

การออกแบบท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตรในย่านความยาวคลื่นเฉพาะ
และการประยุกต์ใช้

A DESIGN OF AN ASYMMETRIC Y-JUNCTION WAVEGUIDE IN SPECIFIC
OPTICAL WAVELENGTH AND ITS APPLICATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A DESIGN OF AN ASYMMETRIC Y-JUNCTION WAVEGUIDE IN SPECIFIC
OPTICAL WAVELENGTH AND ITS APPLICATION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY IN APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT OF PHYSICS SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2023

KMITL-2023-SC-M-030-024

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตรในย่านความยาวคลื่นเฉพาะและการประยุกต์ใช้
ชื่อนักศึกษา	นายพชร พงศ์วิศิษฐ์
รหัสประจำตัว	60605010
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.กิริยุทธ์ ศรีนวลจันทร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์(ร่วม)	ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลี้มสุวรรณ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาสมบัติการแยกแแสงของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรซึ่งมีลักษณะโครงสร้างแบบหนึ่งช่องสัญญาณขาเข้าและสองช่องสัญญาณขาออกซึ่งทำมุมกัน 45 องศา และมีข้อบกพร่องแบบโพรงอากาศที่บริเวณรอยต่อของช่องสัญญาณขาออกทั้งสอง โดยการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลาสำหรับคลื่นแสงในย่านความยาวคลื่น 1480 และ 1550 นาโนเมตร ผลการศึกษาพบว่าเมื่อข้อบกพร่องแบบโพรงอากาศมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 จนถึง 0.50 ไมโครเมตร จะทำให้สมบัติการแยกแแสงทั้งสองความยาวคลื่นของท่อนำคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงไป ความเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์แยกแแสงบนท่อนำคลื่นแสงซึ่งมีกำลังการแยกแแสงแบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตรได้ขึ้นอยู่กับขนาดของข้อบกพร่องและความยาวของคลื่นแสงดังข้อมูลที่แสดงในวิทยานิพนธ์นี้ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อข้อบกพร่องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.35 ไมโครเมตร และค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องดังกล่าวมีค่าเปลี่ยนแปลงไปในช่วง 1.00 จนถึง 2.50 จะทำให้สมบัติการแยกแแสงของท่อนำคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นในเทอมของเส้นโค้งพาราโบลา หากค่าดัชนีหักเหแสงดังกล่าวมีค่าเปลี่ยนแปลงไปในช่วง 1.00 จนถึง 1.50 จะทำให้สมบัติการแยกแแสงของท่อนำคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่เป็นเชิงเส้นซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับดัชนีหักเหแสงบนท่อนำคลื่นได้ดังข้อมูลที่แสดงในวิทยานิพนธ์นี้

คำสำคัญ : เซนเซอร์ทางแสง ท่อนำคลื่น ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา อุปกรณ์แยกแแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	A Design of an Asymmetric Y-junction Waveguide in Specific Optical Wavelength and Its Application
Student Name	Mr. Phachara Phongwisit
Student ID	60605010
Degree	Doctor of Philosophy (Applied Physics)
Department	Physics
Year	2023
Thesis Advisor	Keerayoot Srinuanjan, Ph.D.
Thesis Co-advisor	Professor Pichet Limsuwan, Ph.D.

Abstract

This thesis studies the optical splitting properties of an asymmetric Y-junction optical waveguide with an air hole defect between the one-input and two-output port, where the two-output port angle is 45 degrees. The simulation process used the commercial software with the Finite difference time domain method, OptiFDTD. The results with the operating wavelengths of 1480 and 1550 nm showed the optical splitting properties changes when a diameter of air hole defect changes in range of 0.20 to 0.50 micrometers. This could be applied to the optical waveguide splitter application, the uniformity and non-uniformity optical splitting powers depending on the defect size and optical wavelength as shown in detail. In addition, the optical splitting properties were changed in non-linear form, a parabola form when the refractive index of the defects is changed in the range of 1.00 to 2.50. The linear form is showed with the refractive index in the range of 1.00 to 1.50, which can be applied as a refractive index sensor as shown in this thesis research.

Keywords : Asymmetric Y-junction waveguide, FDTD method, Optical sensor, Optical splitter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.กฤษฎ์ ศรีนวลจันทร์ และศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลัมสุวรรณ ที่ได้กรุณาให้ความอนุเคราะห์เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์แก่ข้าพเจ้า รวมทั้งได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชภาคย์ จิตต์อารี, รองศาสตราจารย์ ดร.สีปัตรกุล สุชาติ, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เมตตา กิติวรรณ และอาจารย์ ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข ที่ได้ให้ความกรุณามาเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์นี้แก่ข้าพเจ้า และได้ให้คำแนะนำจนวิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์สุรชาติ กมลดีลก และคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้กรุณาให้ความรู้แก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษาในระดับปริญญาเอก

ขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้มอบทุนการศึกษาสำหรับการศึกษาในระดับปริญญาเอกแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณบิดามารดาตลอดจนครอบครัวของข้าพเจ้าที่ได้กรุณาให้การสนับสนุน และมอบโอกาสทางการศึกษาแก่ข้าพเจ้าเสมอมา

