิภาพของท่อนำคลื่นแสง ดังนี้

- ผลกระทบจากโครงสร้างของท่อนำคลื่น
- ผลกระทบจากความยาวคลื่น
- ผลกระทบจากการตอบสนองทางเวลา
- ผลกระทบจากการคัปปลิงด้วยโลหะ
- ผลกระทบจากค่าความยอมไฟฟ้าของวัสดุคัปปลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

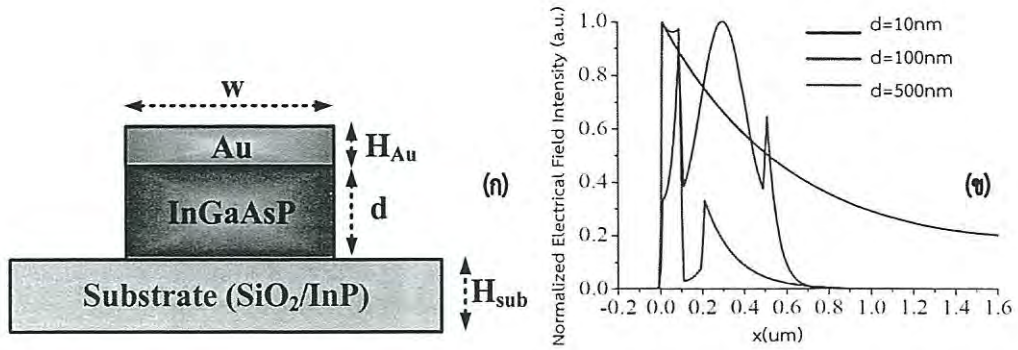
4.3.1 ผลกระทบจากโครงสร้างของท่อนำคลื่น

ผลกระทบเนื่องจากขนาดของโครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงทำให้คุณสมบัติของอุปกรณ์เปลี่ยนไป ดังรูปที่ 4.8 จากการทดลอง ขนาดที่เปลี่ยนไปของความกว้างท่อนำคลื่นแสงและระยะความหนา d ของท่อนำคลื่น เมื่อความกว้าง w มีความกว้างมากขึ้น และความหนา d มีค่าน้อย กำลังงานทั้งหมดจะถูกกักเก็บไว้ภายในแกนกลาง (Core) ซึ่งเห็นได้จากค่าดัชนีประสิทธิภาพโหมดมีค่าสูง (Effective mode index) ในทางกลับกัน ค่า d มีค่ามาก การคัปปลิงระหว่างโหมดพลาสมอนผิว ถูกสนับสนุนการทำงานด้วยคุณสมบัติของการเชื่อมต่อของโลหะกับไดอิเล็กทริก และท่อนำคลื่นแสงไดอิเล็กทริกที่ถูกสนับสนุนด้วยวัสดุฐานจะมีค่าลดลง แสดงให้เห็นค่าดัชนีประสิทธิภาพโหมดมีค่าต่ำลง วงแหวนสั้นพ้องพลาสมอนิกแบบเชื่อมต่อเดี่ยว ดังรูปที่ 4.8 ความหนาของไดอิเล็กทริก d เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงจะได้สัญญาณความหนาแน่นสนามไฟฟ้า สำหรับ $d = 10, 100, 500$ nm เมื่อ d มีค่าน้อย สนามจะตอบสนองต่อท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิก เมื่อความหนา d มีค่าเพิ่มขึ้น สนามไฟฟ้าจะถูกกักเก็บอยู่ในตัวกลางไดอิเล็กทริกที่มีค่าดัชนีการหักเหที่ต่ำ สำหรับค่า d กลางๆ 100 nm กำลังงานจะถูกกักเก็บอยู่ในส่วนกลางระหว่างรอยเชื่อมต่อระหว่างโลหะและไดอิเล็กทริก สำหรับค่า $d = 500$ โหมดจะมีค่ามากขึ้นในตัวกลางท่อนำคลื่นแสง

ตารางที่ 4.1 ลักษณะโครงสร้างมาตรฐานในการจำลองผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

Waveguide Parameter			
R_d	1 μm	$\alpha(\text{dBmm}^{-1})$	0.1
R_1	0.5 μm	γ	0.01
R_2	0.5 μm	A	1 V/m
K_1	0.5	Courant SF	$S=1/(2^{1/2})$
K_2	0.5	W (μm)	0.4
K_3	0.3	d (μm)	0.4
K_4	0.3	Time total	10,000
$A_{\text{eff}} (\mu\text{m}^2)$	0.25	Wavelength	1.55
n_0	3.34	L(μm)	10 μm
Coated	Au	Mode Effective	1.207

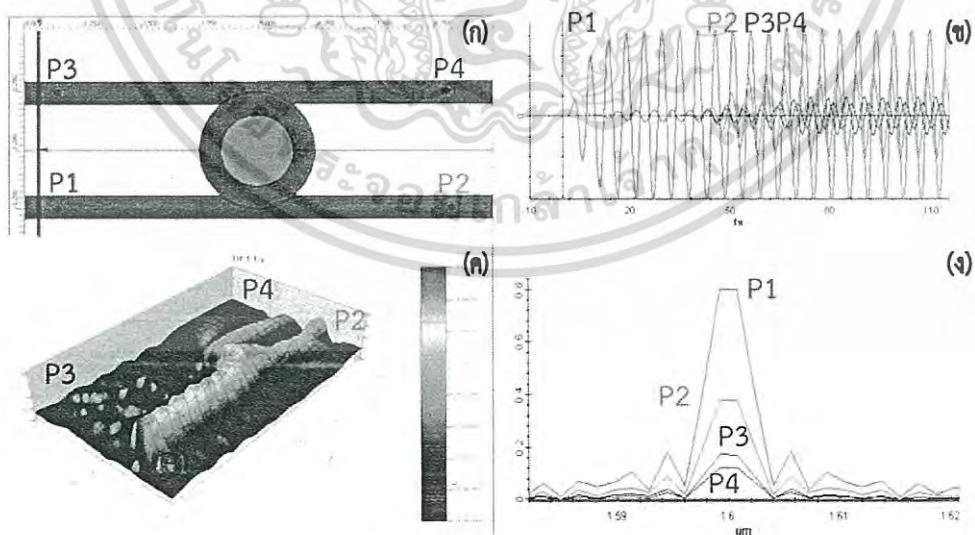
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 (ก) โครงสร้างการเชื่อมต่อระหว่าง โลหะกับไดอิเล็กทริกของท่อนำคลื่นพลาสมอนิก และ (ข) ความหนาแน่นสนามไฟฟ้าเมื่อทำการปรับความหนาของ d

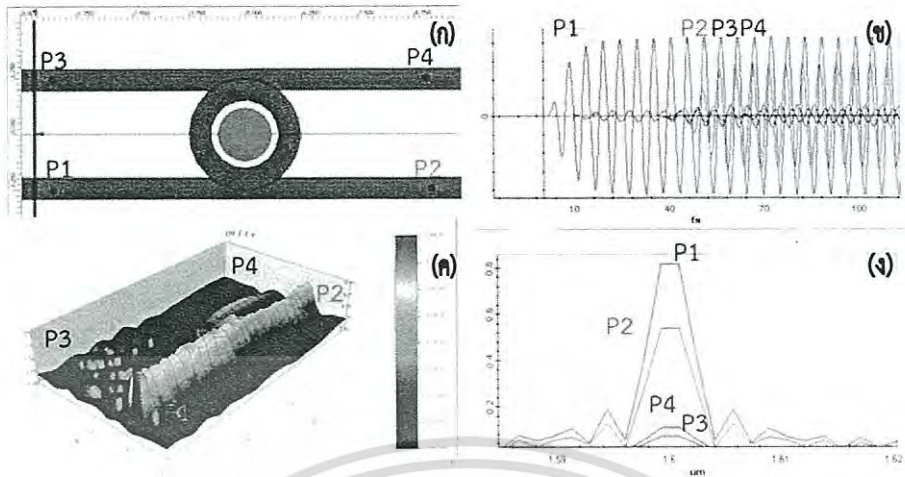
1) ผลกระทบจากโครงสร้างของวงแหวนสั่นพ้องแบบพลาสมอนิก

ในการออกแบบเพื่อหาผลกระทบจากโครงสร้างของวงแหวนสั่นพ้องแบบพลาสมอนิก ได้ทำการคัปปลิงด้วยแผ่นวงกลมทองที่ศูนย์กลางของวงแหวนแอดดรอปแบบมาตรฐาน ในรูปที่ 4.11 แสดงผลของแบบที่ไม่มีช่องว่างระหว่างโลหะ-ไดอิเล็กทริก พบว่าระหว่างวงแหวนสั่นพ้องพลาสมอนิกมาตรฐาน (Plasmonic ring resonator standard: PRRS) มีการคัปปลิงโหมดของคลื่นเข้าสู่วงแหวนมากกว่าแบบวงแหวนสั่นพ้องพลาสมอนิกที่มีช่องว่าง (Plasmonic Ring resonator gap: PRRG) ดังรูปที่ 4.12 ที่ส่งผ่านคลื่นไปยัง ทูร์พอร์ตของแอดดรอปมากกว่า โดยทั้งสองโครงสร้างมีเวลาในการตอบสนองที่ใกล้เคียงกันที่ 50 fs



รูปที่ 4.11 วงแหวนสั่นพ้องพลาสมอนิกแบบมาตรฐาน

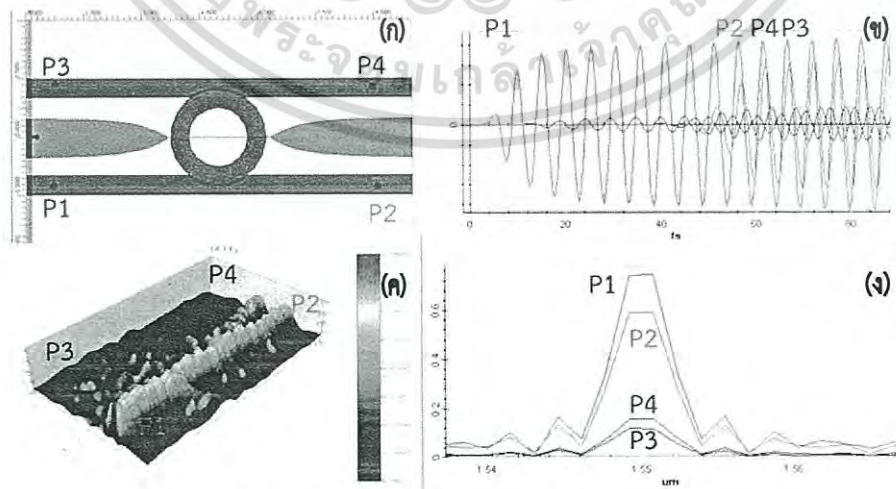
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 วงแหวนสั่นพ้องพลาสมอนิกแบบช่องว่าง ที่มีการปรับวงแหวนศูนย์กลางให้มีขนาดเล็กลง

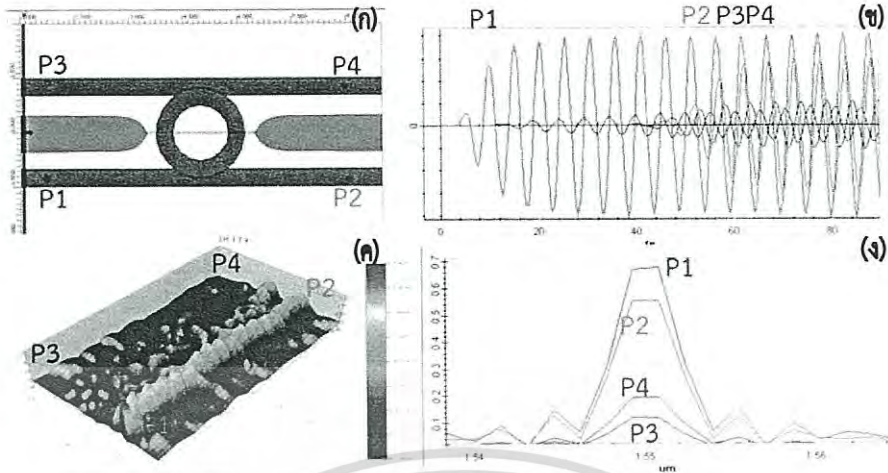
2) ผลกระทบจากโครงสร้างของวงแหวนสั่นพ้องแบบไดอิเล็กทริก

วงแหวนสั่นพ้องแบบไดอิเล็กทริกเป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างการทำงานที่สามารถป้อนพลังงานไฟฟ้า เข้ามาเพื่อเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหของคลื่นภายในท่อนำคลื่นแสงได้ออกแบบโครงสร้างสามรูปแบบ คือ วงแหวนสั่นพ้องแบบไดอิเล็กทริกกรวย (Dielectric ring resonator pinecone : DRRC) ในรูปที่ 4.13 วงแหวนสั่นพ้องแบบไดอิเล็กทริกพาราโบลา (Dielectric Ring resonator parabola (DRRP) ในรูปที่ 4.14 ใช้ทองในการคัปปลิงโหมดคลื่นที่ด้านข้างของวงแหวนแอดรอปแบบมาตรฐาน และทำการปรับระยะของหัวคัปปลิงให้ใกล้มากขึ้นดังรูปที่ 4.15 พบว่าแบบ DRRP มีการคัปปลิงโหมดของคลื่นไปยังทรอปพอร์ตสูงกว่า ทั้งสองโครงสร้างมีเวลาดตอบสนองเท่ากัน ซึ่งแบบ DRRP นั้นเราได้ออกแบบที่ระยะการคัปปลิง $0.2 \mu\text{m}$ จากการทดลองพบว่าหากทำการขยับให้มีช่องว่างความกว้างน้อยความเข้มข้นในการคัปปลิงโหมดของคลื่นจะยิ่งสูงขึ้น

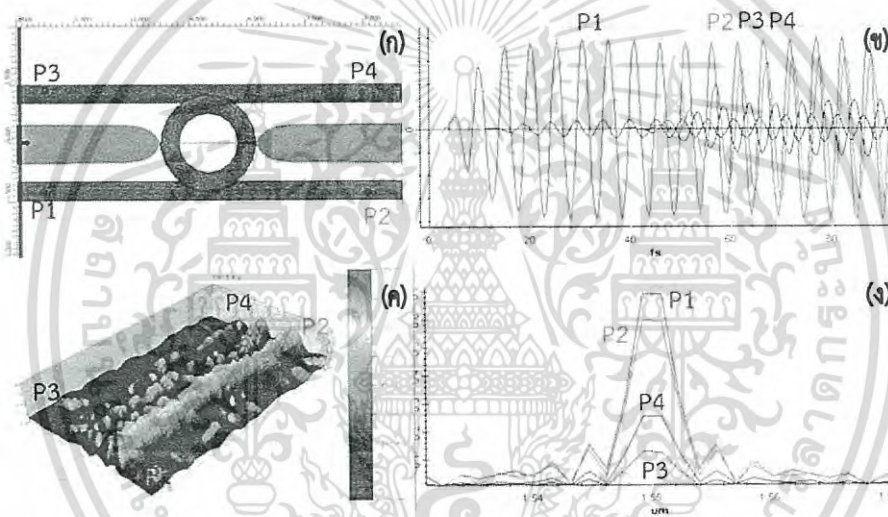


รูปที่ 4.13 วงแหวนสั่นพ้องแบบไดอิเล็กทริกกรวย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 วงแหวนสั่นพ้องแบบไดอิเล็กทริกพาราโบลา ระยะเยกล



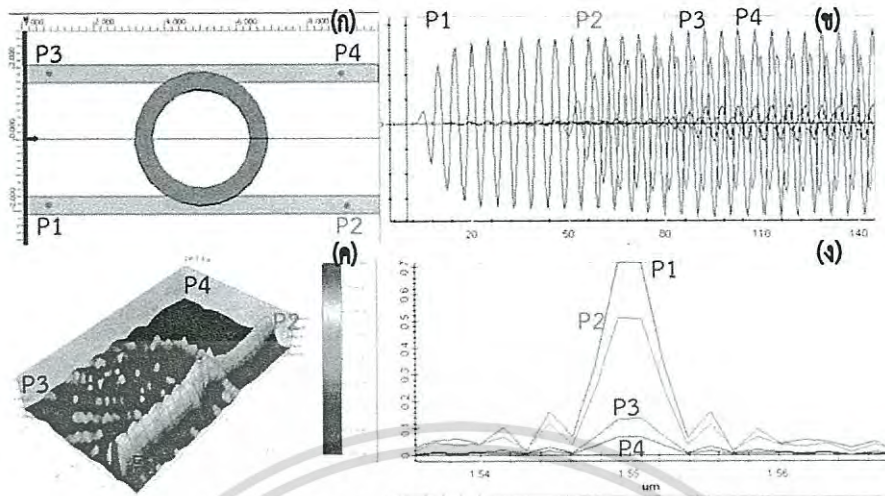
รูปที่ 4.15 วงแหวนสั่นพ้องแบบไดอิเล็กทริกพาราโบลา ระยะเยกล

3) ผลกระทบจากโครงสร้างของวงแหวนสั่นพ้องแบบผสม

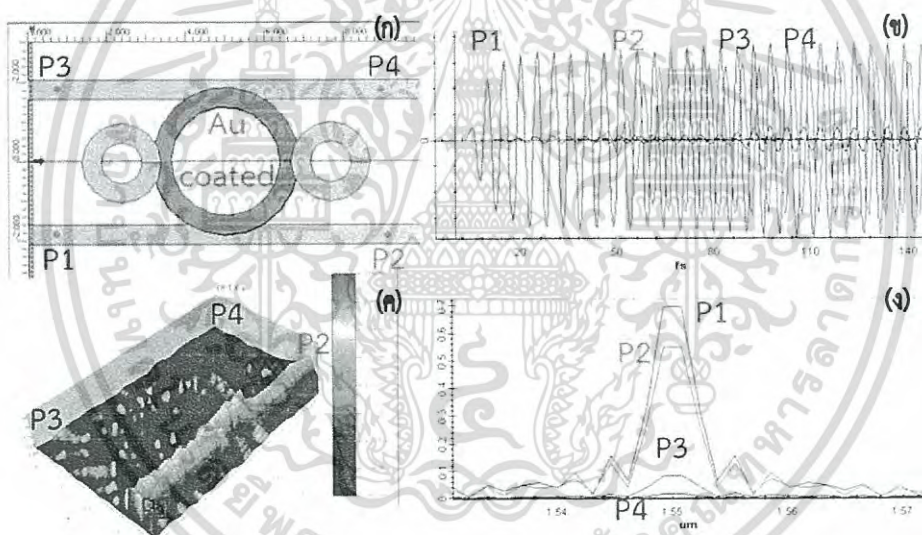
การออกแบบเพื่อหาผลกระทบจากโครงสร้างวงแหวนสั่นพ้องแบบผสมผสานเป็นการรวมเอาเทคนิคของแบบพลาสมอนิกและแบบไดอิเล็กทริกเข้าด้วยกัน โครงสร้างจะอยู่ในรูปแบบคัปปลิงแนวตั้ง แสดงดังรูปที่ 4.16 การออกแบบพัฒนาจากแอตดรอปมาตรฐาน ที่ทำการคัปปลิงทองที่ด้านบนของวงแหวนทำให้เกิดการคัปปลิงโหมดของคลื่นเข้าวงแหวนได้มากกว่าแบบที่ไม่คัปปลิง และสามารถส่งผ่านสัญญาณไปยัง ทูรพอร์ตที่ขนาด 0.5 เท่าของสัญญาณอินพุต