นายเพชร พงศ์วิสิษฐ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ท่อนำคลื่น.....	4
2.1.1 ท่อนำคลื่นแสง.....	4
2.1.2 ทศนศาสตร์เบื้องต้นของท่อนำคลื่นแสง.....	7
2.2 ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา.....	9
2.2.1 ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	9
2.2.2 ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา.....	11
2.2.3 โหมดการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นแสง.....	13
2.2.4 จำนวนโหมดการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นแสง.....	14
2.3 สัมประสิทธิ์คู่ควบ.....	15
2.4 การประยุกต์ใช้ท่อนำคลื่นแสงในงานด้านต่างๆ.....	18
2.4.1 งานด้านการสื่อสาร.....	18
2.4.2 งานด้านความปลอดภัย.....	21
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
2.5.1 อุปกรณ์แยกแสงบนท่อนำคลื่นแสงที่มีค่ากำลังการแยกแสงแบบสมกำลัง... ..	23
2.5.2 อุปกรณ์แยกแสงบนท่อนำคลื่นแสงที่มีค่ากำลังการแยกแสงแบบไม่สมกำลัง.....	25
2.5.3 ตัวตรวจจับบนท่อนำคลื่นแสง.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	29
3.1 การศึกษาสมบัติการส่องผ่านแสงของท่อนำคลื่นแสงแบบตรง.....	29
3.1.1 ลักษณะโครงสร้างและวัสดุของท่อนำคลื่นแสงแบบตรง.....	30
3.1.2 การสร้างแบบจำลองสำหรับท่อนำคลื่นแสงด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม เชิงเวลา.....	31
3.1.3 การวิเคราะห์สมบัติของท่อนำคลื่นแสงแบบตรง.....	36
3.2 การศึกษาสมบัติการส่องผ่านแสงของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววาย.....	38
3.2.1 ท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบสมมาตร.....	38
3.2.2 ท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตร.....	39
3.2.3 การวิเคราะห์สมบัติของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววาย.....	40
3.3 การศึกษาสมบัติการส่องผ่านแสงของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตร เมื่อมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกอยู่ที่บริเวณรอยต่อของช่องสัญญาณขาออก.....	41
3.3.1 ท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของ ข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก.....	42
3.3.2 ท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนี หักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก.....	43
3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมี ข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกอยู่ที่บริเวณรอยต่อของช่องสัญญาณขาออก....	43
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	46
4.1 ผลการวิจัยการศึกษาท่อนำคลื่นแสงแบบตรงและการอภิปรายผล.....	46
4.2 ผลการวิจัยการศึกษาท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายและการอภิปรายผล.....	48
4.2.1 ผลการวิจัยการศึกษาท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบสมมาตรและการ อภิปรายผล.....	48
4.2.2 ผลการวิจัยการศึกษาท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรและการ อภิปรายผล.....	51
4.3 ผลการวิจัยการศึกษาท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีข้อบกพร่อง รูปทรงกระบอกอยู่ที่บริเวณรอยต่อของช่องสัญญาณขาออกและการอภิปรายผล..	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.1 ผลการวิจัยและการอภิปรายผลการศึกษาที่นำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่ สมมาตรเมื่อมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกอยู่ที่บริเวณรอยต่อของช่อง สัญญาณขาออกและมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของข้อบกพร่องรูปทรง กระบอก.....	53
4.3.2 ผลการวิจัยและการอภิปรายผลการศึกษาที่นำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่ สมมาตรเมื่อมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกอยู่ที่บริเวณรอยต่อของช่อง สัญญาณขาออกและมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่อง รูปทรงกระบอก.....	62
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	73
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	73
5.1.1 สรุปผลการศึกษาที่นำคลื่นแสงแบบตรง.....	73
5.1.2 สรุปผลการศึกษาที่นำคลื่นแสงรูปตัววาย.....	73
5.1.3 สรุปผลการศึกษาที่นำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีข้อ บกพร่องรูปทรงกระบอกอยู่ที่บริเวณรอยต่อของช่องสัญญาณขาออก.....	74
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	76
5.2.1 การต่อยอดการออกแบบที่นำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตร.....	76
5.2.2 การต่อยอดเป็นอุปกรณ์ทางแสงจากที่นำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตร...	77
เอกสารอ้างอิง.....	78
ประวัติผู้เขียน.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสงในย่านความยาวคลื่นต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารด้วยแสง.....	18
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์แยกแสงที่มีค่ากำลังการแยกแสงแบบสมกำลังบนท่อนำคลื่นแสง.....	24
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์แยกแสงที่มีค่ากำลังการแยกแสงแบบไม่สมกำลังบนท่อนำคลื่นแสง.....	25
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวตรวจจับบนท่อนำคลื่นแสง.....	26
3.1 คุณสมบัติเฉพาะตัวของอินเดียมฟอสไฟด์.....	31
4.1 ผลที่ได้จากการศึกษาโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงแบบตรง.....	47
4.2 ค่าความเข้มแสงส่องผ่านและค่าการลดทอนของสัญญาณของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบสมมาตร.....	49
4.3 ค่าความเข้มแสงส่องผ่านและค่าการลดทอนของสัญญาณของท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตร.....	51
4.4 ค่าการส่องผ่านแสงและค่าการลดทอนสัญญาณเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก.....	53
4.5 ค่าเฉลี่ย ค่ามากที่สุด และค่าน้อยที่สุดของค่าการลดทอนของสัญญาณ.....	56
4.6 ขนาดของข้อบกพร่องที่เหมาะสมกับการนำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์แยกแสงที่มีค่ากำลังการแยกแสงแบบสมกำลัง.....	57
4.7 ขนาดของข้อบกพร่องที่เหมาะสมกับการนำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์แยกแสงที่มีค่ากำลังการแยกแสงแบบไม่สมกำลังสำหรับคลื่นแสงความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร.....	59
4.8 ขนาดของข้อบกพร่องที่เหมาะสมกับการนำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์แยกแสงที่มีค่ากำลังการแยกแสงแบบไม่สมกำลังสำหรับคลื่นแสงความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร.....	61
4.9 ค่าการส่องผ่านแสงและค่ากำลังการแยกแสงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกในช่วง 1.00 จนถึง 2.50.....	63
4.10 ค่าการส่องผ่านแสงและค่ากำลังการแยกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกในช่วง 1.00 จนถึง 1.50.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างทางแสงต่าง ๆ	5
2.2 โครงสร้างเบื้องต้นของท่อนำคลื่นแสง.....	5
2.3 โครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงแบบสี่เหลี่ยมแบบต่าง ๆ	6
2.4 การสะท้อนกลับหมดภายในตัวกลาง.....	8
2.5 ปฏิกิริยาการกักแสงภายในตัวกลาง.....	9
2.6 ลักษณะของ Yee-lattice ในปริภูมิสามมิติ.....	11
2.7 ขั้นตอนโดยสังเขปของการคำนวณตามระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่องเชิงเวลา.....	13
2.8 ลักษณะการสั้นของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	13
2.9 แผนภาพเครือข่ายแบบสองช่องสัญญาณ.....	15
2.10 แผนภาพเครือข่ายสำหรับท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตร.....	17
2.11 แผนภาพการทำงานของอุปกรณ์เชิงแสง.....	19
2.12 โครงสร้างของอุปกรณ์แยกแสงที่เป็นที่นิยม.....	20
2.13 ท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตร.....	21
2.14 ความเปลี่ยนแปลงของคลื่นแสงที่นิยมนำมาใช้ในตัวตรวจจับทางแสง.....	22
3.1 ท่อนำคลื่นแสงแบบตรง.....	30
3.2 หน้าต่างสำหรับกำหนดค่าสมบัติเริ่มต้นภายในโปรแกรม OptiFDTD Designer.....	32
3.3 หน้าต่างสำหรับการกำหนดสมบัติของโครงสร้างท่อนำคลื่นภายในโปรแกรม OptiFDTD Designer.....	32
3.4 หน้าต่างสำหรับการกำหนดสมบัติของสนามคลื่นแสงขาเข้าภายในโปรแกรม OptiFDTD Designer.....	33
3.5 หน้าต่างสำหรับการกำหนดสมบัติของจุดสังเกตภายในโปรแกรม OptiFDTD Designer....	33
3.6 หน้าต่างการทำงานภายในโปรแกรม OptiFDTD Analyzer.....	34
3.7 ค่าที่จุดสังเกตสามารถบันทึกได้ภายในโปรแกรม OptiFDTD Analyzer.....	35
3.8 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม OptiFDTD.....	35
3.9 การเปรียบเทียบค่าการลดทอนของสัญญาณระหว่างหน่วยเปอร์เซ็นต์ (Percentage) กับหน่วยเดซิเบล (Decibel : dB).....	37
3.10 ลักษณะโครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบสมมาตร.....	39
3.11 ลักษณะโครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตร.....	40
3.12 ท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก.....	42
3.13 ลักษณะของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง.	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 ลักษณะของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสง.....	43
3.15 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสีนใจกับลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลแบบต่าง ๆ	45
4.1 แผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน $Y (E_y)$ ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่น แสงแบบตรงที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร.....	47
4.2 แผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน $Y (E_y)$ ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่น แสงแบบตรงที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร.....	47
4.3 แผนภาพแสดงโหมดการเคลื่อนที่ของคลื่นแสงที่บริเวณช่องสัญญาณขาเข้าและขาออก ของโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงแบบตรง.....	48
4.4 แผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน $Y (E_y)$ ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่น แสงรูปตัววายแบบสมมาตรที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร.....	50
4.5 แผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน $Y (E_y)$ ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่น แสงรูปตัววายแบบสมมาตรที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร.....	50
4.6 แผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน $Y (E_y)$ ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่น แสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร.....	52
4.7 แผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน $Y (E_y)$ ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่น แสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร.....	52
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงส่องผ่านและขนาดของข้อบกพร่องรูป ทรงกระบอก.....	55
4.9 แผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (E_y) ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววาย แบบไม่สมมาตรซึ่งมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกขนาด 0.35 ไมโครเมตร และมีค่ากำลัง การแยกแสงแบบสมกำลังที่มีความยาวคลื่นแสง 1480 นาโนเมตร.....	58
4.10 แผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (E_y) ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววาย แบบไม่สมมาตรซึ่งมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกขนาด 0.35 ไมโครเมตร และมีค่ากำลัง การแยกแสงแบบสมกำลังที่มีความยาวคลื่นแสง 1550 นาโนเมตร.....	58
4.11 แผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (E_y) ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววาย แบบไม่สมมาตรซึ่งมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกขนาด 0.42 ไมโครเมตร และมีค่ากำลัง การแยกแสงในอัตรา 1 ต่อ 2 ที่ความยาวคลื่นแสง 1480 นาโนเมตร.....	60
4.12 แผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (E_y) ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววาย แบบไม่สมมาตรซึ่งมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกขนาด 0.28 ไมโครเมตร และมีค่ากำลัง การแยกแสงในอัตรา 4 ต่อ 3 ที่ความยาวคลื่นแสง 1480 นาโนเมตร.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 แผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (E_r) ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรซึ่งมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกขนาด 0.45 ไมโครเมตร และมีค่ากำลังการแยกแสงในอัตรา 5 ต่อ 2 ที่ความยาวคลื่นแสง 1550 นาโนเมตร.....	62
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงส่องผ่านและค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก.....	64
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังการแยกแสงและค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก.....	65
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังการแยกแสงและค่าดัชนีหักเหแสงที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วง 1.00 จนถึง 1.50 ของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก.....	68
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังการแยกแสงที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ และค่ากำลังการแยกแสงที่ได้จากคำนวณค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบกับค่าดัชนีหักเหแสงที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วง 1.00 จนถึง 2.50 ของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก.....	70
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังการแยกแสงที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ และค่ากำลังการแยกแสงที่ได้จากคำนวณค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบกับค่าดัชนีหักเหแสงที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วง 1.00 จนถึง 1.50 ของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ท่อนำคลื่นแสง (Optical waveguide) เป็นอุปกรณ์เชิงแสง (Optical devices) ชนิดหนึ่งซึ่งมีความสำคัญมากในวงจรรวมเชิงแสง ท่อนำคลื่นแสงทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงภายในวงจรรวมเชิงแสง (Optical integrated circuits) โดยการนำความรู้ทางด้านทัศนศาสตร์ (Optics) มาประยุกต์เข้ากับศาสตร์ในด้านอื่น ๆ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อการควบคุมพฤติกรรมของแสง หรือโฟตอน (Photon) ให้เป็นไปตามที่ได้รับการออกแบบไว้โดยอาศัยการสะท้อนกลับหมดภายใน (Total internal reflection) ซึ่งอาศัยความแตกต่างกันของค่าดัชนีหักเหแสง (Refractive index) ของตัวกลางที่แสงเดินทางผ่านในสองบริเวณเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการกักแสง (Optical confinement) โดยบริเวณที่แสงเดินทางจะเป็นวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหแสงสูงซึ่งถูกเรียกว่า แกนกลาง (Core) ถูกห้อมล้อมด้วยวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหแสงต่ำกว่าเรียกว่าเปลือกหุ้ม (Cladding)

ท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบสมมาตร (Symmetric Y-junction waveguide) เป็นโครงสร้างแบบหนึ่งของท่อนำคลื่นแสงที่นิยมนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์แยกแสง (Optical splitter) สำหรับงานในด้านการสื่อสารด้วยแสง เนื่องจากโครงสร้างดังกล่าวสามารถแบ่งคลื่นแสงที่เดินทางผ่านออกเป็นสองส่วนซึ่งมีค่ากำลังการแยกแสง (Splitting ratio) ที่มีความเข้มแสงเท่ากัน หรือมีความเข้มแสงแบบสมก้ำล้ง (Uniformity output) ได้ ในขณะที่โครงสร้างของท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตร (Asymmetric Y-junction waveguide) สามารถแบ่งคลื่นแสงออกให้มีความเข้มแสงไม่เท่ากัน หรือมีความเข้มแสงแบบไม่สมก้ำล้ง (Non-uniformity output) ได้ตามที่ต้องการออกแบบ

ปัญหาและอุปสรรคที่สำคัญในการนำเอาท่อนำคลื่นรูปตัววายมาประยุกต์ใช้ในงานด้านวงจรรวมทางแสง คือ ขนาดของโครงสร้างท่อนำคลื่นรูปตัววายทั้งสองลักษณะเป็นอุปสรรคสำคัญในการพัฒนาท่อนำคลื่นรูปตัววายให้เหมาะสมกับการใช้งานในด้านการสื่อสารด้วยแสง เนื่องจากในปัจจุบันโครงสร้างดังกล่าวมีขนาดใหญ่กว่า 1×10^3 ตารางไมโครเมตร (μm^2) ทำให้ยากต่อการนำไปใช้งานจริง นอกจากนี้โครงสร้างท่อนำคลื่นรูปตัววายแต่ละลักษณะยังสามารถแบ่งคลื่นแสงได้เพียงค่ากำลังการแยกแสงเดียวตามที่ต้องการออกแบบไว้เท่านั้น จึงทำให้การนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรรวมทางแสงที่ต้องการค่ากำลังการแยกแสงหลายค่าต้องใช้โครงสร้างท่อนำคลื่นรูปตัววายที่มีลักษณะแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสง (Optical transmission) ของท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตรซึ่งมีลักษณะโครงสร้างแบบหนึ่งช่องสัญญาณขาเข้า (Input port) และสองช่องสัญญาณขาออก (Output port) ซึ่งทำมุมกัน 45 องศา โดยโครงสร้างท่อนำคลื่นดังกล่าวมีขนาด 64 ตารางไมโครเมตร เมื่อมีคลื่นแสงในย่านความยาวคลื่น 1480 และ 1550 นาโนเมตร เคลื่อนที่ผ่านโดยการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา (Finite difference time domain : FDTD) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่ากำลังการแยกแสง (Splitting ratio) ที่เกิดความเปลี่ยนแปลงเมื่อข้อบกพร่องแบบโพรงอากาศซึ่งมีขนาดแตกต่างกันถูกเพิ่มเข้าไปในโครงสร้างท่อนำคลื่นที่บริเวณรอยต่อระหว่างช่องสัญญาณขาออกทั้งสอง รวมทั้งการนำความสัมพันธ์ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์แยกแสงบนท่อนำคลื่นซึ่งสามารถเลือกค่ากำลังการแยกแสงได้จากการกำหนดขนาดของข้อบกพร่องแบบโพรงอากาศ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกที่มีผลทำให้ค่ากำลังการแยกแสงเกิดความเปลี่ยนแปลง รวมทั้งการนำความสัมพันธ์ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับค่าดัชนีหักเหแสง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาสมบัติการแยกแสงของอุปกรณ์แยกแสงบนท่อนำคลื่นรูปตัววาย
- 2) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของข้อบกพร่องแบบโพรงอากาศภายในท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตรกับค่ากำลังการแยกแสงเพื่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์แยกแสงบนท่อนำคลื่นโดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์
- 3) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกภายในท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตรกับค่ากำลังการแยกแสงเพื่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับค่าดัชนีหักเหแสงบนท่อนำคลื่นโดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาสมบัติการแยกแสงของอุปกรณ์แยกแสงบนท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตร
- 2) ศึกษาผลของขนาดของข้อบกพร่องแบบโพรงอากาศที่มีต่อกำลังการแยกแสงของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตร และการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์แยกแสงบนท่อนำคลื่น
- 3) ศึกษาผลของค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกที่มีต่อกำลังการแยกแสงของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตร และการประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับค่าดัชนีหักเหแสงบนท่อนำคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงสมบัติการแยกแสงของอุปกรณ์แยกแสงบนท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตร
- 2) ทราบถึงผลกระทบของขนาดของข้อบกพร่องแบบโพรงอากาศที่มีต่อกำลังการแยกแสงของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตร และการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์แยกแสงบนท่อนำคลื่น
- 3) ทราบถึงผลกระทบของค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกที่มีต่อกำลังการแยกแสงของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตร และการประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับค่าดัชนีหักเหแสงบนท่อนำคลื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์การออกแบบท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตรในย่านความยาวคลื่นเฉพาะและการประยุกต์ใช้นี้เป็นการออกแบบท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตรที่ใช้ในย่านความยาวคลื่น 1480 และ 1550 นาโนเมตร โดยอาศัยการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา (Finite difference time domain : FDTD) เพื่อศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงของท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตรซึ่งมีโครงสร้างแบบหนึ่งช่องสัญญาณขาเข้าและสองช่องสัญญาณขาออก เมื่อมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกถูกเพิ่มเข้าไปยังบริเวณกึ่งกลางของช่องสัญญาณขาออกทั้งสอง โดยข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกที่ถูกเพิ่มเข้ามานี้จะถูกเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหรือค่าดัชนีหักเหแสง และการนำไปประยุกต์เข้ากับงานในด้านต่าง ๆ ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

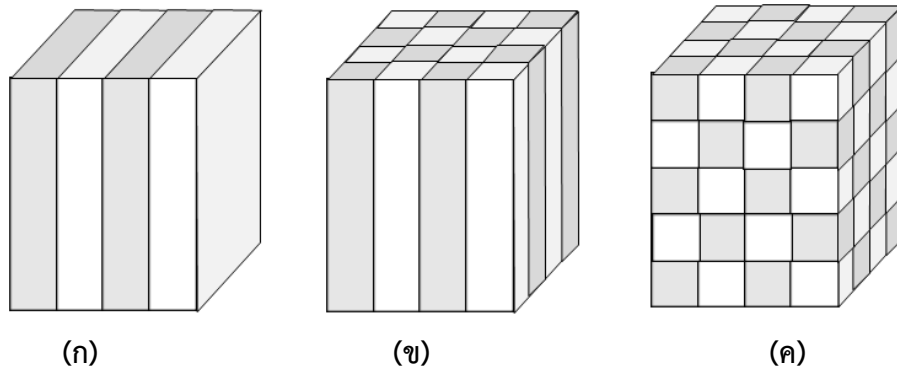
2.1 ท่อนำคลื่น

2.1.1 ท่อนำคลื่นแสง

ความรู้ความเข้าใจทางด้านทัศนศาสตร์ถูกนำมาประยุกต์เข้ากับวิทยาศาสตร์ในด้านอื่น ๆ จนเกิดเป็นศาสตร์ในด้านโฟโตนิกส์ (Photonics) [1-2] อันเป็นศาสตร์ในการสร้างและควบคุมแสงหรือโฟตอนให้มีพฤติกรรม หรือการเคลื่อนที่อันสอดคล้องกับความต้องการของมนุษย์ เช่น การให้กำเนิดแสงในย่านความยาวคลื่นที่ต้องการ การควบคุมเส้นทางที่แสงเดินทางให้อยู่ในทิศทางที่ต้องการ การตรวจวัดปริมาณ หรือสมบัติต่าง ๆ ของแสง เป็นต้น ศาสตร์ในด้านโฟโตนิกส์ดังกล่าวนี้บ่งชี้ได้ว่ามีความคล้ายคลึงกับศาสตร์ในด้านอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic) ซึ่งว่าด้วยการควบคุมพฤติกรรมของอิเล็กตรอน