วงแหวนสั่นพ้องที่นำเสนอในรูปที่ 4.17 ได้พัฒนางวงแหวนสั่นพ้องแบบผสมด้วยการคัปปลิงวงแหวนไดอิเล็กทริกด้านข้างทั้งสองข้าง สามารถคัปปลิงโหมดของคลื่นเข้าสู่วงแหวนและมอดูเลทสัญญาณที่วงแหวนข้างทั้งสองให้สามารถปรับความยาวคลื่นทำงานได้ ดังที่ได้นำเสนอใน [35] โดยได้พัฒนาโครงสร้างนี้ให้ทำงานแบบพลาสมอนิกซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

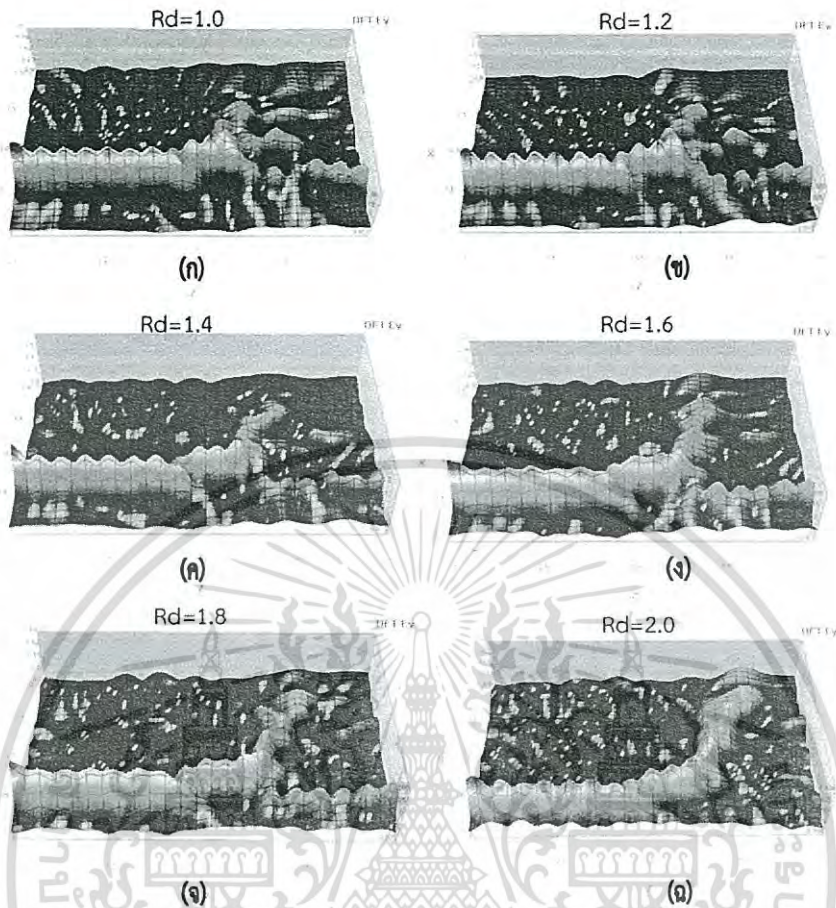


รูปที่ 4.16 ผลกระทบจากโครงสร้างของวงแหวนสั่นพ้องแบบผสมผสานแบบไม่มีวงแหวนด้านข้าง



รูปที่ 4.17 ผลกระทบจากโครงสร้างของวงแหวนสั่นพ้องแบบผสมผสานที่มีวงแหวนด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



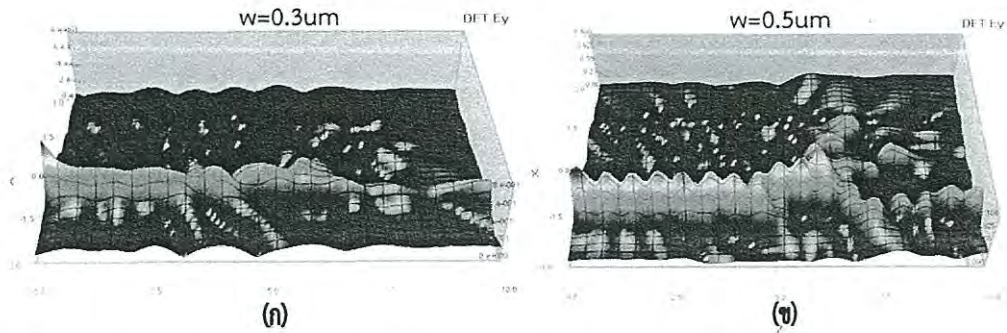
รูปที่ 4.18 การจำลองผล FDTD ของคลื่นในวงแหวนสั้นพ้องแบบผสมด้วยการเปลี่ยนรัศมีของวงแหวน

ในการออกแบบวงแหวนสั้นพ้องแอตดรอปแบบมาตรฐานส่วนที่สำคัญคือ การพิจารณาขนาดความกว้างของวงแหวนที่เหมาะสมกับการใช้งานเนื่องจากเมื่อขนาดของวงแหวนมีขนาดใหญ่ขึ้นตามความยาวคลื่นที่ต้องการ ใช้ที่ลดลง ดังรูปที่ 4.18 พบว่าเมื่อขนาดของวงแหวนมีขนาดเพิ่มมากขึ้นลักษณะของ FDTD ของสัญญาณที่คัปปลิงจะแบ่งได้สองช่วงคือ

- ขนาด $rd <$ ความยาวคลื่นโหมดของคลื่นเกิดการกระจายที่สูงโดยสามารถคัปปลิงสัญญาณไปทั้งทรูพอร์ตและ ดรอพพอร์ต
- ขนาด $rd >$ ความยาวคลื่นโหมดของคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงโดยจะทำการคัปปลิงเข้าในวงแหวนมากขึ้น

ดังแสดงในรูปที่ 4.19 จำลองผลการทำงานของวงแหวนสั้นพ้องเมื่อทำการเปลี่ยนขนาดความกว้างของโครงสร้างที่นำคลื่น โดย $R_d = 1\mu m$ และ $R_i = R_o = 0.5\mu m$ แต่เปลี่ยนความกว้างของท่อนำคลื่น พบว่าขนาดของท่อนำคลื่นที่เหมาะสมจะมีขนาด $1/4$ เท่าของความยาวคลื่น คือ $0.387\mu m$ โดยเลือกใช้ที่ $0.4\mu m$ และสามารถสรุปผลกระทบการทำงานของวงแหวนสั้นพ้องเมื่อทำการเปลี่ยนขนาดของโครงสร้างกับการเปลี่ยนโหมดและการแพร่กระจายของคลื่นได้ดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 การจำลองผล FDTD ของคลื่นในวงแหวนสั้นพ้อง HRR ด้วยการเปลี่ยน ความกว้าง w

ตารางที่ 4.2 ผลกระทบการทำงานของโหมดเมื่อทำการเปลี่ยนขนาดของโครงสร้าง

โครงสร้าง	ผลกระทบเมื่อโครงสร้างมีขนาดเพิ่มมากขึ้น		
	ดัชนีของโหมดยังผล	ระยะการแพร่กระจายคลื่น	ขนาดของโหมด
ความกว้างท่อนำคลื่น (w)	เพิ่มขึ้น	ลดลง	ลดลง
ความสูงของท่อนำคลื่น (d)	เพิ่มขึ้น	ลดลง	ลดลง
ช่องว่างระหว่างโลหะ-ไดอิเล็กทริก (g)	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลกระทบการทำงานของโหมดเมื่อทำการเปลี่ยนขนาดของโครงสร้างเมื่อเพิ่มขนาดความกว้างท่อนำคลื่น (w) ดัชนีของโหมดยังผลมีค่าเพิ่มขึ้น ขนาดของโหมดมีค่าลดลง และระยะการแพร่กระจายคลื่นลดลง มีลักษณะเดียวกันกับความสูงของท่อนำคลื่น โดยช่องว่างระหว่างโลหะ-ไดอิเล็กทริกเมื่อมีค่าสูงขึ้น ดัชนีของโหมดยังผลลดลง ระยะการแพร่กระจายคลื่น และขนาดของโหมดมีค่าเพิ่มขึ้น

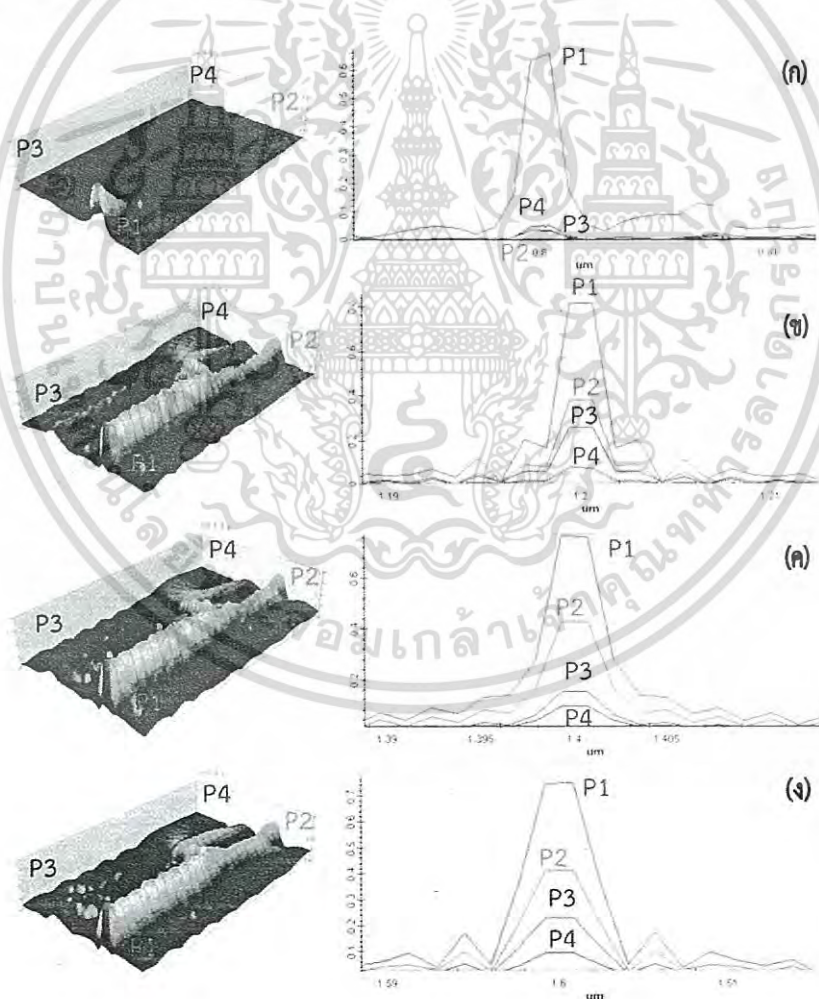
4.3.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนความยาวคลื่น

ในการออกแบบวงแหวนสั้นพ้องค่าความยาวคลื่น เป็นตัวแปรที่เราต้องนำมาพิจารณาเป็นอันดับแรกเพื่อใช้ในการเลือกการตอบสนองของโครงสร้างให้มีขนาดที่มีความเหมาะสม รวมถึงสามารถทำงานได้ที่ความถี่ที่ต้องการ เพื่อให้ได้ความจุของระบบที่สูง และแบนด์วิดสูง ในงานนี้ได้ออกแบบโดยเลือกความยาวคลื่นกลางที่ $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ในการออกแบบโครงสร้าง ซึ่งผลของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของความยาวคลื่นจาก FDTD จะเห็นได้ว่าระบบที่ต้องการแบบไม่เป็นเชิงเส้นนั้นต้องมีสถานะเป็นกลางและใช้การสลับที่ค่าความยาวคลื่นใกล้เคียงกับความยาวคลื่นกลาง เพื่อควบคุมการตอบสนองการทำงานของวงแหวนสั้นพ้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

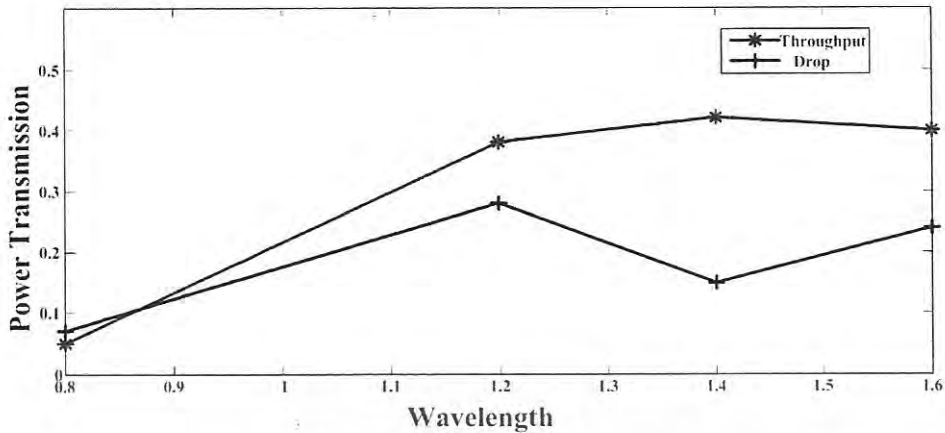
1) ผลกระทบจากการเปลี่ยนความยาวคลื่นต่อวงแหวนสั่นพ้องพลาสมอนิก

การทำงานของ PRR มีลักษณะการตอบสนองกับขนาดวงกลมของโลหะที่คัปปลิงที่จุดศูนย์กลางของวงแหวนว่ามีช่องขนาดความกว้างระหว่างโลหะ-ไดอิเล็กทริก ดังที่ได้อธิบายในการเปลี่ยนแปลงขนาดของโครงสร้าง ส่งผลกระทบโดยตรงกับความยาวคลื่นที่ตอบสนองต่อวงแหวนสั่นพ้องที่ได้ออกแบบในรูปที่ 4.20 แสดงผลการทำงานของวงแหวนสั่นพ้องพลาสมอนิก เมื่อขนาดของโครงสร้างคือ $R_d = 1\mu\text{m}$ และ $R_{\text{coupling}} = 0.9\mu\text{m}$ พบว่าเมื่อความยาวคลื่นมีค่าสูงขึ้นเกิดผลกระทบต่อโหมดคลื่นที่คัปปลิงเข้ายังวงแหวน ในรูปที่ 4.20 (ก) ที่ความยาวคลื่นน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ทำให้มีกำลังงานที่สามารถป้อนเข้ามายังระบบได้น้อยและเมื่อความยาวมีค่าสูงขึ้นสามารถตอบสนองได้ดังรูปที่ 4.20 (ข)-(ง) สามารถสรุปเป็นกราฟการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณที่ทรูพอร์ตและดรอพพอร์ต รูปที่ 4.21 และการตอบสนองของโครงสร้างวงแหวนสั่นพ้องพลาสมอนิกต่อการเปลี่ยนความยาวคลื่นเมื่อเกิดการสั่นพ้องในวงแหวนในรูปที่ 4.22

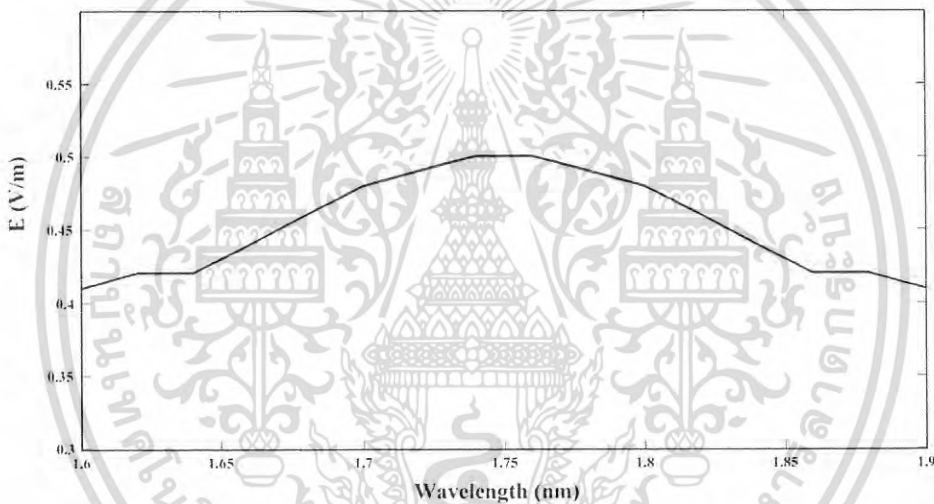


รูปที่ 4.20 ผลกระทบจากการเปลี่ยนความยาวคลื่นต่อวงแหวนสั่นพ้องพลาสมอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ผลกระทบจากการเปลี่ยนความยาวคลื่นต่อวงแหวนสั่นพ้องพลาสมอนิกระหว่างสัญญาณที่ทรูพอร์ตและดรอพพอร์ต

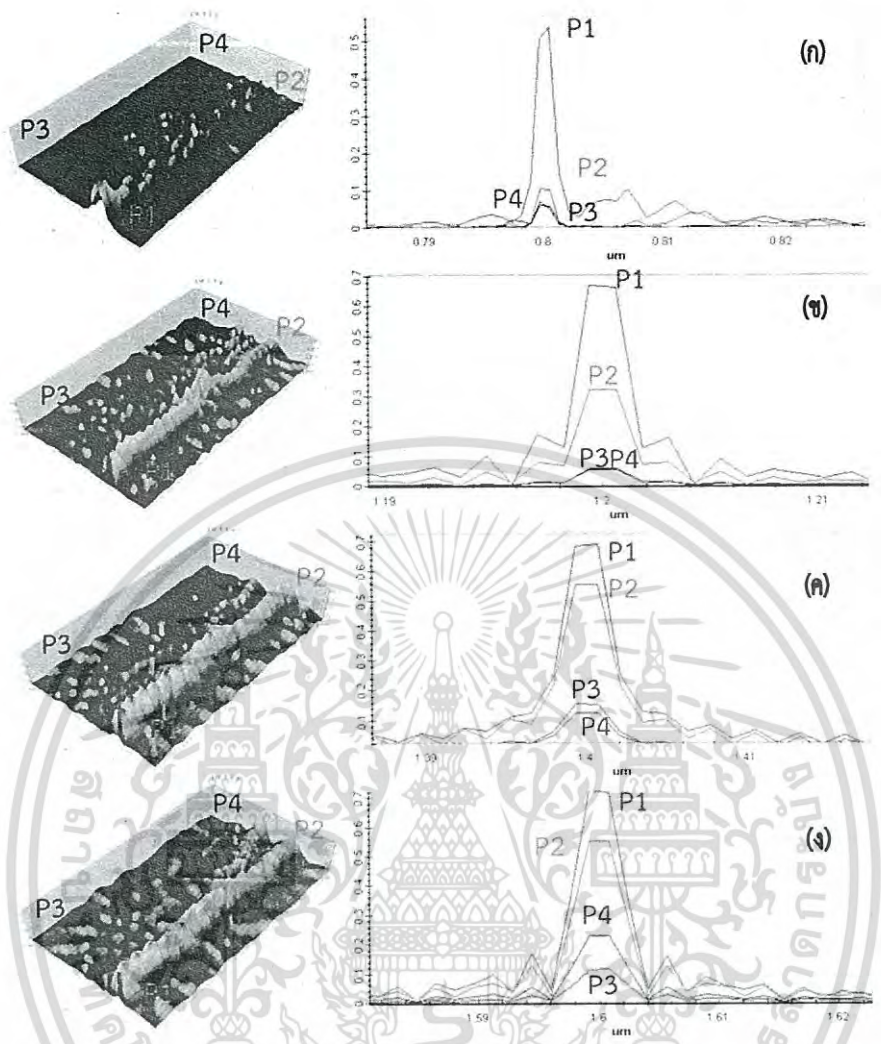


รูปที่ 4.22 การตอบสนองของโครงสร้างวงแหวนสั่นพ้องพลาสมอนิกต่อการเปลี่ยนความยาวคลื่นเมื่อเกิดการสั่นพ้องในวงแหวน

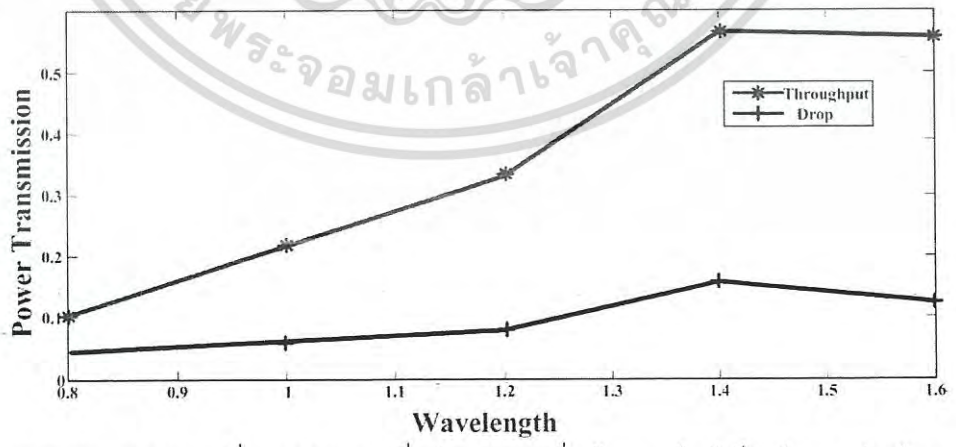
2) ผลกระทบจากการเปลี่ยนความยาวคลื่นต่อวงแหวนสั่นพ้องแบบไดอิเล็กทริก

ลักษณะการทำงานของ DRR นั้นจะตอบสนองกับระยะคัปปลิงของ แผ่นโลหะด้านข้างที่คัปปลิงกับวงแหวน ต้องพิจารณาช่องขนาดความกว้างระหว่างโลหะ-ไดอิเล็กทริก ส่งผลกระทบโดยตรงกับความยาวคลื่นที่ตอบสนองต่อวงจรแสง ในรูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงการทำงานของวงแหวนสั่นพ้อง DRR เมื่อกำหนดขนาดของโครงสร้าง $R_j = 1\mu\text{m}$ และ $AU_{\text{coupling}} = 0.1\mu\text{m}$ พบว่าที่ความยาวคลื่นน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นทำให้มีกำลังงานที่สามารถป้อนเข้ามายังระบบได้น้อย เมื่อความยาวคลื่นมีค่าสูงขึ้น เกิดผลกระทบต่อโหมดคลื่นที่สูงขึ้น ให้กำลังงานสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และมีการลดทอนของสัญญาณลดลง สามารถสรุปเป็นกราฟการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณที่ทรูพอร์ตและดรอพพอร์ตดังรูปที่ 4.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

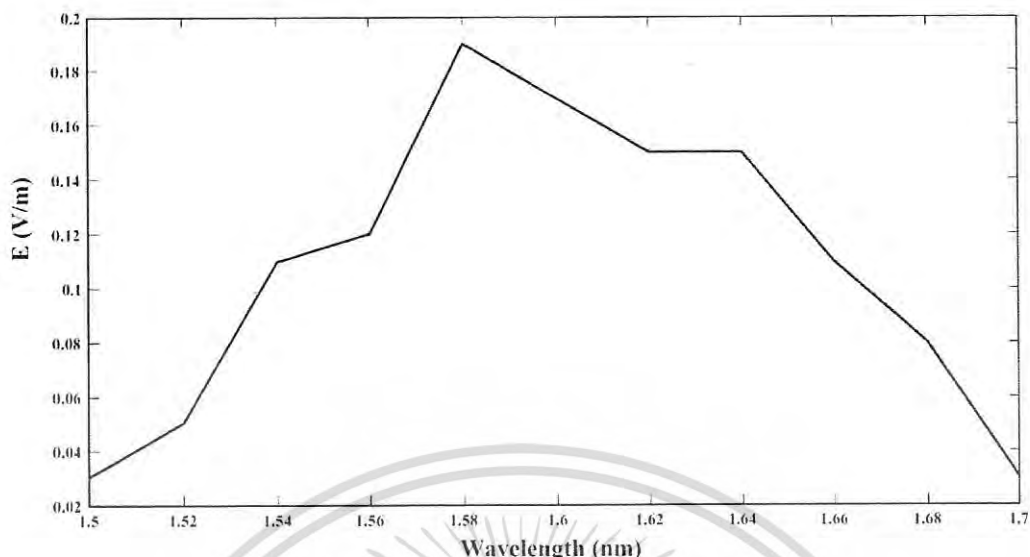


รูปที่ 4.23 ผลกระทบจากการเปลี่ยนความยาวคลื่นต่อวงแหวนสั่นพ้องแบบไดอิเล็กทริก



รูปที่ 4.24 ผลกระทบจากการเปลี่ยนความยาวคลื่นต่อวงแหวนสั่นพ้องแบบไดอิเล็กทริกระหว่างสัญญาณทรูพอร์ตและ ดรอพพอร์ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น. อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

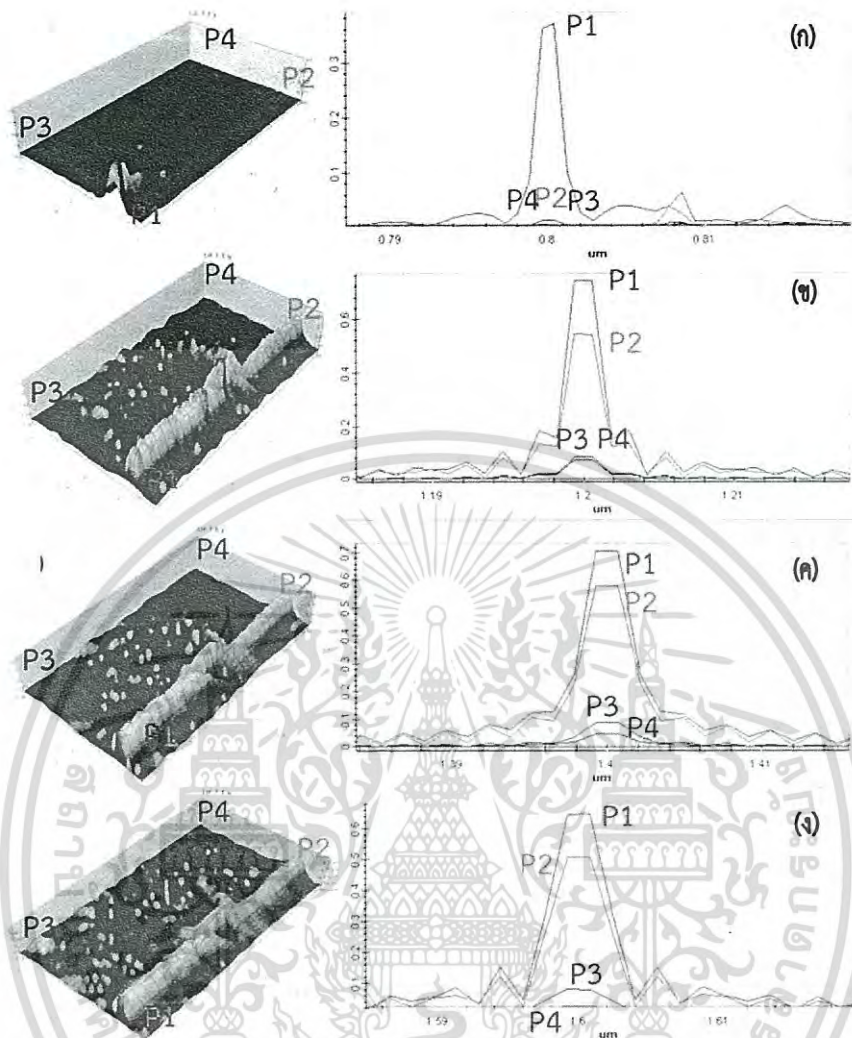


รูปที่ 4.25 การตอบสนองของโครงสร้างวงแหวนสั้นพ้องไดโพลเล็กทริกต่อการเปลี่ยนความยาวคลื่นเมื่อเกิดการสั้นพ้องในวงแหวน

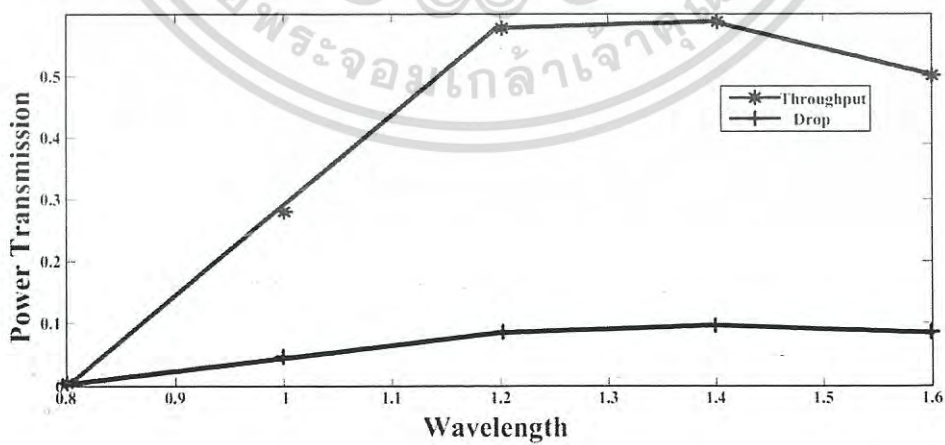
การตอบสนองของโครงสร้างวงแหวนสั้นพ้องไดโพลเล็กทริกต่อการเปลี่ยนความยาวคลื่น เมื่อเกิดการสั้นพ้องในวงแหวนในรูปที่ 4.25 พบว่าวงแหวนสั้นพ้องไดโพลเล็กทริกมีการตอบสนองในการสั้นพ้องเข้าสู่ช่วงความถี่ โดยมีขนาดสูงสุด คือ 0.19 V/m ที่ความยาวคลื่น $1.58 \mu\text{m}$

3) ผลกระทบจากการเปลี่ยนความยาวคลื่นต่อวงแหวนสั้นพ้องแบบผสม

ลักษณะการทำงานของ HRR เป็นการทำงานร่วมระหว่างแบบ PRR และ DRR ตอบสนองกับระยะการคัปปลิงของวงแหวนเล็กด้านข้างของวงแหวนแอดดรอป เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของความไม่เป็นเชิงเส้นของสัญญาณในอุปกรณ์ และการใช้โลหะด้านบนทำให้เกิดโหมดคลื่นที่คัปปลิงเข้าสู่ช่วงความถี่กลางมีค่าสูงขึ้น ดังได้อธิบายในการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง ในรูปที่ 4.26 แสดงการเปลี่ยนแปลงการทำงานของวงแหวนสั้นพ้องแบบผสม กำหนดขนาดของโครงสร้าง $R_d = 1 \mu\text{m}$ และ $R_{sidering} = 0.5 \mu\text{m}$ พบว่าเมื่อความยาวคลื่นมีค่าสูงขึ้น เกิดผลกระทบต่อโหมดคลื่นที่สูงและชัดเจน ให้กำลังงานสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีการลดทอนของสัญญาณลดลง สามารถสรุปเป็นกราฟการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณที่ทรูพอร์ตและ ดรอพพอร์ต ดังรูปที่ 4.27

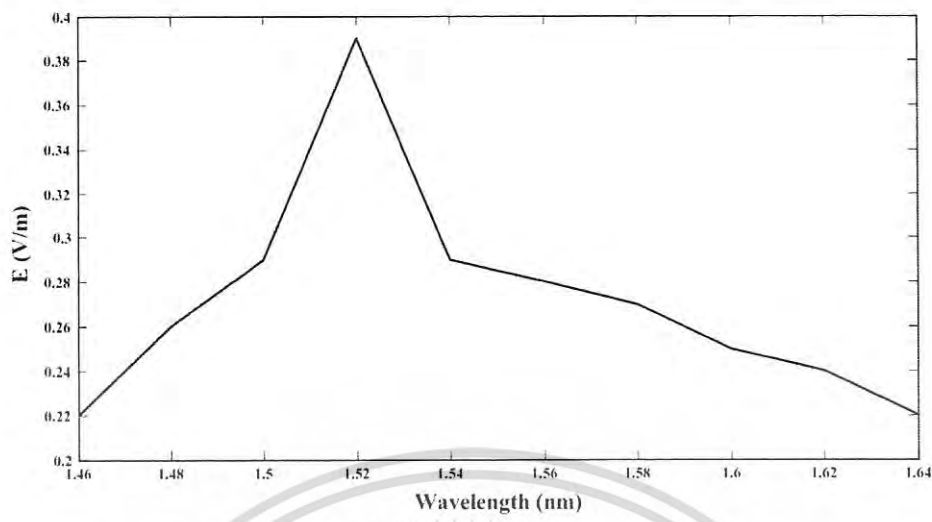


รูปที่ 4.26 ผลกระทบจากการเปลี่ยนความยาวคลื่นต่อวงแหวนสั่นพ้องแบบผสมผสาน

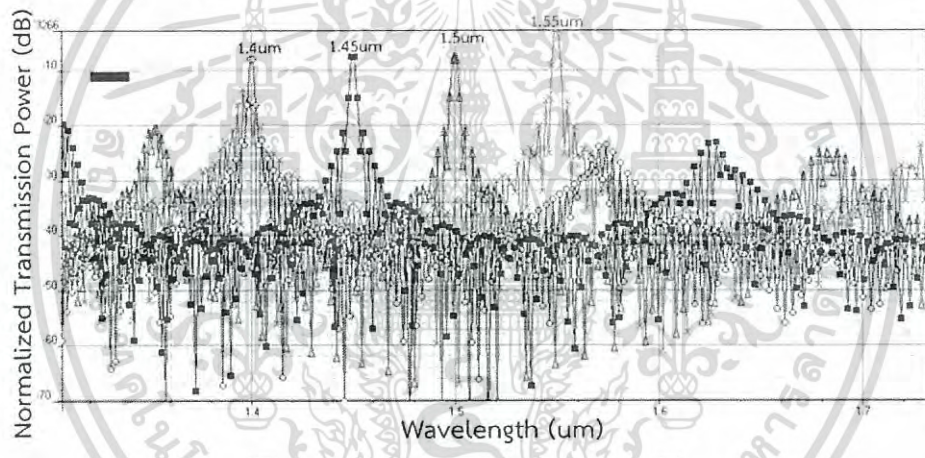


รูปที่ 4.27 ผลกระทบจากการเปลี่ยนความยาวคลื่นต่อวงแหวนสั่นพ้องแบบผสมผสานระหว่างสัญญาณทรูพอร์ตและ ดรอพพอร์ต

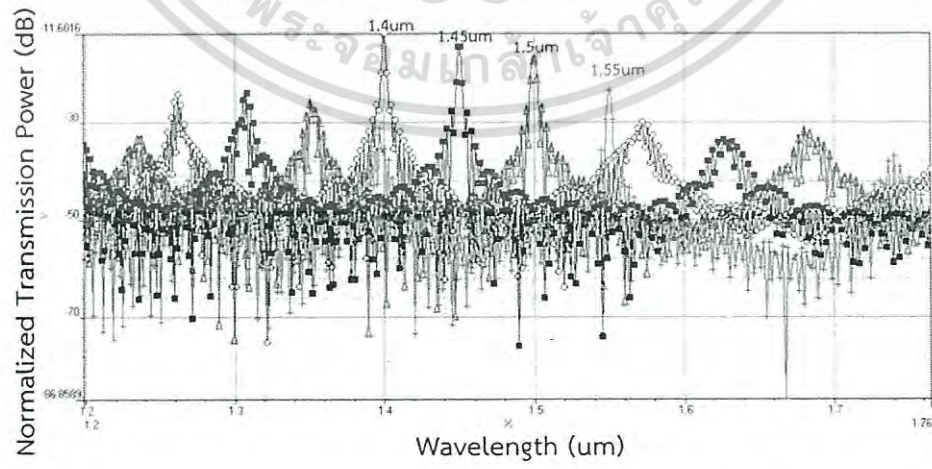
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 การตอบสนองของโครงสร้างวงแหวนสั่นพ้องแบบผสมต่อการเปลี่ยนความยาวคลื่นเมื่อเกิดการสั่นพ้องในวงแหวน



รูปที่ 4.29 ขนาดของสัญญาณคลื่นที่ทรูพอร์ตของวงแหวนสั่นพ้องแบบผสมเมื่อเปลี่ยนความยาวคลื่น



รูปที่ 4.30 ขนาดของสัญญาณคลื่นที่ทรูพอร์ตของวงแหวนสั่นพ้องแบบผสมเมื่อเปลี่ยนความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

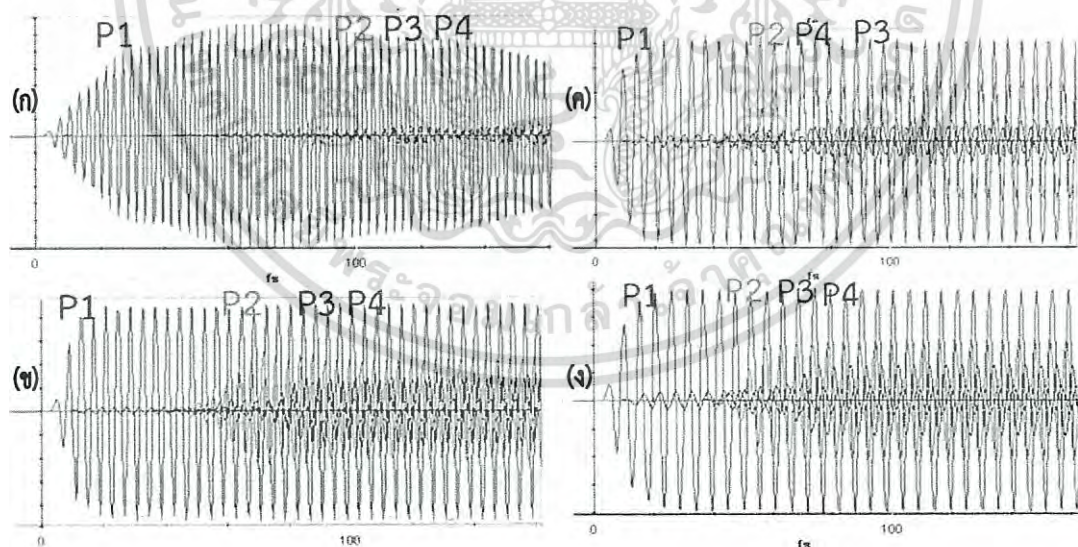
ในรูปที่ 4.29 และ 4.30 แสดงการนอมอลไลซ์ขนาดของสัญญาณคลื่นที่ทรูพอร์ตและดรอพพอร์ตของ HRR เมื่อเปลี่ยนความยาวคลื่นที่ 1.40 μm , 1.45 μm , 1.5 μm , และ 1.55 μm พบว่าโครงสร้างวงแหวนสั้นพ้องแบบ HRR ที่ได้ทำการออกแบบมีการตอบสนองกำลังงานที่ความยาวคลื่นที่ 1.55 μm สูงที่สุดที่ -3dBm ที่ความยาวคลื่น 1.50 μm สูง = -7dBm ที่ความยาวคลื่น 1.45 μm สูง = -7.5 dBm และที่ความยาวคลื่น 1.40 μm สูง = -8dBm ตามลำดับ โดยแต่ละยอดคลื่นมีช่วงความกว้างแตกต่างกันที่ 0.15 μm