หัวใจสำคัญของศาสตร์ในด้านโฟโตนิกส์ คือ การศึกษาพฤติกรรมของโฟตอนที่มีต่อผลึกทางแสง (Photonics crystal) ซึ่งแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันก็อาจจะแสดงพฤติกรรมที่แตกต่างกันในผลึกทางแสงที่มีโครงสร้างแบบหนึ่ง ดังนั้นโครงสร้างทางแสง (Photonics structure) แบบหนึ่งจึงมักถูกออกแบบมาเพื่อการทำงานกับแสงที่มีความยาวคลื่นเพียงค่าเดียวหรือเพียงช่วงเดียวเพื่อทำให้เกิดพฤติกรรมเคลื่อนที่ของแสงในรูปแบบที่ต้องการ เกิดเป็นอุปกรณ์เชิงแสง (Optical device) ซึ่งมีหน้าที่ตามที่ได้รับ การออกแบบมาภายในวงจรรวมเชิงแสง (Photonics integrated circuits)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

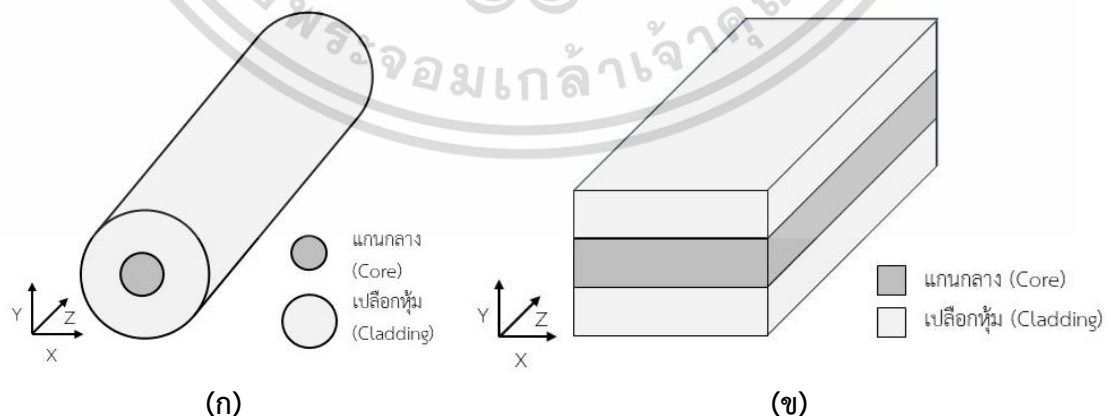


รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางแสงต่างๆ (ก) แบบหนึ่งมิติ (ข) แบบสองมิติ (ค) แบบสามมิติ

โครงสร้างทางแสงสามารถถูกแบ่งได้ตามลักษณะของโครงสร้างเป็นสามประเภทตามลักษณะการเรียงตัวของผลึกทางแสงที่มีค่าดัชนีหักเหแสงแตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ได้แก่

- 1) โครงสร้างทางแสงแบบหนึ่งมิติ (1-Dimension photonics structure) คือ โครงสร้างของผลึกทางแสงที่มีค่าดัชนีหักเหแสงตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบในหนึ่งมิติ
- 2) โครงสร้างทางแสงแบบสองมิติ (2-Dimension photonics structure) คือ โครงสร้างของผลึกทางแสงที่มีค่าดัชนีหักเหแสงตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบในสองมิติ
- 3) โครงสร้างทางแสงแบบสามมิติ (3-Dimension photonics structure) คือ โครงสร้างของผลึกทางแสงที่มีค่าดัชนีหักเหแสงตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ

โดยลักษณะโครงสร้างทางแสงทั้งสามลักษณะดังรูปที่ 2.1 จะมีผลต่อพฤติกรรมการณ์การเคลื่อนที่ของแสงทั้งในหนึ่งมิติ สองมิติ หรือสามมิติตามที่ได้รับการออกแบบไว้

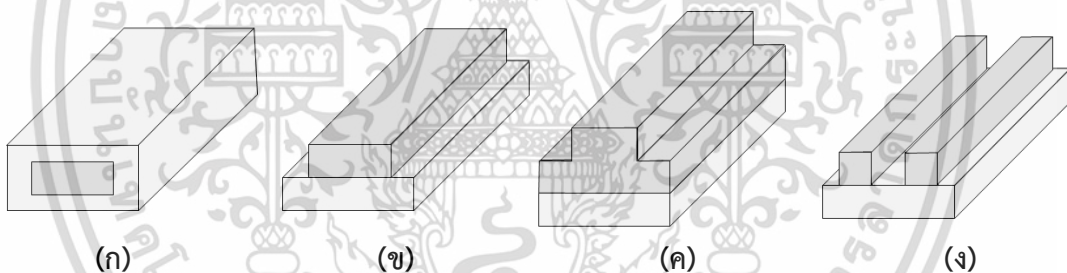


รูปที่ 2.2 โครงสร้างเบื้องต้นของท่อนำคลื่นแสง (ก) ท่อนำคลื่นแสงแบบทรงกลม (Circular optical waveguide) (ข) ท่อนำคลื่นแสงแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular optical waveguide)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท่อนำคลื่นแสง (Optical waveguide) เป็นอุปกรณ์เชิงแสงชนิดหนึ่งซึ่งมีความสำคัญมากในวงจรรวมเชิงแสง ท่อนำคลื่นแสงทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงภายในวงจรรวมเชิงแสงให้เป็นไปตามที่ได้รับการออกแบบไว้โดยอาศัยการสะท้อนกลับหมดภายใน (Total internal reflection) เนื่องจากความแตกต่างกันของค่าดัชนีหักเหแสงของตัวกลางที่แสงเดินทางผ่านในสองบริเวณเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการกักแสง (Optical confinement) โดยบริเวณที่แสงเดินทางจะเป็นวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหแสงสูงซึ่งถูกเรียกว่า แกนกลาง (Core) ถูกห้อมล้อมด้วยวัสดุอีกชนิดที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่าซึ่งแสงจะไม่เดินทางในบริเวณนี้เรียกว่าเปลือกหุ้ม (Cladding)

ท่อนำคลื่นแสงที่พบได้โดยทั่วไปมักเป็นท่อนำคลื่นแสงแบบทรงกระบอก (Circular optical waveguide) ดังรูปที่ 2.2(ก) หรือเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งจะเกิดปรากฏการณ์การกักแสงในสองมิติ (แกน X และแกน Y) ซึ่งมุ่งเน้นไปที่การส่งสัญญาณแสงจากด้านหนึ่งไปสู่อีกด้านหนึ่ง ในขณะที่ท่อนำคลื่นแสงในวงจรรวมเชิงแสงมักเป็นท่อนำคลื่นแสงแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular optical waveguide) ดังรูปที่ 2.2(ข) ซึ่งสามารถเกิดปรากฏการณ์การกักแสงได้ทั้งในหนึ่ง และสองมิติขึ้นกับชนิดโครงสร้างของท่อนำคลื่น



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงแบบสี่เหลี่ยมแบบต่างๆ (ก) Buried waveguide (ข) Ridge or Wire waveguide (ค) Rib waveguide (ง) Slot waveguide

โครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงแบบสี่เหลี่ยมแบบต่าง ๆ ที่เป็นที่ยอมรับสำหรับใช้ในวงจรรวมเชิงแสงสามารถแบ่งได้เป็นสี่ประเภทดังรูปที่ 2.3 ได้แก่

1) Buried waveguide เป็นโครงสร้างซึ่งมีแกนกลางมีค่าดัชนีหักเหแสงมากถูกล้อมรอบด้วยเปลือกหุ้มซึ่งมีค่าดัชนีหักเหแสงน้อยกว่าทำให้เกิดการกักแสงให้เดินทางภายในบริเวณแกนกลางของท่อนำคลื่นแสง ดังรูปที่ 2.3(ก)