4.3.3 ผลกระทบจากการตอบสนองทางเวลา

การหาผลกระทบทางเวลาสามารถชี้ให้เห็นถึง เวลาการตอบสนองในการทำงานของอุปกรณ์ต่อความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างทั้งสามรูปแบบ

1) ผลการตอบสนองทางเวลาที่เปลี่ยนความยาวคลื่นต่อวงแหวนสั้นพ้องพลาสมอนิก

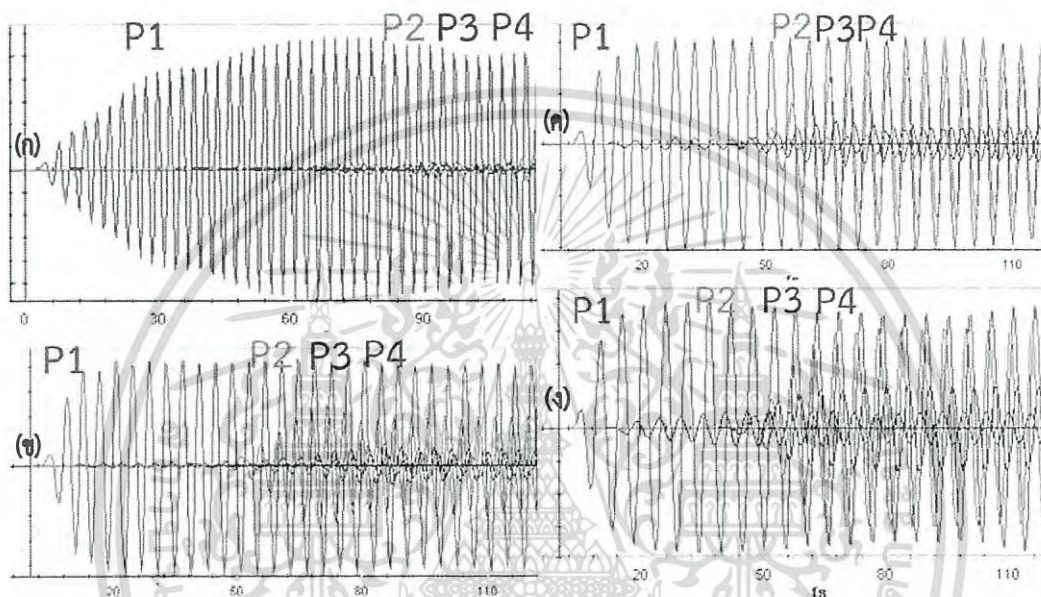
การหาผลกระทบทางเวลาของวงแหวนสั้นพ้องแบบ PRR ได้ศึกษาด้วยการเปลี่ยนความยาวคลื่นยาวคลื่นในการทำงานของวงแหวนสั้นพ้องที่ 0.8 μm , 1.2 μm , 1.4 μm , และ 1.6 μm โดยให้ P1 คือการตอบสนองสั้นพ้องที่ อินพุตพอร์ต ให้ P2 คือการตอบสนองสั้นพ้องที่ ทรูพอร์ตให้ P3 คือการตอบสนองสั้นพ้องที่ ดรอพพอร์ต และ ให้ P4 คือการตอบสนองสั้นพ้องที่ add port พบว่า ช่วงการตอบสนองที่เร็วที่สุดคือ ช่วง 1.4-1.6 μm ที่ 50 fs



รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาของวงแหวนสั้นพ้องพลาสมอนิกเมื่อเปลี่ยนความยาวคลื่น (ก) 0.8 μm (ข) 1.2 μm (ค) 1.4 μm และ (ง) 1.6 μm

2) วงแหวนสั่นพ้องพลาสมอนิกโพลาริตอนเชิงผิวแบบไดอิเล็กทริก

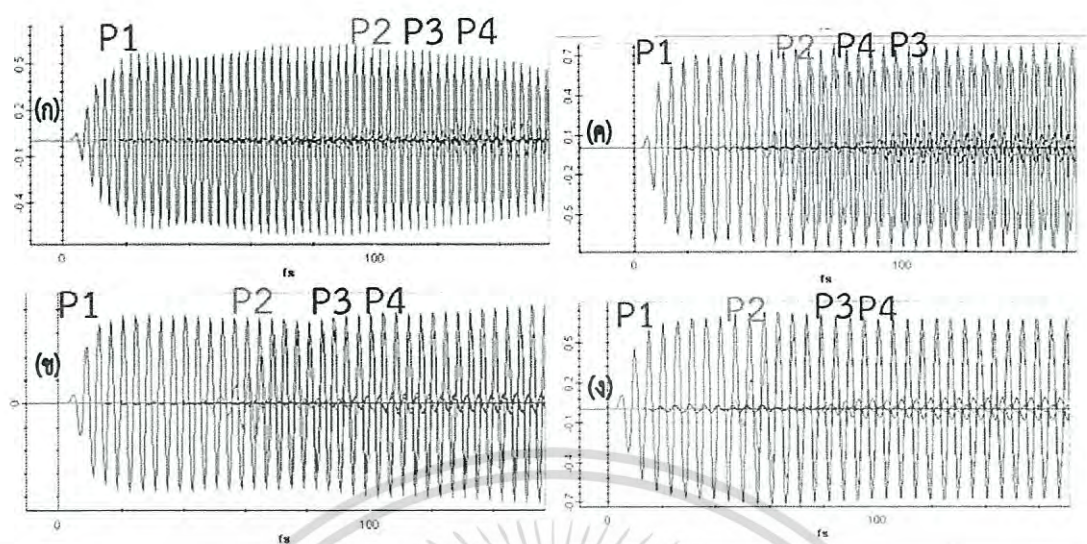
การหาผลกระทบทางเวลาของวงแหวนสั่นพ้องแบบ DRR ได้ศึกษาด้วยการเปลี่ยนความยาวคลื่นยาวคลื่นในการทำงานของวงแหวนสั่นพ้องที่ $0.8 \mu\text{m}$, $1.2 \mu\text{m}$, $1.4 \mu\text{m}$, และ $1.6 \mu\text{m}$ โดยให้ P1 คือการตอบสนองสั่นพ้องที่ อินพุตพอร์ต ให้ P2 คือการตอบสนองสั่นพ้องที่ ทูร์พอร์ตให้ P3 คือการตอบสนองสั่นพ้องที่ ดรอปพอร์ต และ ให้ P4 คือการตอบสนองสั่นพ้องที่ add port พบว่า ช่วงการตอบสนองของ DRR ที่เร็วที่สุดคือ ช่วง $1.4\text{-}1.6 \mu\text{m}$ ที่ 60 fs



รูปที่ 4.32 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาของวงแหวนสั่นพ้องแบบไดอิเล็กทริกเมื่อเปลี่ยนความยาวคลื่น (ก) $0.8 \mu\text{m}$ (ข) $1.2 \mu\text{m}$ (ค) $1.4 \mu\text{m}$ และ (ง) $1.6 \mu\text{m}$

3) วงแหวนสั่นพ้องพลาสมอนิกโพลาริตอนเชิงผิวแบบผสม

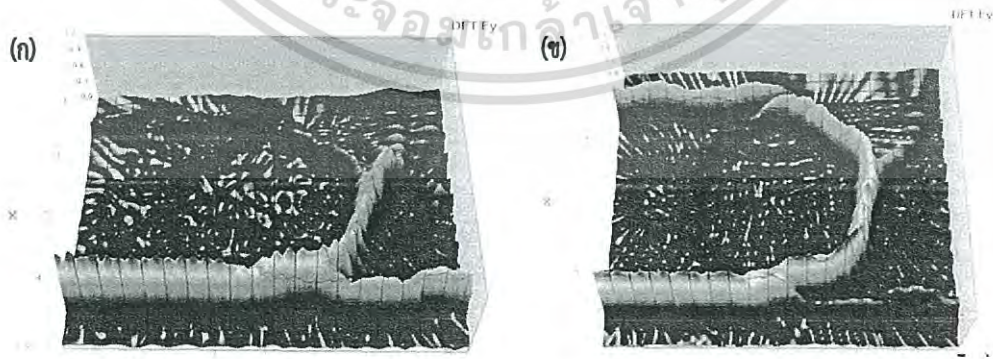
การหาผลกระทบทางเวลาของวงแหวนสั่นพ้องแบบ DRR ได้ศึกษาด้วยการเปลี่ยนความยาวคลื่นยาวคลื่นในการทำงานของวงแหวนสั่นพ้องที่ $0.8 \mu\text{m}$, $1.2 \mu\text{m}$, $1.4 \mu\text{m}$, และ $1.6 \mu\text{m}$ โดยให้ P1 คือการตอบสนองสั่นพ้องที่ อินพุตพอร์ต ให้ P2 คือการตอบสนองสั่นพ้องที่ ทูร์พอร์ตให้ P3 คือการตอบสนองสั่นพ้องที่ ดรอปพอร์ต และ ให้ P4 คือการตอบสนองสั่นพ้องที่ add port พบว่า ช่วงการตอบสนองของ DRR ที่เร็วที่สุดคือ ช่วง $1.4\text{-}1.6 \mu\text{m}$ ที่ 50 fs



รูปที่ 4.33 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาของวงแหวนสั่นพ้องแบบผสมเมื่อเปลี่ยนความยาวคลื่น (ก) 0.8 μm (ข) 1.2 μm (ค) 1.4 μm และ (ง) 1.6 μm

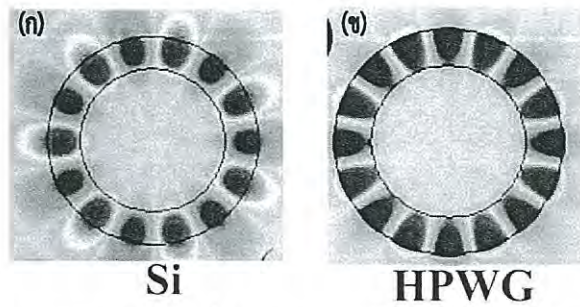
4.3.4 ผลกระทบจากการคัปปลิงด้วยโลหะ

การหาผลกระทบระหว่างวัสดุที่ทำการคัปปลิงและไม่คัปปลิงด้วยโลหะ ซึ่งเราใช้วัสดุทอง(Au) ส่งผลให้เกิด การกักเก็บสนามที่มีค่าสูงในโหมดของการกระจายคลื่นได้ ดังรูปที่ 4.34 การเปลี่ยนแปลงของ โหมด FDTD ที่เกิดในท่อนำคลื่นวงแหวนสั่นพ้องแบบผสม ขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาคัปปลิงด้วย ในรูปที่ 4.34 (ก) คือท่อนำคลื่นแบบปกติที่ไม่มีการคัปปลิงด้วยทอง ในรูปที่ 4.34 (ข) ท่อนำคลื่นวงแหวนสั่นพ้องแบบผสมที่คัปปลิงด้วยทอง ซึ่งจะให้ค่าการคัปปลิงสนามคลื่นเข้าไปยังวงแหวนแอดดรอปที่สูงกว่า และในรูปที่ 4.35 เป็นการจำลองผลการกักเก็บโหมดคลื่นในวงแหวนเมื่อทำการจำลอง FDTD ด้วยโปรแกรม MATLAB ระหว่างการคัปปลิงและไม่คัปปลิงเพื่อให้เห็น การกักเก็บโหมดที่เด่นชัด



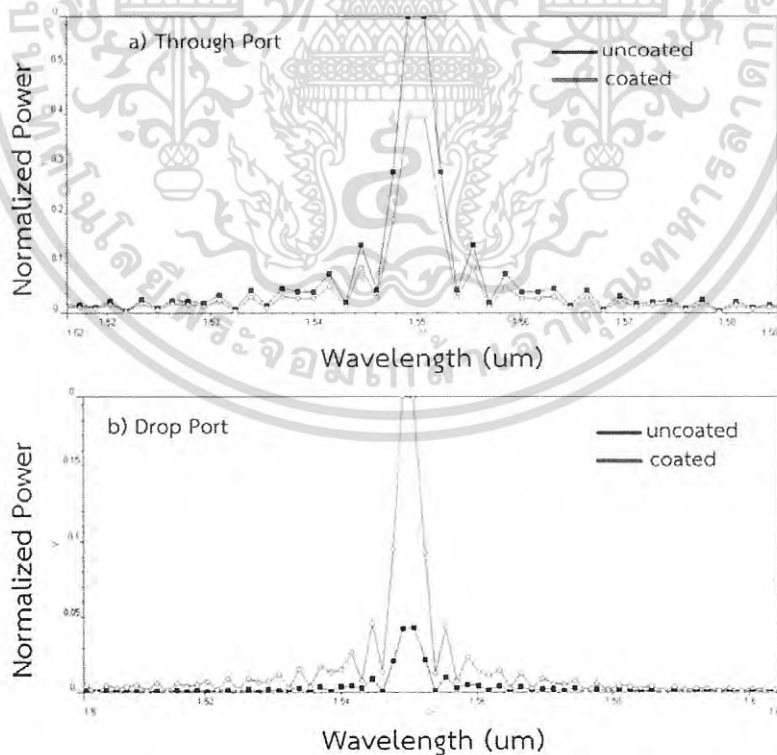
รูปที่ 4.34 การเปลี่ยนแปลงของโหมด FDTD ที่เกิดในท่อนำคลื่นวงแหวนสั่นพ้องแบบผสม (ก) แบบปกติที่ไม่มีการคัปปลิงด้วยทอง (ข) ท่อนำคลื่นวงแหวนสั่นพ้องแบบผสมที่คัปปลิงด้วยทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



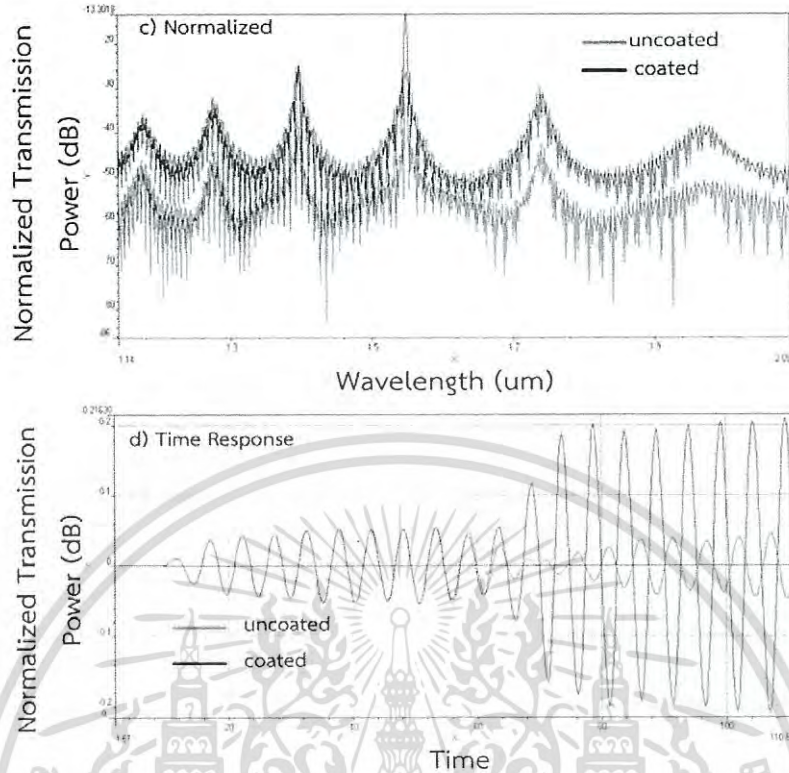
รูปที่ 4.35 การจำลองผลการกักเก็บโหมดคลื่นในวงแหวน เมื่อทำการจำลอง FDTD ระหว่างการคัปปลิงและไม่คัปปลิงด้วยโลหะ

ในรูปที่ 4.36 ได้แสดงสัญญาณที่พอร์ตต่างๆของวงแหวนสั่นพ้องแบบผสม เมื่อต้องการหาผลกระทบจากการคัปปลิงและไม่คัปปลิงด้วยทอง (ก) สัญญาณที่ทรูพอร์ตของวงแหวนสั่นพ้องแบบผสม อุปกรณ์ที่คัปปลิงจะมีการคัปปลิงโหมดของคลื่นเข้าไปยังท่อนำวงกลม ทำให้มีสัญญาณต่ำกว่าแบบที่ไม่มีคัปปลิงด้วยทอง (ข) สัญญาณที่ดรอพพอร์ตของวงแหวนสั่นพ้องแบบผสม พบว่าอุปกรณ์ที่คัปปลิงมีสัญญาณสูงกว่าแบบที่ไม่มีคัปปลิงด้วยทอง ในรูปที่ 4.37 แสดง (ก) สัญญาณ E_y ที่ทำการนอมอลไลซ์แบบคัปปลิงมีขนาดสัญญาณที่สูงกว่าแบบไม่คัปปลิงถึง 18 dBm และ (ข) การตอบสนองทางเวลาของวงแหวนสั่นพ้องแบบผสม พบว่าแบบคัปปลิงมีการตอบสนองทางเวลาเร็วกว่าแบบไม่คัปปลิงถึง 20 fs

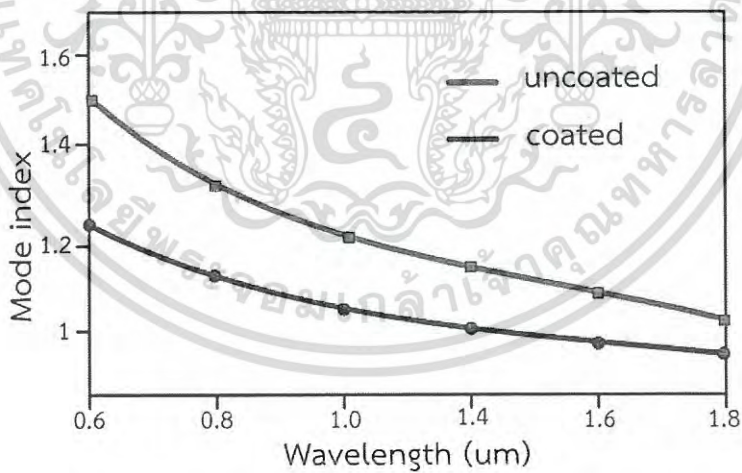


รูปที่ 4.36 สัญญาณที่ทรูพอร์ตและดรอพพอร์ตของวงแหวนสั่นพ้องแบบผสม เปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ที่คัปปลิงและไม่คัปปลิงด้วยทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 (ก) สัญญาณ Ey ของวงแหวนเส้นพ้องแบบผสมที่ทำการมอดโลซ์ และ (ข) การตอบสนองทางเวลา



รูปที่ 4.38 การเปรียบเทียบโหมดเมื่อเปลี่ยนความยาวคลื่น

ในรูปที่ 4.38 แสดงการเปรียบเทียบดัชนีโหมดของคลื่น ของวงแหวนเส้นพ้องแบบ HRR เมื่อทำการเปลี่ยนความยาวคลื่น พบว่าทั้งแบบที่คัปปลิงด้วยทองและแบบที่ไม่คัปปลิงมีแนวโน้มของโหมดที่ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อความยาวคลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าของโหมดจะขึ้นอยู่กับค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุตัวนำทองด้วย และเมื่อทำการคัปปลิงด้วยทองโหมดของคลื่นจะมีค่าต่ำกว่าแบบที่ไม่คัปปลิงด้วยทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

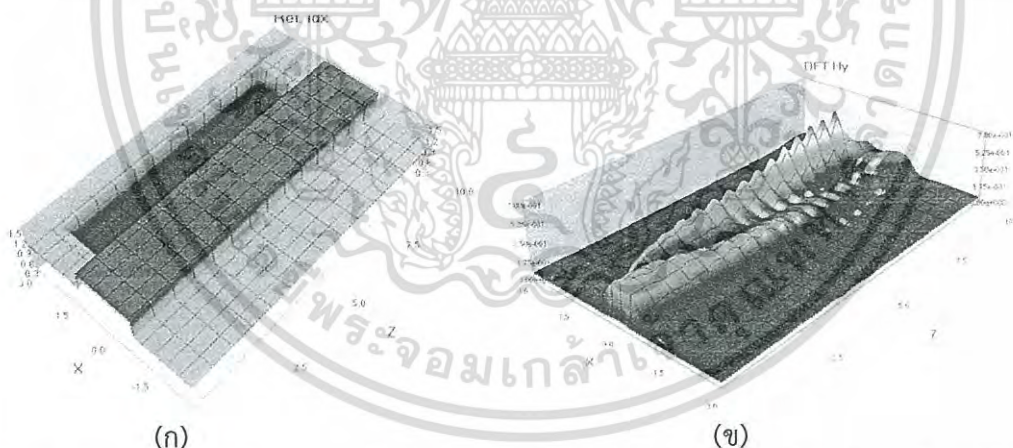
4.3.5 ผลกระทบจากค่าความยอมไฟฟ้าของวัสดุคัปปลิง

การประดิษฐ์โครงสร้างของท่อนำคลื่นดัดที่ได้ออกแบบ สนใจที่จะให้ท่อนำคลื่นนั้นมีค่าความยอมไฟฟ้ามีค่าเป็นบวกสำหรับไดอิเล็กทริก และมีค่าเป็นลบสำหรับวัสดุคัปปลิงที่ใช้งาน ซึ่งส่วนนี้ได้นำเสนอผลของวัสดุคัปปลิงโดยเปรียบเทียบระหว่างวัสดุเงินและทอง ซึ่งค่าที่ได้ดังตารางที่ 4.3 เป็นค่าที่นำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ด้วย ดังรูปที่ 4.39 ค่าการเคลื่อนที่ของคลื่นในท่อนำคลื่นจะเคลื่อนที่ไประหว่างรอยต่อการคัปปลิงระหว่างวัสดุทั้งสองชนิด

$$\epsilon_r = \epsilon_{r\infty} + \frac{\omega_p^2}{j\Gamma\omega - \omega^2} \tag{4.1}$$

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์โมเดลของ Drude-Lorentz สำหรับเงิน (Ag) และทอง (Au) [7]

โลหะ	ϵ_{∞}	Plasma Freq. (ω_p , eV)	Plasma Relaxation (Γ_p , eV)	Lorentz Freq. (ω_1 , eV)	Weighting Factor (f1)	Lorentz Relaxation (Γ_1 , eV)
Silver (Ag)	3.7180	9.2093	0.0200	4.2840	0.4242	0.3430
Gold (Au)	6.8890	8.9601	0.0723	2.9715	1.7857	0.9503



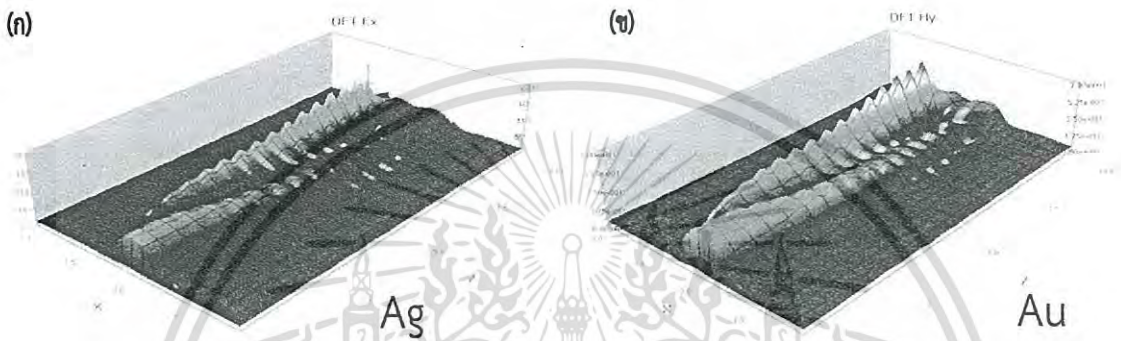
รูปที่ 4.39 (ก) โครงสร้างค่าความยอมไฟฟ้าของท่อนำคลื่นเพื่อทดสอบการเคลื่อนที่ของคลื่นตามผิว (ข) ความหนาแน่นกำลังงานสนามที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ไปตามแนวแกน z

ผลกระทบของการเปลี่ยนค่าความยอมไฟฟ้าของวัสดุคัปปลิงมีการศึกษาและสามารถแสดงผลได้ในรูปที่ 4.40 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงตามระยะทางในการแพร่กระจายสำหรับผสมผสานโหมตจะแตกต่างกับการเชื่อมต่อเชิงเดี่ยว ซึ่งเราสามารถหาค่าได้จากสมการของ Raether [119]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta_{sp} = \frac{1}{k_0} \left(\frac{\epsilon_m' + \epsilon_d}{\epsilon_m' \epsilon_d} \right)^{3/2} \frac{(\epsilon_m')^2}{\epsilon_m''} \quad (4.2)$$

เมื่อ ϵ_m' และ ϵ_m'' เป็นค่าจริงและค่าจินตภาพของค่าความยอมไฟฟ้าในวัสดุ และ ϵ_d คือค่าความยอมไฟฟ้าของตัวกลางไดอิเล็กทริก โดยที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของ δ_{sp} สำหรับการเชื่อมต่อระหว่างทองและไดอิเล็กทริกที่ ความยาวคลื่น 1.55 μm จะเป็นฟังก์ชันของ ϵ_d



รูปที่ 4.40 (ก) การจำลองผล FDTD ของการคัปปลิงท่อนำคลื่นด้วยเงิน Ag (ข) การจำลองผล FDTD ของการคัปปลิงท่อนำคลื่นด้วยทอง Au

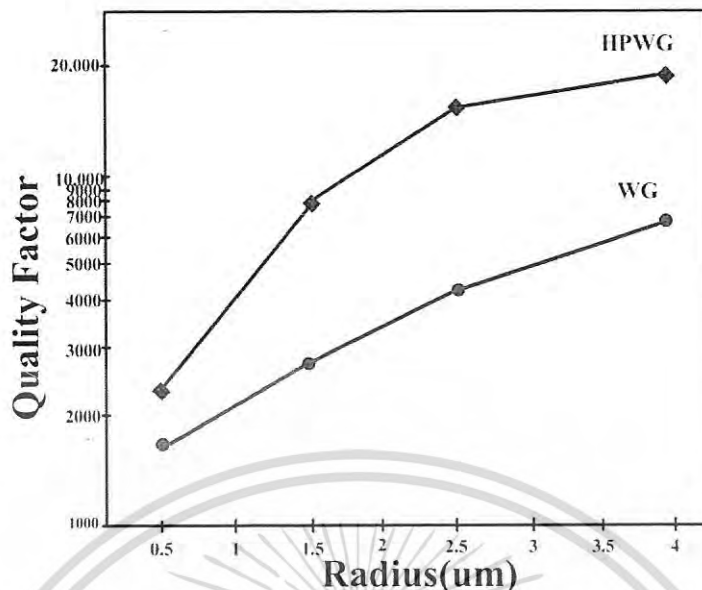
4.3.6 ผลกระทบที่ได้จากค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพ (Quality Factor)

ค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเป็นปัจจัยหนึ่งในการพิจารณาปริมาณของตัวเลขเพื่อบอกถึงการกักเก็บพลังงานและการสูญเสียพลังงานของท่อนำคลื่นแสง ในการคำนวณความจุของโหมดและองค์ประกอบของการกักเก็บ เราจะใช้ค่าดัชนีประสิทธิผลการหักเหของโลหะ $\epsilon_{eff} = d(\omega\epsilon(\omega)) / d\omega = \epsilon_\infty + (\omega p / \omega)^2$, เมื่อ ω คือความถี่สั่นพ้องของท่อนำคลื่น SPP ดังนั้นการสูญเสียพลังงานเป็นอัตราส่วนกลับกับค่า Q โดยค่า Q ทั้งหมดในท่อนำคลื่นสามารถหาได้จาก

$$\frac{1}{Q_{total}} = \frac{1}{Q_{vertical}} + \frac{1}{Q_{horizontal}} \quad (4.3)$$

โดยค่า Q สามารถหาได้จาก $\lambda_0 / \Delta\lambda$ เมื่อ $\Delta\lambda$ คือ full width at half maximum ของทุกๆยอดคลื่น ซึ่งค่า Q ของท่อนำคลื่น HPWG ที่ได้นำเสนอ แสดงเปรียบเทียบกับ ท่อนำคลื่นแบบธรรมดา ดังรูปที่ 4.41 พบว่า แบบที่ได้นำเสนอมีค่า Q ที่สูงกว่าแบบที่เป็นท่อนำคลื่นแอตตรอปมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



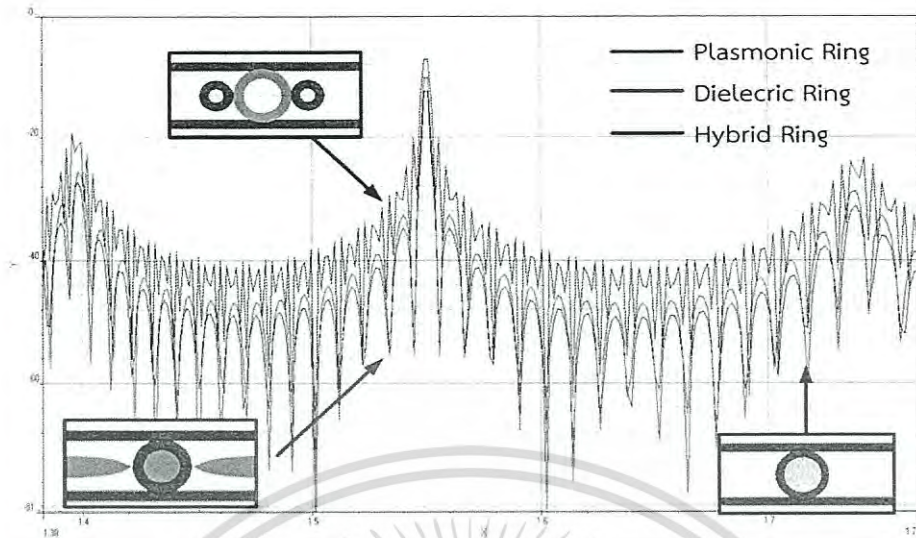
รูปที่ 4.41 ค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพ Q ที่ได้จากโครงสร้างที่ได้นำเสนอเปรียบเทียบกับโครงสร้างแบบเดิม

4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพวงแหวนสั่นพ้องพลาสมอนิกโพลาไรตอนเชิงผิว

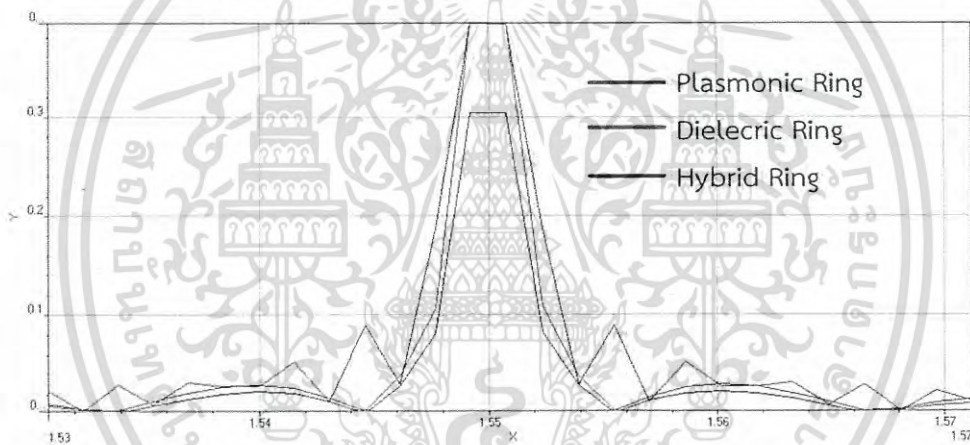
ในส่วนนี้ได้ทำการเปรียบเทียบวงแหวนสั่นพ้องพลาสมอนิกโพลาไรตอนเชิงผิวที่ได้นำเสนอ กับงานวิจัย HRR อื่น ที่ได้นำเสนอมาก่อนหน้า ซึ่งเฉพาะไปยังอุปกรณ์เชิงแสงที่ใช้สำหรับการทำมัลติเพล็กซ์หรือการทำสวิซชิงสัญญาณแสง ทั้งที่เป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเชิงดิจิทัลด้วย

4.4.1 ค่าการส่งผ่านสัญญาณ (Power Transmission)

จากการจำลองการทำงานโดยออกแบบโครงสร้างทั้งสามด้วยโปรแกรม optiFDTD ด้วยลักษณะโครงสร้างแบบเดียวกัน จะได้ค่าการส่งผ่านสัญญาณดังรูปที่ 4.42 และ 4.43 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวงแหวนแบบผสมที่มีค่าสูงกว่าแบบไดโอดีทริก 4dB และมากกว่าแบบพลาสมอนิก 7 dB ด้วยกัน



รูปที่ 4.42 การส่งผ่านสัญญาณที่ทิวพอร์ตของ HPWG เปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ทั้งสามชนิด



รูปที่ 4.43 ขนาดของสัญญาณ PWG เปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ทั้งสามชนิด

4.4.2 ค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระ (Free Spectral Range : FSR)

ค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระเป็นค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงระยะห่างระหว่างยอดการสั่นพ้องที่สูงที่สุดกับยอดอื่นๆ ในการเปลี่ยนขนาดของโครงสร้างของท่อนำคลื่น ยิ่งขนาดมีค่าเล็กลงค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระของการสั่นพ้องของแสงจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะชี้ให้เห็นว่าค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระจะเป็นส่วนกลับกันกับขนาดของท่อนำคลื่น โดยคุณสมบัติของแสงนั้นช่วยให้เพิ่มค่าอัตราการแยกชัด (Finesse: F) และค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระ รวมถึงช่วยให้เพิ่มจำนวนของโหมดในช่วงที่พิจารณาได้

$$FSR = \Delta\lambda = \frac{2\pi}{L} \left(\frac{\partial\beta}{\partial\lambda} \right)^{-1} \approx \frac{\lambda^2}{n_{eff}L} \quad (4.4)$$

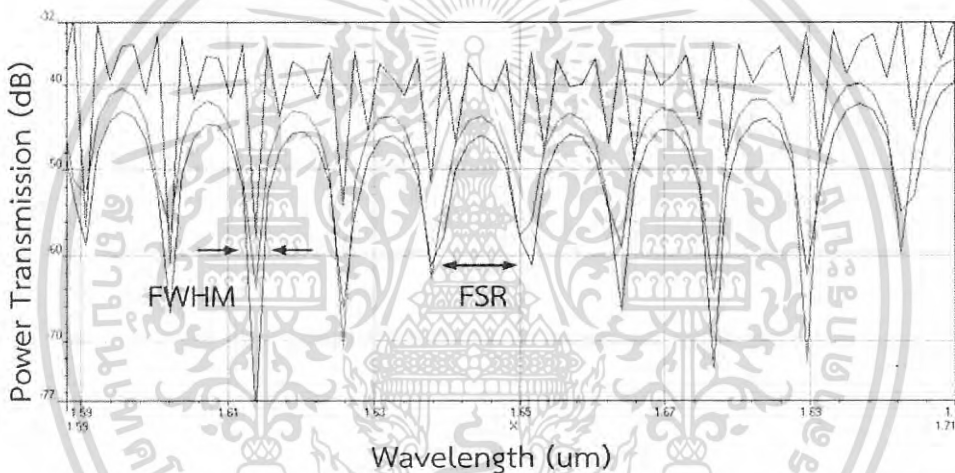
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 ค่าประสิทธิภาพกำลังงานสูงสุดครึ่งคลื่น (Full Width at Half Maximum: FWHM)

FWHM คือ ช่วงพลังงานที่มีค่านับวัดเป็นครึ่งหนึ่งของค่านับวัดสูงสุด เป็นช่วงพลังงานที่อยู่ระหว่างพลังงานสูงสุด ดังผลการจำลองสัญญาณที่พอร์ตทรูจากรูปที่ 4.44 จะได้ค่า FWHM 400GHz หรือสามารถหาได้จากสมการ ที่ 4.5 และสามารถหาค่า Finesse ได้จากสมการที่ 4.6 ซึ่ง $F=3.5$

$$FWHM = 2\delta\lambda = \frac{\kappa^2 \lambda^2}{\pi L n_{eff}} \quad (4.5)$$

$$F = \frac{FSR}{FWHM} = \frac{\Delta\lambda}{2\delta\lambda} = \pi \frac{t}{1-t^2} \approx \frac{\pi}{\kappa^2}, \kappa \ll 1 \quad (4.6)$$



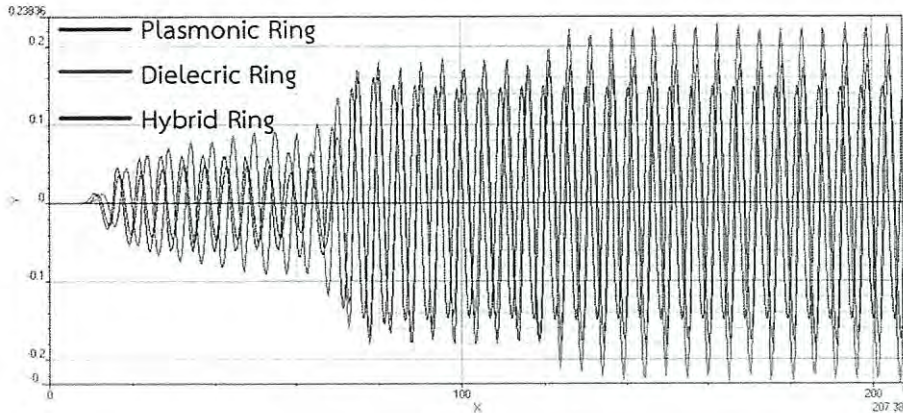
รูปที่ 4.44 การเปรียบเทียบการส่งผ่านสัญญาณที่พอร์ตทรูของอุปกรณ์ทั้งสามชนิดเพื่อหาค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระ

เพื่อหาค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระจากรูปที่ 4.44 แสดงการส่งผ่านสัญญาณพอร์ตทรูเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ทั้งสามชนิด จะได้ค่า FSR = 1.4 THz และ FWHM ที่ -3dB ประมาณ 400GHz

4.4.4 เวลาในการแพร่กระจาย (Propagation time)