2) Ridge or Wire waveguide เป็นโครงสร้างที่มีแกนกลางอยู่ด้านบนของฐาน (Substrate) ซึ่งมีค่าดัชนีหักเหแสงน้อยกว่า โดยเปลือกหุ้มอาจเป็นวัสดุต่างชนิดกันกับวัสดุของฐาน ดังรูปที่ 2.3(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) Rib waveguide เป็นโครงสร้างที่มีแกนกลางซึ่งมีค่าดัชนีหักเหแสงมากอยู่ด้านบนของฐานซึ่งมีค่าดัชนีหักเหแสงน้อยกว่า เปลือกหุ้มอาจเป็นวัสดุต่างชนิดกันกับวัสดุของฐาน โดยแกนกลางจะมีส่วนของบ่าที่มีขนาดเท่ากับฐานของท่อนำคลื่น ดังรูปที่ 2.3(ค)

4) Slot waveguide เป็นโครงสร้างที่มีแกนกลางซึ่งมีค่าดัชนีหักเหแสงมากสองส่วนวางอยู่ด้านบนของฐานซึ่งมีค่าดัชนีหักเหแสงน้อยกว่า โดยโครงสร้างในลักษณะนี้จะถูกออกแบบมาให้เกิดการกักแสงที่บริเวณช่องว่างระหว่างแกนกลางทั้งสองซึ่งมีค่าดัชนีหักเหแสงต่ำกว่าแกนกลาง ดังรูปที่ 2.3(ง)

นอกจากโครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงแบบสี่เหลี่ยมทั้งสี่ชนิดที่ได้กล่าวถึงแล้วยังมีท่อนำคลื่นแสงแบบพิเศษซึ่งถูกออกแบบขึ้นเพื่องานที่มีความเฉพาะทางอีกมากมาย

2.1.2 ทศนศาสตร์เบื้องต้นของท่อนำคลื่นแสง

ทศนศาสตร์ [3] (Optics) คือ ศาสตร์ที่ว่าด้วยเรื่องราวเกี่ยวกับแสง หรือ โฟตอน (Photon) ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอันประกอบไปด้วยสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าซึ่งมีการสั่นในทิศทางต่าง ๆ กันตามโหมดการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้น ๆ แนวคิดเกี่ยวกับทฤษฎีทางแสงถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่แนวคิดที่แสงถูกพิจารณาให้เป็นเพียงคลื่นชนิดหนึ่ง (Wave optics) ไปจนถึงแนวคิดที่แสงถูกพิจารณาให้เป็นอนุภาค (Particle optics) ตลอดจนแนวคิดที่แสงเป็นคลื่นซึ่งสามารถแสดงสมบัติของอนุภาค หรือที่เรียกว่า ทวิภาวะของคลื่นและอนุภาค (Wave particle duality) จนพัฒนาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) และเป็นทศนศาสตร์เชิงควอนตัม (Quantum optics) ซึ่งสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อแสงมีความเข้มข้นเพียงหนึ่งหรือสองโฟตอนได้ในที่สุด

ความยาวคลื่น (λ) ของแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นสัมพันธ์กับความถี่ (f) ของแสง ด้วยความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.1

$$c = \lambda f \quad (2.1)$$

เมื่อ ความเร็วแสง (c) มีค่าประมาณ 2.988×10^8 เมตรต่อวินาที ในสภาพที่แสงเดินทางผ่านสุญญากาศ หากแสงเดินทางผ่านตัวกลางชนิดอื่น ๆ จะทำให้ค่าความเร็วแสงในตัวกลางนั้นมีค่าลดลงจากค่าความเร็วแสงในสุญญากาศดังสมการที่ 2.2

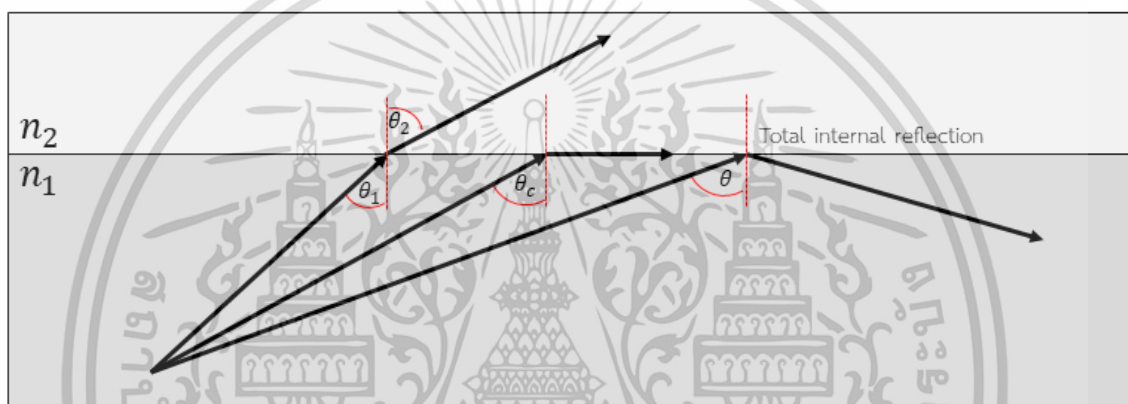
$$c = n v \quad (2.2)$$

เมื่อ ค่าดัชนีหักเหแสงของตัวกลาง (n) มีค่า ๆ หนึ่งจะทำให้สามารถคำนวณค่าความเร็วของแสงในตัวกลาง (v) นั้นได้ ซึ่งค่าดัชนีหักเหแสงของตัวกลางนั้นนอกจากจะขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างความเร็วเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงในสุญญากาศต่อความเร็วแสงในตัวกลางแล้วยังขึ้นกับสภาพยอมทางไฟฟ้าของตัวกลาง (Electric permittivity : ϵ_r) และสภาพให้ซึมผ่านได้ทางแม่เหล็ก (Magnetic permeability : μ_r) ในตัวกลางซึ่งเป็นค่าเฉพาะตัวของวัสดุ ดังสมการที่ 2.3

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\epsilon_r \mu_r}{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (2.3)$$

เมื่อ สภาพยอมทางไฟฟ้าในสุญญากาศ (Permittivity of vacuum : ϵ_0) มีค่า 8.854×10^{-12} ฟารัดต่อเมตร และสภาพให้ซึมผ่านได้ทางแม่เหล็กในสุญญากาศ (Permeability of vacuum : μ_0) มีค่า $4\pi \times 10^{-7}$ เฮนรีต่อเมตร โดยค่าดัชนีหักเหแสงของตัวกลางดังกล่าวเป็นค่าเฉพาะตัวของแสงแต่ละค่าความยาวคลื่น

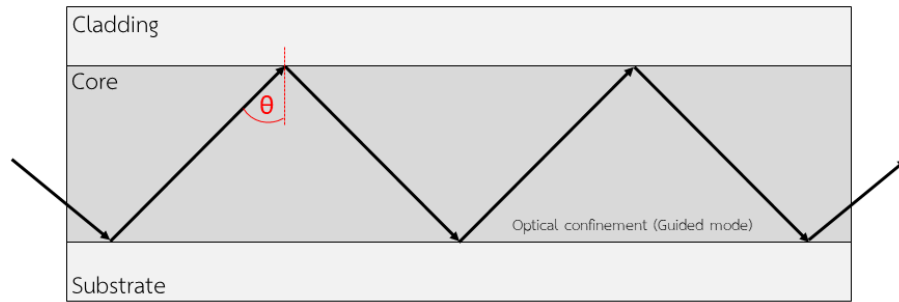


รูปที่ 2.4 การสะท้อนกลับหมดภายในตัวกลาง

ปรากฏการณ์ที่มีส่วนสำคัญต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของแสง คือ การสะท้อนกลับหมดภายใน (Total internal reflection) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ความแตกต่างของค่าดัชนีหักเหแสงของตัวกลางในบริเวณหนึ่งเกิดความแตกต่างกันจนทำให้แสง หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดการสะท้อนกลับหมดที่บริเวณรอยต่อของตัวกลางทั้งสองจนทำให้แสงเดินทางเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางเพียงบริเวณที่มีค่าดัชนีหักเหแสงมากกว่าดังรูปที่ 2.4 เกิดเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการกักแสง (Optical confinement) การสะท้อนกลับหมดภายในจะเกิดขึ้นเมื่อตัวกลางมีค่าดัชนีหักเหแสงสอดคล้องกับสมการที่ 2.4

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.4)$$

เมื่อ θ_c คือ มุมวิกฤต โดยลำแสงที่มีมุมสัมผัสกับเส้นปกติบริเวณผิวรอยต่อของตัวกลางมากกว่ามุมวิกฤตจะเกิดการสะท้อนกลับหมดภายในตัวกลาง และ n_1 และ n_2 คือ ค่าดัชนีหักเหแสงของตัวกลางที่หนึ่งและตัวกลางที่สองตามลำดับ