เวลาในการแพร่กระจายเป็นปัจจัยที่บอกถึงการตอบสนองเมื่อทำการป้อนอินพุตแล้วดูเวลาในการเคลื่อนที่ถึงเอาต์พุต เวลาในการแพร่กระจายของวงแหวนแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะมีเวลาในการแพร่กระจายแปรผันตรงกับขนาดของวงแหวนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น การเปรียบเทียบเวลาตอบสนองแสดงในรูปที่ 4.45 ทั้งสามตัวมีค่าการตอบสนองใกล้เคียงกัน คือ 15 fs และสั้นพ้องที่ 60 fs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



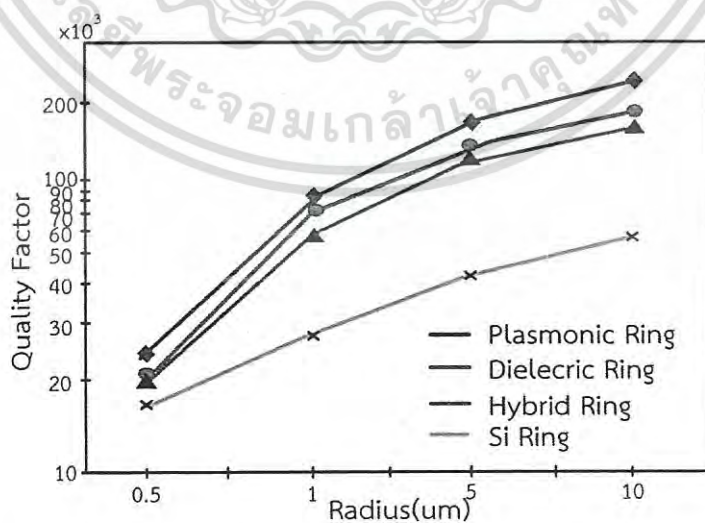
รูปที่ 4.45 เวลาในการตอบสนอง เปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ทั้งสามชนิด

4.4.5 ค่าคุณภาพประสิทธิภาพการกักเก็บสนามเชิงแสง

สำหรับความสัมพันธ์ของขนาดโครงสร้างที่นำคลื่นที่มีขนาดใหญ่ แสงสามารถเดินทางและถูกกักเก็บในระดับไมโครเมตรและนาโนเมตรด้วยค่า Q ที่มีค่าสูง ค่าการกักเก็บสนามที่สูงนี้จะแสดงให้เห็นคุณสมบัติมาตรฐานของสนามของแสงที่มีค่าความเข้มสูงมาก ทุกๆแสงที่มีการส่งแบบความเข้มสูงด้วยที่นำคลื่นแสงแบบความยาวคลื่นย่อย สามารถตอบสนองและต้องการอุปกรณ์ที่มีค่า Q สูงมาก ซึ่งสามารถหาได้จากสมการมาตรฐานที่คำนวณได้จากค่า FSR และ FWHM

$$Q = \frac{\lambda}{2\delta\lambda} = \pi \frac{Ln_{eff}}{\lambda} \cdot \frac{t}{1-t^2} = \frac{Ln_{eff}}{\lambda} F \quad (4.7)$$

ผลจากการจำลองการทำงานเปรียบเทียบประสิทธิภาพของที่นำคลื่นแสงทั้งสามแบบที่มีการคัปปลิงด้วยท่อนั้นให้ค่า Q ที่สูงและมีความใกล้เคียงกันดังรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.46 ผลจากการจำลองการทำงานเปรียบเทียบค่า Q ของที่นำคลื่นแสงทั้งสี่แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิก

Type	Structure (nm)	Through /Drop port Power	Wavelength /Length	Response Time (fsec)	Tx Power	FWHM (nm)	FSR (nm)	Q
<u>Plasmonic</u> -PRRG -PRRS	Ring = 1000 Height =400 Width =400 Gap =100 Circular Au=900	-PRRG= 0.5/0.5 -PRRS= 0.54/0.1	1.55 μm (1.2-1.8)	-PRRG= 56 -PRRS= 56	-17 dBm	3.2	11	69,647
<u>Dielectric</u> -DRRC -DRRP -DRRS	Ring= 1000 Width =400 Height =400 Gap =10 Parabola Au=0.6x3.3 μm	-DRRC= 0.6/0.16 -DRRP= 0.54/0.2 -DRRS= 0.6/0.28	1.55 μm (1.3-1.7)	-DRRC= 60 -DRRP= 62 -DRRS= 58	-13 dBm	3.8	11	58,648
<u>Hybrid</u> -HARRA -HRRM	Ring= 1000 Width =400 Height =400 Au Height= 100 Gap =100	-HARRA= 0.5/0.14 -HRRM= 0.55/0.18	1.55 μm (1.1-1.9)	-HARRA= 58 -HRRM= 60	8dBm	2.2	11	92,843

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิกกับงานวิจัยที่ศึกษา

Structure	Ring radius	FWHM (nm)	FSR (nm)	Fineness (FWHM/FSR)	Q factor
[88] Photothermally tunable silicon-microring-based optical add-drop filter through integrated light absorber	18 μm	0.144	10.4	72.2	58,000
Plasmonic Ring Resonator	1 μm	3.2	11	3.438	69,647
[90] Field-effect active plasmonics for ultracompact electro-optic switching (Ag)	0.75 μm	20	100	5	75,000
Dielectric Ring Resonator	1 μm	3.8	11	2.895	58,648
Hybrid Ring Resonator	1 μm	2.2	11	5	92,843

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลคุณลักษณะจำเพาะทางเทคนิคของโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิกที่ศึกษา

ลักษณะเฉพาะ	วงแหวนพลาสมอนิก	วงแหวนไดอิเล็กทริก	วงแหวนผสม	ข้อจำกัด
ขนาดของโครงสร้าง	10 μm	10 μm	10 μm	0.8-20 μm
ท่อนำคลื่นตรง	400x400nm	400x400nm	400x400nm	200x200nm
รัศมีท่อนำคลื่นวงแหวน	1 μm	1 μm	1 μm	0.75-3 μm
รัศมีท่อนำคลื่นวงแหวนข้าง	-	-	0.5 μm	0.3 μm
วัสดุท่อนำคลื่น	InGaAsP/InP	InGaAsP/InP	InGaAsP/InP	-
โลหะและขนาด	Au/0.9 μm	Au/0.6x3.3 μm	Au/1 μm	-
ช่องว่างระหว่างโลหะ- ไดอิเล็กทริก	100nm	10nm	100 nm	10nm
การทำงาน	Passive	Passive/active	Passive	-
โหมด	1.207	1.207	1.207	0.88
อินพุต	1 V/m	1 V/m	1 V/m	1 V/m
ขนาดการลดทอน	-0.07V/m	-0.09V/m	-0.06 V/m	-0.06 V/m
ความยาวคลื่นสั้นพ้องสูงสุด	1.75 μm	1.58 μm	1.52 μm	0.8-1.8 μm
ขนาดกำลังงานที่ ความยาวคลื่นสั้นพ้องสูงสุด	0.5 V/m	0.19 V/m	0.39 V/m	-
ช่วงความยาวคลื่นสั้นพ้อง	1 μm	1.2 μm	0.4 μm	-
ช่วงความยาวคลื่นทำงาน	1.2-1.8 μm	1.3-1.7 μm	1.1-1.9 μm	-
การตอบสนองทางเวลา	56 fs	60fs	58fs	-
ค่าชั้นการนำสมบรูณ์	50	30	50	30-60
กำลังงานเอาท์พุต	-17 dBm	-13 dBm	-8dBm	-
พิสัยสเปกตรัมอิสระ	11	11	11	-
ช่วงความยาวคลื่นรีจิ้น	3.2	3.8	2.2	-
ตัวแปรประสิทธิภาพ	69,647	58,648	92,843	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและแนวทางในการศึกษาวิจัยในอนาคต

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการดำเนินงานทั้งหมดที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์และแนวทางในการศึกษาวิจัยที่จะได้ดำเนินงานต่อไปในอนาคต มีรายละเอียดดังนี้

5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย

นำเสนอความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา หลักการพื้นฐานของอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์โดยเปรียบเทียบฟังก์ชันการทำงานของโมดูลของ OADMs แบบต่างๆ การทวนสอบรูปแบบโครงสร้างในการออกแบบ OADMs ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้งานที่นำคลื่นแสง และได้จุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์ รวมถึงขอบเขตของการศึกษา และได้โครงสร้างทั้งหมดของวิทยานิพนธ์

ทำความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ศึกษาการสื่อสารเชิงแสงที่เกิดพลาสมอนระหว่างโลหะและไดอิเล็กทริก ศึกษาการโพลาริซซ์ ไบรีฟรินเจนซ์แสง ความรู้ที่ได้นำมาออกแบบวงแหวนสั่นพ้องแบบพลาสมอนิกแอดดรอปมัลติเพล็กซ์ ศึกษาวิเคราะห์และสรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการปรับโครงสร้างสำหรับวงแหวนสั่นพ้อง เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ได้ศึกษา และนำความรู้ที่ได้ทั้งหมดไปใช้ในการออกแบบวงแหวนสั่นพ้องพลาสมอนิกแบบผสม นำเสนอวงจรเชิงแสงพลาสมอนิกโพลาริตอนเชิงผิวและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เริ่มจากสมการของคลื่น ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของพลาสมอนิกโพลาริตอนเชิงผิว รูปแบบการเชื่อมต่อของพลาสมอนิกโพลาริตอนเชิงผิวแบบเดี่ยวและแบบหลายชั้นและนำเสนอโครงสร้างที่นำคลื่นแบบพลาสมอนิกในปัจจุบัน วิเคราะห์ความแตกต่างของแต่ละรูปแบบ สรุปตารางงานวิจัยที่ได้ศึกษาสำหรับ พลาสมอนแบบระนาบ หลังจากนั้นได้นำเสนอการออกแบบสิ่งประดิษฐ์ที่นำคลื่นแบบนาโนลิโทกราฟีและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสมและใกล้เคียงการทำงานที่ได้นำเสนอเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ หลังจากได้ค่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดจึงได้ทำการออกแบบที่นำคลื่นแสงด้วยวิธีผลต่างสลับเนื่องจำกัดในโดเมนเวลาตามแนวความคิดของยีและเงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืนชั้นแมตซ์สมบูรณ์ ทำการออกแบบและจำลองการทำงานของวงจรเชิงแสงพลาสมอนิกโพลาริตอนเชิงผิวด้วยโปรแกรม MATLAB และโปรแกรม optiFDTD และได้วงจรเชิงแสงพลาสมอนิกโพลาริตอนเชิงผิวที่พัฒนาจากวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า

ผลที่ได้นำเสนอผลการจำลองการทำงาน เริ่มจาก เพื่อแสดงให้เห็นถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานด้วยตัวแปรที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของที่นำคลื่นแสงพลาสมอนิกแบบผสม และทำการหาประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรเชิงแสง พลาสมอนิกโพลาริตอนเชิงผิวแบบอื่นๆ เริ่มจากการหาผลกระทบจากโครงสร้างของที่นำคลื่น ทำให้ได้ตัวแปร $d=400$ nm, $w=400$ nm, $R_d=1\mu\text{m}$,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R_i=R_r=0.5\mu\text{m}$ ผลกระทบจากความยาวคลื่น ได้ความยาวคลื่นที่ $1.55\mu\text{m}$ และ mode index=1.027 ผลกระทบจากการคัปปลิงด้วยทอง ผลระหว่างการคัปปลิงและไม่คัปปลิงเพื่อให้เห็นการกักเก็บโหมดที่เด่นชัด การเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับงานวิจัยอื่นของท่อนำคลื่นแสงพลาสมอนิก โดยใช้โครงสร้างสามรูปแบบคือ 1) แบบ Plasmonic Ring Resonator 2) Dielectric Ring Resonator และ 3) Hybrid Ring Resonator (proposed) ทั้งสามรูปแบบทำการจำลองโดยกำหนดลักษณะโครงสร้างมาตรฐานแบบเดียวกัน ทำการเปรียบเทียบค่าการส่งผ่านสัญญาณ ที่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวงแหวนแบบผสม มีค่าสูงกว่าแบบไดอิเล็กทริก 4dB และมากกว่าแบบพลาสมอนิก 7dB ด้วยกัน เปรียบเทียบค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระยิ่งขนาดโครงสร้างมีค่าเล็กลง ค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระของการสั้นพ้องของแสงจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น จะได้ค่า FSR=1.4THz และ เปรียบเทียบค่า FWHM ที่ -3dB มีค่าประมาณ 400GHz เปรียบเทียบเวลาในการแพร่กระจายคลื่น ทั้งสามชนิดมีค่าการตอบสนองใกล้เคียงกัน คือ 56-60fsec และสุดท้ายค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพของพลาสมอนิกแอดดรอปมีลิตีเฟล็กเซอร์แบบผสมที่ได้สำเสนอให้ค่า Q สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทั้งสองแบบ

5.2 การสังเคราะห์โครงสร้างและขั้นตอนกฎเกณฑ์ในการออกแบบ

จากการทดลองโดยจำลองผลการทำงานของอุปกรณ์พลาสมอนิกแอดดรอปมีลิตีเฟล็กเซอร์แบบผสม ได้สังเคราะห์โครงสร้างและสามารถกำหนดค่าตัวแปรต่างๆตามขั้นตอนดังนี้

1) ทำการการออกแบบท่อนำคลื่นวงกลม เพื่อให้เกิดการสั้นพ้องที่ความยาวคลื่นต้องการคำนวณประมาณค่าได้จาก

$$\lambda_m \approx \frac{2\pi n_{eff} R_d}{m}$$

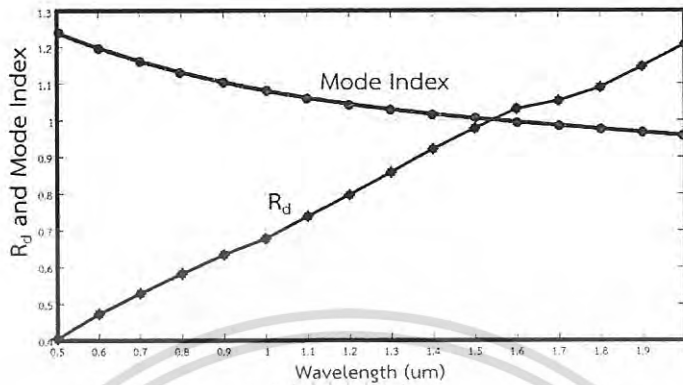
เมื่อ	λ_m	คือ ความยาวคลื่นสั้นพ้องที่ต้องการ
	n_{eff}	คือ ค่าดัชนีหักเหในท่อนำคลื่นจากการคัปปลิงด้วยโลหะ
	R_d	คือ รัศมีของวงแหวนสั้นพ้อง
	m	คือ โหมดของคลื่น

โดยขนาดของวงแหวนมีขนาดเพิ่มมากขึ้นลักษณะของ FDTD ของสัญญาณที่คัปปลิงจะแบ่งได้สองช่วงคือ

- ขนาด $R_d <$ ความยาวคลื่นโหมดของคลื่นเกิดการกระจายที่สูงโดยสามารถคัปปลิงสัญญาณไปทั้งทรูพอร์ตและ ดรอพพอร์ต
- ขนาด $R_d >$ ความยาวคลื่นโหมดของคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงโดยจะทำการคัปปลิงเข้าในวงแหวนมากขึ้น หาได้จาก λ_m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อความสะดวกในการออกแบบสามารถสรุปการหาความสัมพันธ์ระหว่าง โหมดของคลื่นกับความยาวคลื่นดังรูปที่ 5.1 และขนาดของวงแหวนกับความยาวคลื่นดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.1 การเปรียบเทียบโหมดของคลื่นและรัศมีของวงแหวนเมื่อเปลี่ยนความยาวคลื่น

2) ค่าการเคลื่อนที่ของคลื่นในท่อนำคลื่นจะเคลื่อนที่ไประหว่างรอยต่อการคับปลิงพลาสมอนิกของวัสดุทั้งสองชนิดหาได้จาก

$$\epsilon_r = \epsilon_{r\infty} + \frac{\omega_p^2}{j\Gamma\omega - \omega^2}$$

- เมื่อ ω_p คือ ความถี่พลาสมา
 ω คือ ความถี่ Plasma Relaxation
 ϵ_r คือค่าไดอิเล็กทริกของการสั่นพ้องของวัสดุ
 $\epsilon_{r\infty}$ คือค่าไดอิเล็กทริกของการสั่นพ้องของวัสดุที่ ∞

3) ค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระหาได้จาก

$$FSR = \Delta\lambda = \frac{2\pi}{R_d} \left(\frac{\partial\beta}{\partial\lambda} \right)^{-1} \approx \frac{\lambda^2}{n_{eff} R_d}$$

- เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นสั่นพ้อง
 n_{eff} คือ ค่าดัชนีหักเหในท่อนำคลื่นจากการคับปลิงด้วยโลหะ
 R_d คือ รัศมีของวงแหวนสั่นพ้อง
 β คือ ระยะการแพร่กระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ค่าประสิทธิภาพกำลังงานสูงสุดครั้งคลื่น หาได้จาก

$$FWHM \approx \frac{\kappa_{spp}^2 \lambda^2}{\pi R_d n_{eff}}$$

เมื่อ κ_{spp} คือ สัมประสิทธิ์การคัปปลิงพลาสมอนิก

5) ค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพหาได้จาก

$$Q = \frac{\lambda}{2\delta\lambda} = \pi \frac{Ln_{eff}}{\lambda} \cdot \frac{t}{1-t^2} \approx \frac{Ln_{eff}}{\lambda} F$$

เมื่อ F คือ ค่าความแยกชัด

6) ทำการการออกแบบความกว้างของท่อนำคลื่น w ทั้งท่อตรงและท่อบงกกลมเพื่อให้สามารถส่งคลื่นในโหมดที่ต้องการได้ สามารถหาได้จากสมการ

$$w = \frac{\lambda}{2\beta} = \frac{\lambda}{2 \left(\kappa_{spp} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}} \right)}$$

เมื่อ w คือ ความกว้างของหน้าตัดท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ϵ_m คือ ค่าคงที่ความยอมไฟฟ้าของโลหะ

ϵ_d คือ ค่าคงที่ความยอมไฟฟ้าของไดอิเล็กทริก

ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ ได้ค่า $w=0.387 \mu m$ จึงเลือกใช้ขนาดความกว้างของท่อจัตุรัสเป็น $0.4 \mu m$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 การสังเคราะห์ตัวแปรต่างที่ออกแบบได้จากความยาวคลื่นทำงาน

Wavelength	Mode	R_d	FSR	Beta	w	FWHM	Q
0.5	1.26	0.402813	2.497525	1.414214	0.095447	115247.4	0.125
0.55	1.255	0.441336	2.758223	1.3484	0.10541	114790.1	0.1375
0.6	1.23	0.471867	3.070128	1.290994	0.11733	112503.4	0.15
0.65	1.2	0.498721	3.409121	1.240347	0.130285	109759.5	0.1625
0.7	1.18	0.528133	3.733588	1.195229	0.142685	107930.1	0.175
0.75	1.16	0.556266	4.069243	1.154701	0.155512	106100.8	0.1875
0.8	1.14	0.58312	4.416675	1.118034	0.16879	104271.5	0.2
0.85	1.25	0.679348	4.279759	1.084652	0.163558	114332.8	0.2125
0.9	1.1	0.632992	5.149442	1.054093	0.196794	100612.8	0.225
0.95	1.09	0.662084	5.485389	1.025978	0.209633	99698.18	0.2375
1	1.06	0.677749	5.937512	1	0.226911	96954.19	0.25
1.05	1.055	0.70828	6.263934	0.9759	0.239386	96496.86	0.2625
1.1	1.05	0.738491	6.593466	0.953463	0.25198	96039.53	0.275
1.15	1.044	0.767647	6.932784	0.932505	0.264947	95490.73	0.2875
1.2	1.04	0.797954	7.262034	0.912871	0.27753	95124.87	0.3
1.25	1.035	0.827206	7.601163	0.894427	0.29049	94667.54	0.3125
1.3	1.032	0.857801	7.928189	0.877058	0.302988	94393.14	0.325
1.35	1.031	0.88993	8.241105	0.860663	0.314947	94301.67	0.3375
1.4	1.029	0.9211	8.562942	0.845154	0.327246	94118.74	0.35
1.45	1.024	0.949361	8.912066	0.830455	0.340589	93661.41	0.3625
1.5	1.02	0.978261	9.255533	0.816497	0.353715	93295.54	0.375
1.55	1.013	1.003932	9.63014	0.803219	0.368031	92655.28	0.3875
1.6	1.01	1.033248	9.970317	0.790569	0.381031	92380.88	0.4
1.65	0.98	1.033887	10.59664	0.778499	0.404967	89636.89	0.4125
1.7	0.97	1.054348	11.03031	0.766965	0.42154	88722.23	0.425
1.75	0.96	1.074169	11.473	0.755929	0.438459	87807.57	0.4375
1.8	0.947	1.089898	11.9628	0.745356	0.457177	86618.51	0.45
1.85	0.946	1.11899	12.3081	0.735215	0.470373	86527.04	0.4625
1.9	0.945	1.148018	12.65413	0.725476	0.483597	86435.58	0.475
1.95	0.09445	0.117761	129.94	0.716115	4.965862	8638.984	0.4875
2	0.944	1.207161	13.33424	0.707107	0.509589	86344.11	0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 แนวทางในการศึกษาวิจัยในอนาคต

เนื่องจากปริมาณความต้องการใช้ทางด้านการสื่อสารข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้นอย่างสูงในปัจจุบันส่วนใหญ่เกิดจากความต้องการใช้งานด้านการสื่อสารข้อมูลมัลติมีเดียที่ตอบสนองต่อผู้ใช้ได้อย่างสะดวก รวดเร็ว ผ่านอุปกรณ์สื่อสารเคลื่อนที่สมัยใหม่ เช่น โทรศัพท์มือถือ แท็บเล็ต หรือคอมพิวเตอร์แบบพกพา สามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ฐานข้อมูลอินเทอร์เน็ตได้ทุกที่ทุกเวลาผ่านโครงข่ายการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพสูง ความสามารถในการให้บริการได้ตลอดเวลาของโครงข่ายการสื่อสารจะมีความสำคัญอย่างมาก เพื่อสามารถมั่นใจได้ว่าโครงข่ายการสื่อสารจะสามารถให้บริการได้ตลอดเวลา ในการพิจารณาระบบโครงสร้างสามารถนำไปประยุกต์ได้หลายแอปพลิเคชัน เช่น ควอนตัมคอมพิวเตอร์ การสร้างวงจรรวมเชิงแสง วงจรเทอโมอิเล็กทริกคัปปลิง สายอากาศขนาดนาโน เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] C.F. Lam, "Passive Optical Networks: Principles and Practice," *Elsevier Press* (2007).
- [2] S. Feller, "Moving to GPON," *Int. Eng. consort.*, Vol. 1, June 2006.
- [3] Y. J. Stein and Z. Eitan, "Ethernet Passive Optical Networks," *RAD Commun.*, May 2007.
- [4] D. Goutam, B. Lannoo, D. Colle, M. Pickavet, and P. Demeester, "A hybrid WDM/TDM PON architecture using wavelength selective switches," *IEEE 4th Int. Symp. Adv. Netw. Telecomm. Sys. (ANTS 2010)*, pp. 52-54, 2010.
- [5] A. Banerjee, Y. Park, F. Clarke, H. Song, S. Yang, G. Kramer, K. J. Kim, and B. Mukherjee, "Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: a review," *J. Opt. Netw.*, Vol. 4, No. 11, pp. 737-758, 2005.
- [6] I. B. Djordjevic, A. Stavdas, C. Skoufis, S. Sygletos, and C. Matrajidis, "Analytical Modeling of Fiber Nonlinearity in Amplified Dispersion Compensated WDM Systems," *Int. J. mod. sim.*, Vol.23, No. 4, pp. 226-232, 2003.
- [7] I. B. Djordjevic, B. Vasic, M. Ivkovic, and I. Gabitov, "Achievable Information Rates for High-Speed Long-Haul Optical Transmission," *J. Lightwave Technol.*, Vol.23, No.11, pp. 3755-3761, November 2005.
- [8] Y. S. Kivshar, G.P. Agrawal, "Optical Solitons : From Fibers to Photonic Crystals," *San Diego: Academic Press*, 540s, ISBN 0-12-410590-4, (2003).
- [9] K. Porsezian and V.C. Kuriakose, "Optical Solitons : Therotical and Experimentak challenges," *1st edition. Berlin : Springer*, 2003.
- [10] N. El Dahdah, D. S. Govan, M. Jamshidifar, N. J. Doran, and M. E. Marhic, "1-Tb/s DWDM Long-Haul Transmission Employing a Fiber Optical Parametric Amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 22, No. 15, August 1, 2010.
- [11] G. Kaur and B. R. Singh, "Performance Evaluation Of DWDM System Along With Consideration Of Soliton Pulses At 1550nm up to 1Tbps," *Int. J. Adv. Comp. Netw. (IJACN)*, Vol.1, No. 1, pp. 1-5, 2013.
- [12] Y. Meng, S. Zhang, H. Li, J. Du, Y. Hao, "Bright-dark soliton pairs in a self-mode locking fiber laser," *Opt. Eng.* Vol. 51, No. 6, pp. 064302, Jun 05, 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] V. M. Vyas, T. S. Raju, C. N. Kumar, and P. K. Panigrahi, "Soliton solutions of driven nonlinear Schrödinger equation," *J. Phys. A: Math. Gen.*, Vol. 39, pp. 9151, 2006.
- [14] L. Leng, B. Mikulla, M. Arend, and K. Bergman, "8-channel WDM soliton amplification and signal recovery," *24th EU. Conf. Opt. Commun.*, Vol.1, pp. 105-106, 1998.
- [15] Q. Y. Ning, S. K. Wang, A. P. Luo, Z. B. Lin, Z. C. Luo, and W. C. Xu, "Bright-Dark Pulse Pair in a Figure-Eight Dispersion-Managed Passively Mode-Locked Fiber Laser," *IEEE Photon. J.*, Vol.4, No.5, pp. 1647-1652, 2012.
- [16] A. V. Ramprasad and M. Meenakshi, "Performance of NRZ, RZ, CSRZ, and VSB-RZ modulation formats in the presence of four-wave mixing effect in DWDM optical systems," *J. Opt. Netw.*, Vol. 6, pp. 146-156, 2007.
- [17] Mu, R-M., and C. R. Menyuk. "Convergence of the chirped return-to-zero and dispersion managed soliton modulation formats in WDM systems," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 20, No. 4, pp. 608, 2002.
- [18] M. Kawachi, "Silica waveguides on silicon and their application to integrated components," *Opt. Quantum Electron.*, Vol. 22, pp. 391-416, 1990.
- [19] S. Suzuki, M. Yanagisawa, Y. Hibino, and K. Oda, "High-density integrated planar lightwave circuits using SiO₂-GeO₂ waveguides with a high refractive index difference," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 12, pp. 790-796, 1994.
- [20] A. G. Navarro, "Silica Waveguide Design and Fabrication using Integrated Optics: A Link to Optical VLSI Photonics Integration for Semiconductor Technology," *22nd Annu. Microelectron. Eng. Conf.*, pp. 68, May 2004.
- [21] F. D. Muhammad, C. Teeka, J. Ali, and P. P. Yupapin, "Optical spin manipulation using dark-bright soliton behaviors in a panda ring resonator," *Microwave Opt. Technol. Lett.* Vol. 54, pp. 987-990, 2012.
- [22] S. Glomglome, I. Srithanachai, C. Teeka, S. Mitatha, S. Niemcharoen, and P. P. Yupapin, "Optical spin generated by a soliton pulse in an add-drop filter for optoelectronic and spintronic," *Opt. Laser Technol.*, Vol. 44, pp. 1294-1297, 2012.
- [23] I. S. Amiri, S. E. Alavi, and J. Ali, "High-capacity soliton transmission for indoor and outdoor communications using integrated ring resonators," *Int. J. Commun. Syst.*, 2013.

- [24] S. Songmuang, S. Sappajak, N. Thammawongsa, N. Pornsuwancharoen, P.P. Yupapin, "Multi Wavelength Generated by PANDA Ring Resonator for Multi User DWDM WiMAX Network," *Advanced Materials Research*, Vol. 979, pp. 471-478, 2014.
- [25] K. Sarapat, N. Sangwara, K. Srinuanjan, P.P. Yupapin, and N. Pornsuwancharoen, "Novel dark-bright optical solitons conversion system and power amplification," *Opt. Eng.*, Vol. 48, pp. 045004-7, 2009.
- [26] OptiSystem and OptiBPM, Available: <http://www.optiwave.com>
- [27] N. Thammawongsa, S. Mitatha, P.P. Yupapin, "Optical Spins and Nano-Antenna Array for Magnetic Therapy," *IEEE Trans. NanoBiosci.*, Vol.12, No.3, pp. 228-232, Sept. 2013.
- [28] A. V. Krasavin and A.V. Zayats, "Silicon-based plasmonic waveguides," *Opt. Express*, Vol. 18, pp. 11791-11799, 2010.
- [29] A. Hohenau, J. R. Krenn, A. L. Stepanov, A. Drezet, H. Ditlbacher, B. Steinberger, A. Leitner, and F. R. Aussenegg, "Dielectric optical elements for surface plasmons," *Opt. Lett.*, Vol. 30, pp. 893, 2005.
- [30] P. Berini, "Long-range surface plasmon-polaritons," *(OSA) Advances in Optics and Photonics*, Vol. 1, pp. 484-588, 2009.
- [31] A. Boltasseva, T. Nikolajsen, K. Leosson, K. Kjaer, M. S. Larsen, S. I. Bozhevolnyi, "Integrated optical components utilizing long-range surface plasmon polaritons," *J. Lightwave Tech.*, Vol. 23, pp. 413-422, 2005.
- [32] C. Min and G. Veronis, "Absorption switches in metal-dielectric-metal plasmonic waveguides," *Opt. Exp.*, Vol. 17, No. 13, pp. 10757-10766, 2009.
- [33] S. A. Maier, "Plasmonics: Fundamentals and Applications," *Springer Science*, 2007.
- [34] M. Z. Alam, J. Meier, J. S. Aitchison, M. Mojahedi, "Propagation characteristics of hybrid modes supported by metal-low-high index waveguides and bends," *Opt. Express*, Vol. 18, pp. 12971-12979, 2010.
- [35] R. F. Oulton, V. J. Sorger, D. A. Genov, D. F. P. Pile, X. Zhang, "A hybrid plasmonic waveguide for subwavelength confinement and long-range propagation," *Nature Photon.* Vol. 2, pp. 496-500, 2008.
- [36] D. Dai, S. He, "A silicon-based hybrid plasmonic waveguide with a metal cap for a nanoscale light confinement," *Optics Express*, Vol. 17, Issue 19, pp. 16646-16653, 2009.

- [37] R.F. Oulton, V.J. Sorger, D.A. Genov, D.F.P. Pile, X. Zhang, "A hybrid plasmonic waveguide for subwavelength confinement and long-range propagation," *Nature Photonics*, Vol. 2, pp. 496–500, 2008.
- [38] L. Zhou, X. Sun, X. Li and J. Chen, "Miniature Microring Resonator Sensor Based on a Hybrid Plasmonic Waveguide," *Sensors*, Vol. 11, pp. 6856-6867, 2011.
- [39] E. Bartholin. "An account of sundry experiments made and communicated by that learn'd mathematician Dr. Erasmus Bartholin, upon a chrysal-like body, sent to him out of Island," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol.5, pp. 2039-2048, 1670.
- [40] D.S. Ly-Gagnon, K. C. Balram, J. S. White, P. Wahl, M. L. Brongersma, and D. A. B. Miller, "Routing and photodetection in subwavelength plasmonic slot waveguides," *Nanophotonics* 1(1), pp. 9–16, 2012.
- [41] N. Thammawongsa, N. Moongfangklang, S. Mitatha, and P. P. Yupapin, "novel nano-antenna system design using photonic spin in a PANDA ring resonator," *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 31, pp. 75-87, 2012.
- [42] P. Berini, "Long-range surface plasmon-polaritons," *(OSA) Advances in Optics and Photonics*, Vol. 1, pp. 484-588, 2009.
- [43] A. Boltasseva, T. Nikolajsen, K. Leosson, K. Kjaer, M. S. Larsen, S. I. Bozhevolnyi, "Integrated optical components utilizing long-range surface plasmon polaritons," *J. Lightwave Tech.*, Vol. 23, pp. 413-422, 2005.
- [44] A. V. Krasavin and A.V. Zayats, "Silicon-based plasmonic waveguides," *Opt. Express*, Vol. 18, pp. 11791-11799, 2010.
- [45] G. Veronis and S. Fan, "Guided subwavelength plasmonic mode supported by a slot in a thin metal film," *Opt. Lett.*, Vol. 30, pp. 3359-3361, 2005.
- [46] E. Feigenbaum and M. Orenstein, "Modeling of Complementary Plasmon Waveguiding," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 25, Issue 9, pp. 2547-2562, 2007.
- [47] N. Thammawongsa, F.D. Zainol, S. Mitatha, J. Ali, and P.P. Yupapin, "Nanorobot Controlled by Optical Tweezer Spin for Microsurgical Use," in *Nanotechnology, IEEE Transactions*, Vol. 12, No.1, pp. 29-34, Jan. 2013.
- [48] M. Z. Alam, J. Meier, J. S. Aitchison, M. Mojahedi, "Propagation characteristics of hybrid modes supported by metal-low-high index waveguides and bends," *Opt. Express*, Vol. 18, pp. 12971-12979, 2010.

- [49] J. Xiao, J. Liu, Z. Zheng, Y. Bian and G. Wang, "Design and analysis of a nanostructure grating based on a hybrid plasmonic slot waveguide," *Journal of Optics*, Vol. 13, 2011.
- [50] M. Z. Alam, J. S. Aitchison, and M. Mojahedi, "Compact and silicon-on-insulator compatible hybrid plasmonic TE-pass polarizer," *Optics Letters*, Vol. 37, pp. 55-57, 2012.
- [51] M. Z. Alam, J. S. Aitchison, and M. Mojahedi, "Compact hybrid TM-pass polarizer for silicon-on-insulator platform," *Applied Optics*, Vol. 50, pp. 2294-2298, 2011.
- [52] E. A. J. Marcatili. "Bends in Optical Guides," *Bell Systems Technical Journal*, Vol. 48(21), pp. 2103-2132, September 1969.
- [53] E. A. J. Marcatili. "Dielectric Rectangular Waveguide and Directional Coupler for Integrated Optics," *Bell Systems Technical Journal*, Vol. 48(21), pp. 2071-2102, September 1969
- [54] S.C. Hagness, D. Rafizadeh, S.T. Ho and A. Taflove. "FDTD Microcavity Simulations: Design and Experimental Realization of Waveguide-Coupled Single-Mode Ring and Whispering-Gallery-Mode Disk Resonators," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15(11), pp. 2145-2165, November 1997.
- [55] D.R. afizadeh, J. P. Zhang, S. C. Hagness, A. Taflove, K. A. Stair, S. T. Ho, and R. C. Tiberio. "Waveguide-coupled AlGaAs/GaAs microcavity ring and disk resonators with high finesse and 21.6 nm free spectral range," *Optics Letters*, Vol. 22(16), pp. 1244-1246, August 1997.
- [56] B. E. Little, J. S. Foresi, G. Steinmeyer, E. R. Thoen, S. T. Chu, H. A. Haus, E. P. Ippen, L. C. Kimerling and W. Greene, "Ultra-Compact Si-SiO₂ Microring resonator Optical Channel Dropping Filters," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 10(4), pp. 549-551, April 1998.
- [57] D. J. W. Klunder, E. Krioukov, F.S. Tan, T. van der Veen, H.F. Bulthuis, G. Sengo, C. Otto, H.J.W.M. Hoekstra and A. Driessen. "Vertically and laterally waveguide-coupled cylindrical microring resonators in Si₃N₄ on SiO₂ technology," *Applied Physics B*, Vol. 73(5-6), pp. 603-608, November 2001.
- [58] B. Vanderhaegen et al., "High Q GaInAsP ring resonator filters," *ECIO'99, Torino Italy*, pp. 381-384, April 1999.

- [59] M. K. Chin, C. Youtsey, W. Shao, T. Pierson, Z. Ren, S. L. Wu, L. Wang, Y. G. Zhao and S. T. Ho. "GaAs Microcavity Channel-Dropping Filter based on a Race-Track Resonator," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 11(12), pp. 1620-1622, December 1999.
- [60] Dominik G. Rabus. 2002. "Realization of Optical Filters using Ring Resonators with Integrated Semiconductor Optical Amplifiers in GaInAsP/InP," *Ph.D. Thesis of Electronic and Informatics Technician University Berlin, 2002.*
- [61] G. N. Nielson, D. Seneviratne, F. Lopez-Royo, P. T. Rakich, Y. Avrahami, M. R. Watts, H. A. Haus, H. L. Tuller, and G. Barbastathis, "Integrated wavelengthselective optical MEMS switching using ring resonator filters," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 17, pp. 1190-1192, Jun 2005.
- [62] K. Djordjev, S. J. Choi, S. J. Choi, and P. D. Dapkus, "Vertically coupled InP microdisk switching devices with electroabsorptive active regions," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 14, pp. 1115-1117, Aug 2002.
- [63] K. Djordjev, S. J. Choi, S. J. Choi, and P. D. Dapkus, "Gain trimming of the resonant characteristics in vertically coupled InP microdisk switches," *Applied Physics Letters*, Vol. 80, pp. 3467-3469, May 2002.
- [64] K. Djordjev, C. Seung-June, C. Sang-Jun, and P. D. Dapkus, "Active semiconductor microdisk switching devices utilizing gain and electroabsorption effects," in *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit. OFC*, pp. FA2-1-FA2-3, 2002.
- [65] P. Rabiei, W. H. Steier, Z. Cheng, W. Chuan-guang, and H. J. Lee, "Polymer micro-ring modulator with 1THz FSR," in *Technical Digest Summaries of Papers Presented at the Lasers and Electro-Optics, CLEO*, Vol.2, pp. CPDB8-1-CPDB8-3, 2002.
- [66] H. C. Tapalian, J. P. Laine, and P. A. Lane, "Thermo-optical switches using coated microsphere resonators," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 14, pp. 1118-1120, Aug 2002.
- [67] S. T. Chu, B. E. Little, V. Van, J. V. Hryniewicz, P. P. Absil, F. G. Johnson, D. Gill, O. King, F. Seiferth, M. Trakalo, and J. Shanton, "Compact full C-band tunable filters for 50 GHz channel spacing based on high order micro-ring resonators," in *Optical Fiber Communication Conference. OFC*, Vol. 2, pp. 3, 2004,
- [68] P. Kopperschmidt, "Tunable band gaps in electro-optical photonic bi-oriented crystals," *Applied Physics B-Lasers and Optics*, Vol. 73, pp. 717-720, Nov 2001.