รูปที่ 2.5 ปรากฏการณ์การกักแสงภายในตัวกลาง

การกักแสงภายในตัวกลางจะเกิดขึ้นเมื่อมุมของแสงที่ตกกระทบกับเส้นปกติของผิวรอยต่อระหว่างตัวกลางสองชนิดสอดคล้องกับสมการที่ 2.5

$$\theta_c < \theta < 90^\circ \quad (2.5)$$

โดยแสงที่เกิดปรากฏการณ์นี้จะเกิดการสะท้อนกลับไปกลับมาที่พื้นผิวรอยต่อของตัวกลางทั้งสองชนิด และเดินทางอยู่ภายในแกนกลางของวัสดุเท่านั้น ดังรูปที่ 2.5 เกิดเป็นโหมดการนำแสง (Guided mode) ภายในตัวกลางซึ่งสามารถนำไปประยุกต์เป็นท่อนำคลื่นแบบต่าง ๆ ต่อไป

2.2 ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่องเชิงเวลา

2.2.1 ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

จากสมการทั้งสี่ของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) [4]

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.6)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (2.7)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.8)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.9)$$

เมื่อ สนามไฟฟ้า (Electric field : E) ในหน่วยโวลต์ต่อเมตร, สนามแม่เหล็ก (Magnetic field : H) ในหน่วยแอมแปร์ต่อเมตร, ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า (Electric flux density : D) ในหน่วยคูลอมบ์ต่อตารางเมตร และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density : B) ในหน่วยแอมแปร์ต่อตารางเมตร มีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.10)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ สภาพยอมทางไฟฟ้า (Electric permittivity : ϵ) และสภาพให้ซึมผ่านได้ทางแม่เหล็ก (Magnetic permeability : μ) มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2.12)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.13)$$

ในขณะที่ความหนาแน่นกระแส (Current density : \mathbf{J}) ในหน่วยแอมแปร์ต่อตารางเมตรในวัสดุตัวนำแทนที่ด้วย

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.14)$$

และความหนาแน่นกระแสดังกล่าวสัมพันธ์กับความหนาแน่นประจุ (Charge density : ρ) ในหน่วยคูลอมบ์ต่อตารางเมตรดังสมการ

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2.15)$$

ดังนั้น สมการทั้งสี่ของแมกซ์เวลล์ (สมการที่ 2.6 ถึง 2.9) จึงสามารถแปลงรูปได้ เมื่อ $\mu_r=1$ และ $\rho=0$ ดังนี้

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{B} = -j\omega \mu_0 \mathbf{H} \quad (2.16)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega \mathbf{D} = j\omega \epsilon \mathbf{E} \quad (2.17)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (2.18)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \mathbf{E}) = 0 \quad (2.19)$$

จากสมการของแมกซ์เวลล์ สมการที่ 2.16 และ 2.17 องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กตามแนวแกน X, Y และ Z จึงสามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -j\omega \mu_0 H_x \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega \mu_0 H_y \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega \mu_0 H_z \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = j\omega \epsilon_0 \epsilon_r E_x \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\omega \epsilon_0 \epsilon_r E_y \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega \epsilon_0 \epsilon_r E_z \quad (2.25)$$

จากสมการของแมกซ์เวลล์ เมื่อสมการของแมกซ์เวลล์ที่ขึ้นกับเวลา คือ

$$-\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{E} \quad (2.26)$$

และ $\epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{H} \quad (2.27)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น สมการที่ 2.20 ถึง 2.25 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$-\mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \quad (2.28)$$

$$-\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (2.29)$$

$$-\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \quad (2.30)$$

$$\epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (2.31)$$

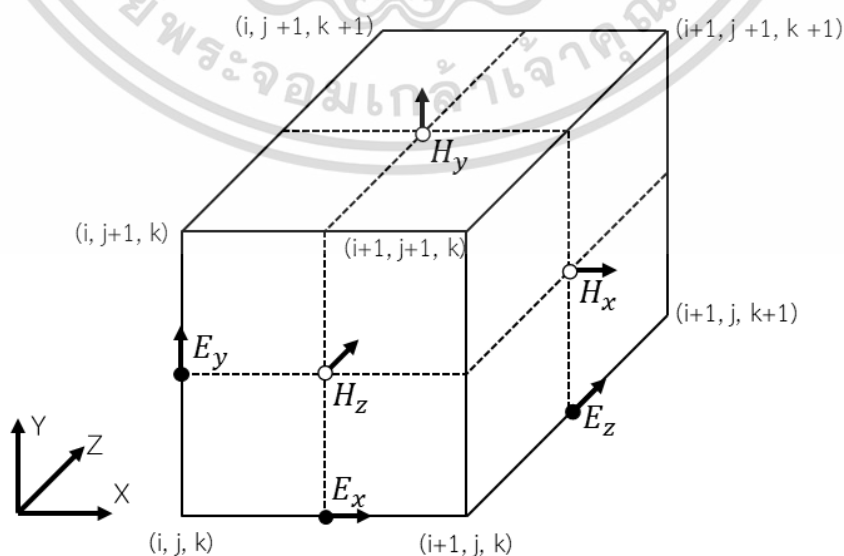
$$\epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (2.32)$$

$$\epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (2.33)$$

สมการที่ 2.28 ถึง 2.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็กในแต่ละแนวแกนกับสนามไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็กในแนวแกนอื่น ๆ สำหรับใช้ในการคำนวณค่าสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กสำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างทางแสงด้วยระเบียบวิธีต่าง ๆ

2.2.2 ระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่องเชิงเวลา

ระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่องเชิงเวลา (Finite Difference Time Domain method : FDTD) คือ ระเบียบวิธีซึ่งใช้ในการพิจารณาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยอาศัยสมการของแมกซ์เวลล์ที่ขึ้นกับเวลา (Time-dependent Maxwell equations) ระเบียบวิธีดังกล่าวถูกพัฒนาขึ้นโดย Kane S. Yee [5] และคณะ ในปี ค.ศ.1966 เพื่อใช้ในการพิจารณาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางที่เวลาต่าง ๆ โดยการกำหนดลำดับเวลา (Time-step) ในปริภูมิสามมิติตามแนวแกน X, Y และ Z ที่เรียกว่า Yee-lattice ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะของ Yee-lattice ในปริภูมิสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำหนดให้ Δt คือ ขนาดของลำดับเวลา (Time-step size) ซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วของแสงในสุญญากาศ (c) สภาพยอมทางไฟฟ้าของตัวกลาง (ϵ_r) และค่าความเร็วของแสงในตัวกลาง (v) ตามแนวแกน X ดังสมการ

$$\Delta t \leq \sqrt{\epsilon\mu_0} \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{c} \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{v} \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.34)$$

ดังนั้น ขนาดของลำดับเวลาในปริภูมิสามมิติในระบบฉากจะสามารถแสดงได้ด้วยสมการ

$$\Delta t \leq \frac{1}{v} \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.35)$$

โดยระยะเวลาที่ต้องใช้ในกระบวนการจำลอง (Simulation duration) จะสัมพันธ์กับค่าความเร็วของแสงในตัวกลาง และความยาวของตัวกลางที่คลื่นแสงเดินทางผ่าน (Waveguide length) ดังสมการ

$$\text{Simulation duration} = \frac{\text{Waveguide length}}{v} \quad (2.36)$$

ดังนั้น จำนวนของลำดับเวลา (Number of time-steps) ที่ต้องใช้ในการคำนวณด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เบื้องเชิงเวลาจึงสัมพันธ์กับขนาดของโครงสร้างทางแสงที่ต้องการพิจารณา และความเร็วแสงที่เคลื่อนที่ในตัวกลางดังกล่าวดังสมการ

$$\text{Number of time steps} = \frac{\text{Simulation duration}}{\Delta t} \quad (2.37)$$

จากรูปที่ 2.6 กำหนดให้ α แทนพิกัดเชิงพื้นที่ (Spatial coordinate) X, Y หรือ Z จะทำให้

$$\mathbf{E}_\alpha = \begin{cases} \text{พิกัดเชิงพื้นที่ } \alpha & : \text{จำนวนเต็มครึ่งหนึ่ง (Half-integer)} \\ \text{พิกัดเชิงพื้นที่อื่นๆ} & : \text{จำนวนเต็ม (Integer)} \\ \text{เวลา} & : \text{จำนวนเต็ม (Integer)} \end{cases} \quad (2.38)$$