- [69] Q. F. Xu, B. Schmidt, S. Pradhan, and M. Lipson, "Micrometre-scale silicon electro-optic modulator," *Nature*, Vol. 435, pp. 325-327, May 2005.
- [70] K. Djordjev, S. J. Choi, S. J. Choi, and P. D. Dapkus, "Microdisk tunable resonant filters and switches," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 14, pp. 828-830, Jun 2002.
- [71] A. L. Huston and J. D. Eversole, "Strain-sensitive elastic-scattering from cylinders," *Optics Letters*, Vol. 18, pp. 1104-1106, Jul 1993.
- [72] V. S. Ilchenko, P. S. Volikov, V. L. Velichansky, F. Treussart, V. Lefevre-Seguin, J. M. Raimond, and S. Haroche, "Strain-tunable high-Q optical microsphere resonator," *Optics Communications*, Vol. 145, pp. 86-90, Jan 1998.
- [73] W. von Klitzing, R. Long, V. S. Ilchenko, J. Hare, and V. Lefevre-Seguin, "Frequency tuning of the whispering-gallery modes of silica microspheres for cavity quantum electrodynamics and spectroscopy," *Optics Letters*, Vol. 26, pp. 166-168, Feb 2001.
- [74] W. M. J. Green, R. K. Lee, G. A. DeRose, A. Scherer, and A. Yariv, "Hybrid InGaAsP-InP Mach-Zehnder racetrack resonator for thermo-optic switching and coupling control," *Optics Express*, Vol. 13, pp. 1651-1659, Mar 2005.
- [75] M. C. M. Lee and M. C. Wu, "Tunable coupling regimes of silicon microdisk resonators using MEMS actuators," *Optics Express*, Vol. 14, pp. 4703-4712, May 2006.
- [76] L. Chen, N. Sherwood-Droz, and M. Lipson, "Compact bandwidth-tunable microring resonators," *Optics Letters*, Vol. 32, pp. 3361-3363, Nov 2007.
- [77] U. Levy, K. Campbell, A. Groisman, S. Mookherjea, and Y. Fainman, "On-chip microfluidic tuning of an optical microring resonator," *Applied Physics Letters*, Vol. 88, pp. 3, Mar 2006.
- [78] M. C. M. Lee and M. C. Wu, "MEMS-Actuated microdisk resonators with variable power coupling ratios," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 17, pp. 1034-1036, May 2005.
- [79] P. Youplao, N. Pornsuwancharoen, S. Mitatha and P. P. Yupapin. "New WDM bands using a Gaussian pulse within a nano-waveguide," *International Journal for Light and Electron Optics*, Vol. 122(16), pp. 1474-1477, August 2011.
- [80] Y. Kokubun, Y. Hatakeyama, M. Ogata, S. Suzuki and N. Zaizen. "Fabrication technologies for vertically coupled microring resonator with multilevel crossing

- busline and ultracompact-ring radius,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 11(1), pp. 4-10, 2005.
- [81] P.P. Yupapin, P. Saeung and C. Li. “Characteristics of complementary ring-resonator add/drop filters modeling by using graphical approach,” *Optics Communications*, Vol. 272(1), pp. 81–86, April 2007.
- [82] P.P. Yupapin and W. Suwancharoen. “Chaotic signal generation and cancellation using a micro ring resonator incorporating an optical add/drop multiplexer,” *Optics Communications*, Vol. 280(2), pp. 343-350, 2007.
- [83] L. Eldada, “Metro area network optical routers and technologies: FOADM, BOADM, ROADM, and TOADM,” *Proc. SPIE 6897, Optoelectronic Integrated Circuits X*, 68970Y, 2008.
- [84] Y. Tachikawa et al. “Arrayed-waveguide grating add-drop multiplexer with loop-back optical paths,” *Electronics Letters*, Vol. 29, pp. 2133-2134, 1993.
- [85] T. Mizuochi et al., “Interferometric crosstalk-free optical add/drop multiplexer using Mach-Zehnder-based fiber gratings,” *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 16, pp. 265-275, 1998.
- [86] A. V. Tran et al., “Optical add-drop multiplexers with low crosstalk,” *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 13, pp. 582-584, 2001.
- [87] H. Okamoto, K. Yamaguchi, M. Haraguchi, T. Okamoto, “Experimental demonstration of plasmonic racetrack resonators with a trench structure,” *Applied Physics B*, Vol. 108, pp. 149-152, 2012.
- [88] X. Chen, Y. Shi, F. Lou, Y. Chen, M. Yan, L. Wosinski, and M. Qiu, “Photothermally tunable silicon-microring-based optical add-drop filter through integrated light absorber,” *Opt. Express* 22, pp. 25233-25241, 2014.
- [89] M.C. Tien, S. Mathai, J. Yao, and M. C. Wu, “Tunable MEMS Actuated Microring Resonators,” *IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics, Hualien, Taiwan*, pp. 177-178, 2007.
- [90] A.E. Cetin, A.A. Yanik, A. Mertiri, S. Erramilli, Ö. E. Müstecaplıoğlu, and H. Altug. “Field-effect active plasmonics for ultracompact electro-optic switching,” *Applied Physics Letters* 101, No. 12, pp. 121113, 2012.

- [91] K. Yee “Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 14 (3), pp. 302–307, 1966.
- [92] A. Taflove and S. C. Hagness, “Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method,” 3rd ed. Artech House, 2005.
- [93] J. Berenger, “A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves,” *Journal of Computational Physics*, Vol. 114 (2), pp.185–200, 1994.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

โปรแกรมจำลองผล FDTD ด้วย MATLAB

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%
% "Coupling in a ring resonator structure"
%
%           The ring resonator structure consists of a dielectric
straight
% ridge waveguide with a ridged circular adjacent to it. Light is guided
through
% the straight waveguide and the coupling of light to the circular
waveguide
% from the straight waveguide causes light to accumulate in the circular
% waveguide.
%
%           In this program, a 3.05 micron X 3.6 micron domain is
taken
% with a 450 nm thick horizontal straight waveguide placed in the upper
part
% at a distance of 300 nm from the top. A 450 nm thick ridged circular
waveguide
% with a central radius of 1 micron is placed at a distance 100nm below
the
% straight waveguide. Both the waveguides are made of material of
relative
% permittivity 6. The surrounding area is free space of relative
permittivity
% 1. A sinusoidal source of light of free space wavelength 1.753 microns
is
% excited at the left end of the straight waveguide as a line source
along
% the width of the waveguide. Light is guided through the straight
waveguide
% and coupling into the circular waveguide and its accumulation in it is
% observed.
%
%           A color scaled plot of the Ez wave travelling through the
% waveguides is observed. A Perfectly Matched Layer boundary condition
is used
% for the simulation here. The epsilon profile of the platform is shown
in
% the background of the plot to give a feel for the location of the
travelling
% wave. The simulation can be stopped by closing this plot window or by
waiting
% till the plots for all the time steps are shown.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%
%Clearing variables in memory and Matlab command screen
clear all;
clc;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%Courant stability factor
S=1/(2^0.5);

% Parameters of free space (permittivity and permeability and speed of
% light) are all not 1 and are given real values
epsilon0=(1/(36*pi))*1e-9;
mu0=4*pi*1e-7;
c=3e8;

% Spatial grid step length (spatial grid step = 10 nm)
delta=10e-9;
% Temporal grid step obtained using Courant condition
deltat=S*delta/c;

%Total no of time steps
time_tot=10000;

% Grid Dimension in x (xdim) and y (ydim) directions
ydim=310;%The domain is 305 space steps or 360*0.01=3.6 microns long
xdim=800;%The domain is 310 space steps or 305*0.01=3.05 microns wide

%Free-space wavelength in microns
wav=1.55;

%Index of the periodic structures
index=6^0.5;

% Initialization of permittivity and permeability matrices
epsilon=epsilon0*ones(xdim,ydim);
mu=mu0*ones(xdim,ydim);

% Defining of the permittivity profile of the region:-

% Defining of the circular waveguide
xcord=zeros(xdim,ydim);
ycord=zeros(xdim,ydim);
for i=1:1:xdim
    ycord(i,:)=1:1:ydim;
end
for i=1:1:ydim
    xcord(:,i)=1:1:xdim;
end

%SmallRingLeft
epsilon(find((xcord-280*ones(xdim,ydim)).^2+(ycord-155*ones(xdim,ydim)).^2<50^2))=index*index*epsilon0;
epsilon(find((xcord-280*ones(xdim,ydim)).^2+(ycord-155*ones(xdim,ydim)).^2<20^2))=epsilon0;

%SmallRingRight
epsilon(find((xcord-520*ones(xdim,ydim)).^2+(ycord-155*ones(xdim,ydim)).^2<50^2))=index*index*epsilon0;
epsilon(find((xcord-520*ones(xdim,ydim)).^2+(ycord-155*ones(xdim,ydim)).^2<20^2))=epsilon0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%BigRing
epsilon(find((xcord-400*ones(xdim,ydim)).^2+(ycord-155*ones(xdim,ydim)).^2<80^2))=index*index*epsilon0;
epsilon(find((xcord-400*ones(xdim,ydim)).^2+(ycord-155*ones(xdim,ydim)).^2<50^2))=epsilon0;

% Defining of the straight waveguide
epsilon(:,55:85)=index*index*epsilon0;
epsilon(:,235:265)=index*index*epsilon0;

% Initialization of field matrices
Ez=zeros(xdim,ydim);
Ezx=zeros(xdim,ydim);
Ezy=zeros(xdim,ydim);
Hy=zeros(xdim,ydim);
Hx=zeros(xdim,ydim);

% Initializing electric conductivity matrices in x and y directions
sigmax=zeros(xdim,ydim);
sigmay=zeros(xdim,ydim);

%Perfectly matched layer boundary design
%Reference:-http://dougneubauer.com/wp-content/uploads/wdata/yee2dpml1/yee2d_c.txt
%(An adaptation of 2-D FDTD TE code of Dr. Susan Hagness)

%Boundary width of PML in all directions
bound_width=50;

%Order of polynomial on which sigma is modeled
gradingorder=6;

%Required reflection co-efficient
refl_coeff=2.2e-15;

%Polynomial model for sigma
sigmamax=(-log10(refl_coeff)*(gradingorder+1)*epsilon0*c)/(2*bound_width*delta);
boundfact1=((epsilon(round(xdim/2),bound_width)/epsilon0)*sigmamax)/((bound_width^gradingorder)*(gradingorder+1));
boundfact2=((epsilon(round(xdim/2),ydim-bound_width)/epsilon0)*sigmamax)/((bound_width^gradingorder)*(gradingorder+1));
boundfact3=((epsilon(bound_width,round(ydim/2))/epsilon0)*sigmamax)/((bound_width^gradingorder)*(gradingorder+1));
boundfact4=((epsilon(xdim-bound_width,round(ydim/2))/epsilon0)*sigmamax)/((bound_width^gradingorder)*(gradingorder+1));

x=0:1:bound_width;
for i=1:1:xdim
    sigmax(i,bound_width+1:-1:1)=boundfact1*((x+0.5*ones(1,bound_width+1)).^(gradingorder+1)-(x-0.5*[0 ones(1,bound_width)]).^(gradingorder+1));
    sigmax(i,ydim-bound_width+1:ydim)=boundfact2*((x+0.5*ones(1,bound_width+1)).^(gradingorder+1)-(x-0.5*[0 ones(1,bound_width)]).^(gradingorder+1));
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for i=1:1:ydim
    sigmay(bound_width+1:-
1:1,i)=boundfact3*((x+0.5*ones(1,bound_width+1)).^(gradingorder+1)-(x-
0.5*[0 ones(1,bound_width)]).^(gradingorder+1));
    sigmay(xdim-
bound_width:1:xdim,i)=boundfact4*((x+0.5*ones(1,bound_width+1)).^(gradin
gorder+1)-(x-0.5*[0 ones(1,bound_width)]).^(gradingorder+1));
end

%Magnetic conductivity matrix obtained by Perfectly Matched Layer
condition
%This is also split into x and y directions in Berenger's model
sigma_starx=(sigmax.*mu)./epsilon;
sigma_stary=(sigmay.*mu)./epsilon;

%Multiplication factor matrices for H matrix update to avoid being
calculated many times
%in the time update loop so as to increase computation speed
G=(mu-0.5*deltat*sigma_starx)./(mu+0.5*deltat*sigma_starx);
H=(deltat/delta)./(mu+0.5*deltat*sigma_starx);
A=(mu-0.5*deltat*sigma_stary)./(mu+0.5*deltat*sigma_stary);
B=(deltat/delta)./(mu+0.5*deltat*sigma_stary);

%Multiplication factor matrices for E matrix update to avoid being
calculated many times
%in the time update loop so as to increase computation speed
C=(epsilon-0.5*deltat*sigmax)./(epsilon+0.5*deltat*sigmax);
D=(deltat/delta)./(epsilon+0.5*deltat*sigmax);
E=(epsilon-0.5*deltat*sigmay)./(epsilon+0.5*deltat*sigmay);
F=(deltat/delta)./(epsilon+0.5*deltat*sigmay);

% Update loop begins
for n=1:1:time_tot

    %matrix update instead of for-loop for Hy and Hx fields
    Hy(1:xdim-1,1:ydim-1)=A(1:xdim-1,1:ydim-1).*Hy(1:xdim-1,1:ydim-
1)+B(1:xdim-1,1:ydim-1).*(Ezx(2:xdim,1:ydim-1)-Ezx(1:xdim-1,1:ydim-
1)+Ezy(2:xdim,1:ydim-1)-Ezy(1:xdim-1,1:ydim-1));
    Hx(1:xdim-1,1:ydim-1)=G(1:xdim-1,1:ydim-1).*Hx(1:xdim-1,1:ydim-1)-
H(1:xdim-1,1:ydim-1).*(Ezx(1:xdim-1,2:ydim)-Ezx(1:xdim-1,1:ydim-
1)+Ezy(1:xdim-1,2:ydim)-Ezy(1:xdim-1,1:ydim-1));

    %matrix update instead of for-loop for Ez field

    Ezx(2:xdim,2:ydim)=C(2:xdim,2:ydim).*Ezx(2:xdim,2:ydim)+D(2:xdim,2:ydim)
.*(-Hx(2:xdim,2:ydim)+Hx(2:xdim,1:ydim-1));

    Ezy(2:xdim,2:ydim)=E(2:xdim,2:ydim).*Ezy(2:xdim,2:ydim)+F(2:xdim,2:ydim)
.*(Hy(2:xdim,2:ydim)-Hy(1:xdim-1,2:ydim));

    % Source condition incorporating given free space wavelength 'wav'
    % and having a location at the left end of central waveguide just
    % after PML boundary
    tstart=1;
    N_lambda=wav*1e-6/delta;
    Ezx(100,55:85)=0.5*sin(((2*pi*(c/(delta*N_lambda))*(n-
tstart)*deltat)));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Ezy(100,55:85)=0.5*sin(((2*pi*(c/(delta*N_lambda))*(n-
tstart)*deltat)));

%ADD port feed
%Ezx(700,235:265)=0.5*sin(((2*pi*(c/(delta*N_lambda))*(n-
tstart)*deltat)));
%Ezy(700,235:265)=0.5*sin(((2*pi*(c/(delta*N_lambda))*(n-
tstart)*deltat)));

%Ezz=Ezxx+Ezyy;
Ez=Ezx+Ezy;
Hzxy=Hx+Hy;

%Movie type colour scaled image plot of Ez
figure(1);
h=imagesc(delta*(1:1:xdim)*1e+6,(delta*(1:1:ydim)*1e+6)',Ez',[-
1,1]);colorbar;
set(h,'AlphaData',2.5*epsilon'/epsilon0);
title(['\fontsize{20}Color-scaled image plot of Ez in ring resonator
with PML boundary and at time=',num2str(round(n*deltat*1e+15)), ' fs']);

getframe;

figure(2);
mesh(delta*(1:1:xdim)*1e+6,-(delta*(1:1:ydim)*1e+6)',Ez');
figure(3);
plot(delta*(1:1:xdim)*1e+6,Ezy');
figure(4);
plot((delta*(1:1:ydim)*1e+6)',Ezx');
figure(5);
mesh(delta*(1:1:xdim)*1e+6,-(delta*(1:1:ydim)*1e+6)',Hzxy');
figure(6);
mesh(delta*(1:1:xdim)*1e+6,-(delta*(1:1:ydim)*1e+6)',Ezx');
figure(7);
mesh(delta*(1:1:xdim)*1e+6,-(delta*(1:1:ydim)*1e+6)',Ezy');
figure(8);
plot(Hx',Hy');
figure(9);
plot(Ezx',Ezy');

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% END OF PROGRAM
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Acknowledgement
% Prof. Ananth Krishnan at 'computational.em.at.iit.madras@gmail.com'

% Copyright/Licensing :- For educational and research purposes only. No
% part of this program may be used for any financial benefit of any kind
% without the consent of the instructor of the course.

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.
ผลงานวิจัยตีพิมพ์

N Thammawongsa, FD Zainol, S Mitatha, J Ali, and P.P. Yupapin “ Nanorobot controlled by optical tweezer spin for microsurgical use”, *Nanotechnology, IEEE Transactions on*, Vol.12, no. 1, pp. 29 – 34, 2013.

N. Thammawongsa, S. Mitatha and P. P. Yupapin, "Optical Spins and Nano-Antenna Array for Magnetic Therapy," in *IEEE Transactions on NanoBioscience*, vol. 12, no. 3, pp. 228-232, Sept. 2013.

Nopparat Thammawongsa, Saysamone Soysouvanh, Khanthanou Luangxaysana, and Somsak Mitatha, “The Simulation of Surface Plasmon Polariton based Photonic Integrated Devices by Modified Add-Drop”, The 34th JSST Annual Concerence: International Conference on Simulation Technology (JSST2015), Toyama, Japan, 12-14 October 2015, pp. 118-124.

N. Thammawongsa, N. Moongfangklang, S. Mitatha, and P. P. Yupapin, "Novel nano-antenna system design using photonic spin in a panda ring resonator," *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 31, 75-87, 2012.

N. Thammawongsa , S. Mitatha , P. P. Yupapin , “An optical nano-antenna system design for radio therapeutic use”, *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology* , Vol. 41, Iss. 1, 2013.

ภาคผนวก ค.
ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายนพรัตน์ ธรรมวงษา
วัน เดือน ปีเกิด	11 กันยายน 2525
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 569 หมู่ 3 ต.สามพร้าว อ.เมือง จ.อุดรธานี 41000
อีเมลล์	nopthamma@gmail.com
ประวัติการศึกษา	-พ.ศ. 2544 จบการศึกษา ปริญญาบัตรวิชาชีพ ช่างอิเล็กทรอนิกส์ จากวิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี -ปี พ.ศ. 2546 จบการศึกษา ปริญญาบัตรวิชาชีพชั้นสูง คอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม จากวิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี -ปี พ.ศ. 2549 จบการศึกษา ปริญญาตรี วิศวกรรมโทรคมนาคม จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอม เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง -ปี พ.ศ. 2550 จบการศึกษา ปริญญาโท วิศวกรรมโทรคมนาคม จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอม เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง -ปี พ.ศ. 2550-ปัจจุบัน อาจารย์ประจำสาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
ประวัติการทำงาน	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้