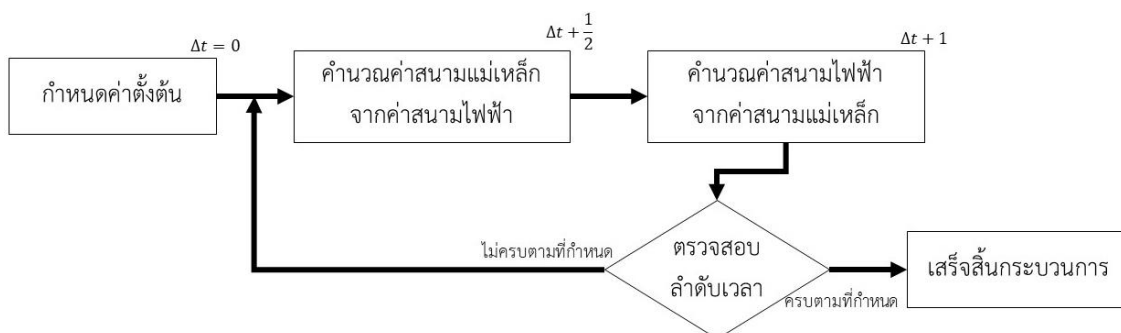
และ

$$\mathbf{H}_\alpha = \begin{cases} \text{พิกัดเชิงพื้นที่ } \alpha & : \text{จำนวนเต็ม (Integer)} \\ \text{พิกัดเชิงพื้นที่อื่นๆ} & : \text{จำนวนเต็มครึ่งหนึ่ง (Half-integer)} \\ \text{เวลา} & : \text{จำนวนเต็มครึ่งหนึ่ง (Half-integer)} \end{cases} \quad (2.39)$$

เมื่อกำหนดให้ Δx , Δy และ Δz คือ ผลต่างเชิงพื้นที่ (Spatial discretization) จะได้

$$F^n(i,j,k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = F(x,y,z,t) \quad (2.40)$$

ดังนั้น การคำนวณค่าของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เบื้องเชิงเวลาจึงจำเป็นต้องแบ่งโครงสร้างทางแสงที่ต้องการพิจารณาเป็นส่วนย่อย ๆ ตามขนาดของโครงสร้างทางแสง และจำนวนลำดับเวลาเพื่อใช้ในการคำนวณค่าสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปตามสมบัติทางแสงของโครงสร้างในแต่ละบริเวณ

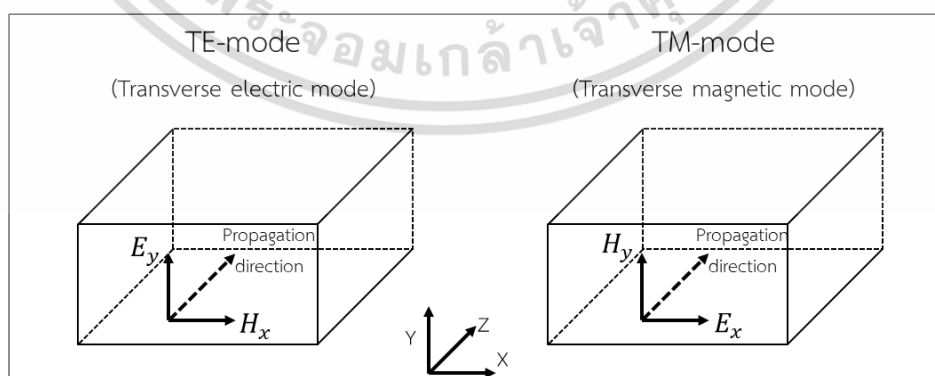


รูปที่ 2.7 ขั้นตอนโดยสังเขปของการคำนวณตามระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา

โดยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลามิขั้นตอนการคำนวณโดยการกำหนดค่าสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กตั้งต้นรวมทั้งค่าสมบัติต่าง ๆ ของโครงสร้างทางแสงที่ต้องการพิจารณาดังแผนผังการทำงานในรูปที่ 2.7 การคำนวณจะเริ่มต้นจากการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กของลำดับเวลาถัดไป ($\Delta t + 1/2$) จากค่าสนามไฟฟ้าตั้งต้น ($\Delta t = 0$) และสมบัติของวัสดุ ค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จะถูกคำนวณเป็นค่าสนามไฟฟ้าของลำดับเวลาถัดไป ($\Delta t + 1$) จากนั้นจึงเป็นการตรวจสอบว่าการคำนวณในลำดับเวลาดังกล่าวครบตามลำดับเวลาที่กำหนดไว้แล้วหรือไม่ หากการคำนวณยังไม่ครบลำดับเวลาที่กำหนดจะมีการคำนวณสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าของลำดับเวลาต่อไปจนกว่าการคำนวณจะครบตามลำดับเวลาที่กำหนดจะถือว่าเสร็จสิ้นการคำนวณตามระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา

2.2.3 โหมดการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นแสง

โดยทั่วไปโหมดการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นแสง คือ โหมดตามขวาง (Transverse mode) ซึ่งเป็นโหมดที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น (Propagation direction) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะการสั่นของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหมดตามขวางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถจำแนกได้เป็นสองประเภท ดังนี้

1) โหมดสนามไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electric mode : TE-mode) ซึ่งในโหมดนี้จะมีการสั่นของสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น แต่ไม่มีการสั่นของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน ดังกล่าว ($E_x=E_z=H_y=0$) ดังนั้น สมการที่ 2.28 จนถึง สมการที่ 2.33 สามารถเขียนใหม่ในรูปของสมการสำหรับโหมดสนามไฟฟ้าตามขวางได้ดังนี้

$$-\frac{\partial E_y}{\partial z} = -j\omega\mu_0 H_x \quad (2.41)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -j\omega\mu_0 H_z \quad (2.42)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\omega\epsilon_0\epsilon_r E_y \quad (2.43)$$

2) โหมดสนามแม่เหล็กตามขวาง (Transverse Magnetic mode : TM-mode) ซึ่งในโหมดนี้จะมีการสั่นของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น แต่ไม่มีการสั่นของสนามแม่เหล็กตามแนวแกนดังกล่าว ($H_x=H_z=E_y=0$)

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega\mu_0 H_y \quad (2.44)$$

$$-\frac{\partial H_y}{\partial z} = j\omega\epsilon_0\epsilon_r E_x \quad (2.45)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = j\omega\epsilon_0\epsilon_r E_z \quad (2.46)$$

สำหรับกรณีโครงสร้างของท่อนำคลื่นมีเปลือกหุ้มซึ่งมีค่าดัชนีหักเหแสงที่สมมาตรกัน หรือมีค่าเท่ากันทั้งด้านบนและด้านล่าง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดตามขวางทั้งสองประเภทจะมีลักษณะการเคลื่อนที่ที่สอดคล้องกัน ทำให้การศึกษาพฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดตามขวางเพียงโหมดเดียวก็เพียงพอแล้วสำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นที่ต้องการ

2.2.4 จำนวนโหมดการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นแสง

นอกจากนี้แล้วลักษณะโครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงยังเป็นสิ่งที่กำหนดจำนวนของโหมดการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าว่ามีจำนวนสูงที่สุดกี่โหมด โดยปัจจัยที่มีผลต่อจำนวนโหมดการเคลื่อนที่ดังกล่าวขึ้นกับความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางในท่อนำคลื่นแสง ขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นแสง รวมทั้งค่าดัชนีหักเหแสงของวัสดุที่ใช้เป็นแกนกลางและเปลือกหุ้มของท่อนำคลื่นแสง

จำนวนโหมดที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในท่อนำคลื่นแสง (Number of modes) [6] จะสัมพันธ์กับปัจจัยดังกล่าวดังสมการ

$$M = \text{Int} \left(\frac{2V}{\pi} \right) + 1 \quad (2.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ M คือ จำนวนสูงสุดของโหมดที่สามารถเคลื่อนที่ในท่อนำคลื่นแสงได้, $\text{Int}(x)$ คือ จำนวนเต็มของฟังก์ชัน x และ V คือ ความถี่ปรับฐาน (Normalized frequency) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

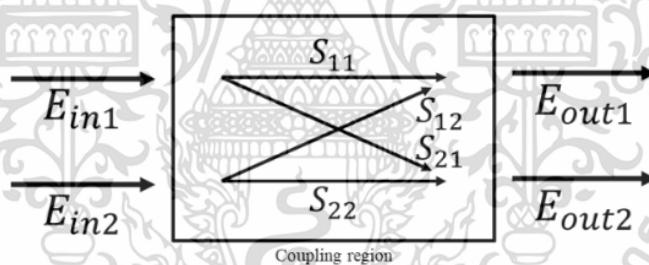
$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{(n_{\text{core}}^2 - n_{\text{cladd}}^2)} \quad (2.48)$$

เมื่อ $2a$ คือ ขนาดความกว้างของบริเวณแกนกลางของท่อนำคลื่น, λ คือ ความยาวคลื่นของคลื่นแสงที่ต้องการพิจารณา, n_{core} คือ ค่าดัชนีหักเหแสงของบริเวณแกนกลางของท่อนำคลื่นแสง และ n_{cladd} คือ ค่าดัชนีหักเหแสงของบริเวณเปลือกหุ้มของท่อนำคลื่นแสง

ดังนั้น จำนวนสูงสุดของโหมดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถเคลื่อนที่ในท่อนำคลื่นแสงได้จึงสามารถพิจารณาด้วยสมการที่ 2.47 และ 2.48

2.3 สัมประสิทธิ์คู่ควบ

สัมประสิทธิ์คู่ควบ [7] (Coupling coefficient : κ) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการส่งผ่านสัญญาณระหว่างแต่ละช่องสัญญาณของอุปกรณ์รวมแสง หรืออุปกรณ์แยกแสง



รูปที่ 2.9 แผนภาพเครือข่ายแบบสองช่องสัญญาณ

สัมประสิทธิ์คู่ควบสามารถพิจารณาได้โดยอาศัยเมทริกซ์การกระเจิง (Scattering matrix : S-matrix) โดยการพิจารณาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านเข้า และออกจากอุปกรณ์ หรือบริเวณคู่ควบ (Coupling region) ดังรูปที่ 2.9 ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$[E_{\text{out}(i)}] = [S_{ij}][E_{\text{in}(j)}] \quad (2.49)$$

เมื่อ $E_{\text{out}(i)}$ คือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่บริเวณช่องสัญญาณขาออก, S_{ij} คือ พารามิเตอร์การกระเจิงที่บริเวณคู่ควบจากช่องสัญญาณขาเข้า j ไปยังช่องสัญญาณขาออก i และ $E_{\text{in}(j)}$ คือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่บริเวณช่องสัญญาณขาเข้า

สมการดังกล่าวสามารถเขียนในรูปของเมทริกซ์การกระเจิงสำหรับเครือข่ายแบบสองช่องสัญญาณได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in1} \\ E_{in2} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

เมื่อ E_{out1} คือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่บริเวณช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1, E_{out2} คือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่บริเวณช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 2, S_{11} คือ พารามิเตอร์การกระเจิงที่บริเวณคู่ควบจากช่องสัญญาณขาเข้าช่องที่ 1 ไปยังช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1, S_{12} คือ พารามิเตอร์การกระเจิงที่บริเวณคู่ควบจากช่องสัญญาณขาเข้าช่องที่ 2 ไปยังช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1, S_{21} คือ พารามิเตอร์การกระเจิงที่บริเวณคู่ควบจากช่องสัญญาณขาเข้าช่องที่ 1 ไปยังช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 2, S_{22} คือ พารามิเตอร์การกระเจิงที่บริเวณคู่ควบจากช่องสัญญาณขาเข้าช่องที่ 2 ไปยังช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 2, E_{in1} คือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่บริเวณช่องสัญญาณขาเข้าช่องที่ 1 และ E_{in2} คือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่บริเวณช่องสัญญาณขาเข้าช่องที่ 2

ดังนั้น สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 และ ช่องที่ 2 สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการ

$$E_{out1} = S_{11}E_{in1} + S_{12}E_{in2} \quad (2.51)$$

$$E_{out2} = S_{21}E_{in1} + S_{22}E_{in2} \quad (2.52)$$

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง (Intensity : I) และสนามแม่เหล็กไฟฟ้างดังสมการ

$$I = |E|^2 \quad (2.53)$$

จะได้

$$I_1 = |E_{out1}|^2 = S_{11}^2|E_{in1}|^2 + 2(S_{11}E_{in1}S_{12}E_{in2}) + S_{12}^2|E_{in2}|^2 \quad (2.54)$$

$$I_2 = |E_{out2}|^2 = S_{21}^2|E_{in1}|^2 + 2(S_{21}E_{in1}S_{22}E_{in2}) + S_{22}^2|E_{in2}|^2 \quad (2.55)$$

เมื่อ I_1 คือ ความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 และ I_2 คือ ความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 2

ในกรณีที่ไม่เกิดการลดทอนสัญญาณภายในช่องสัญญาณ

$$I_{in} = I_{out} = I_1 + I_2 \quad (2.56)$$

ดังนั้น

$$I_1 + I_2 = [S_{11}^2 + S_{21}^2]|E_{in1}|^2 + 2[S_{11}S_{12} + S_{21}S_{22}](E_{in1}E_{in2}) + [S_{12}^2 + S_{22}^2]|E_{in2}|^2 \quad (2.57)$$

จากการเทียบสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร E_{out1} , E_{out2} , E_{in1} และ E_{in2} จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_{11}^2 + S_{21}^2 = 1 \quad (2.58)$$

$$S_{12}^2 + S_{22}^2 = 1 \quad (2.59)$$

$$S_{11}S_{12} + S_{21}S_{22} = 0 \quad (2.60)$$

กำหนดให้พารามิเตอร์การกระเจิง S_{11} สัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์คู่ควบ κ ดังสมการ

$$S_{11} = \sqrt{1 - \kappa} \quad (2.61)$$

เมื่อ สัมประสิทธิ์คู่ควบ κ เป็นจำนวนจริง และ $0 \leq \kappa \leq 1$ ดังนั้น

$$(1 - \kappa) + S_{21}^2 = 1 \quad (2.62)$$

$$S_{21}^2 = \kappa \quad (2.63)$$

หรือ $S_{21} = \sqrt{\kappa} \quad (2.64)$

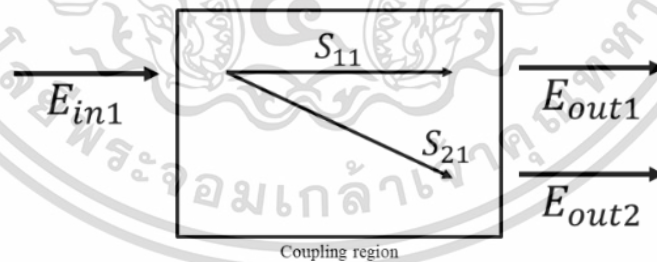
ดังนั้น $S_{12} = \sqrt{\kappa} \quad (2.65)$

และ $S_{22} = \sqrt{1 - \kappa} \quad (2.66)$

ดังนั้น เมทริกซ์การกระเจิงสำหรับเครือข่ายแบบสองช่องสัญญาณสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการต่อไปนี

$$\begin{bmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1 - \kappa} & \sqrt{\kappa} \\ \sqrt{\kappa} & \sqrt{1 - \kappa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in1} \\ E_{in2} \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

ในกรณีของท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตรซึ่งมีช่องสัญญาณขาเข้าหนึ่งช่องสัญญาณ และช่องสัญญาณขาออกสองช่องสัญญาณ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แผนภาพเครือข่ายสำหรับท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตร

สัมประสิทธิ์คู่ควบที่สามารถพิจารณาได้โดยอาศัยเมทริกซ์การกระเจิงจะสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1 - \kappa} & 0 \\ \sqrt{\kappa} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 และช่องที่ 2 จะสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขาเข้า และขาออกดังสมการต่อไปนี้

$$I_1 = |E_{out1}|^2 = (1-\kappa)|E_{in1}|^2 \quad (2.69)$$

$$I_2 = |E_{out2}|^2 = (\kappa)|E_{in1}|^2 \quad (2.70)$$

2.4 การประยุกต์ใช้ท่อนำคลื่นแสงในงานด้านต่าง ๆ

ท่อนำคลื่นแสงเป็นอุปกรณ์เชิงแสงซึ่งได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ เนื่องจากท่อนำคลื่นแสงสามารถถูกออกแบบให้มีสมบัติที่เฉพาะเจาะจง และสอดคล้องกับความถี่ หรือลักษณะงานที่ต้องการได้ การประยุกต์ใช้ท่อนำคลื่นแสงในงานด้านต่าง ๆ มีตัวอย่างดังต่อไปนี้

2.4.1 งานด้านการสื่อสาร

การสื่อสารด้วยแสงมักจะใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือคลื่นแสงในย่านรังสีอินฟราเรด (Infrared) ซึ่งมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 1260 จนถึง 1625 นาโนเมตร เป็นตัวนำข้อมูลผ่านไปในเส้นใยแก้วนำแสง เนื่องจากย่านดังกล่าวมีการลดทอนของสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงน้อยกว่าแสงในย่านอื่น ๆ โดยนิยมแบ่งแสงในย่านดังกล่าวออกเป็นห้าย่าน ดังนี้

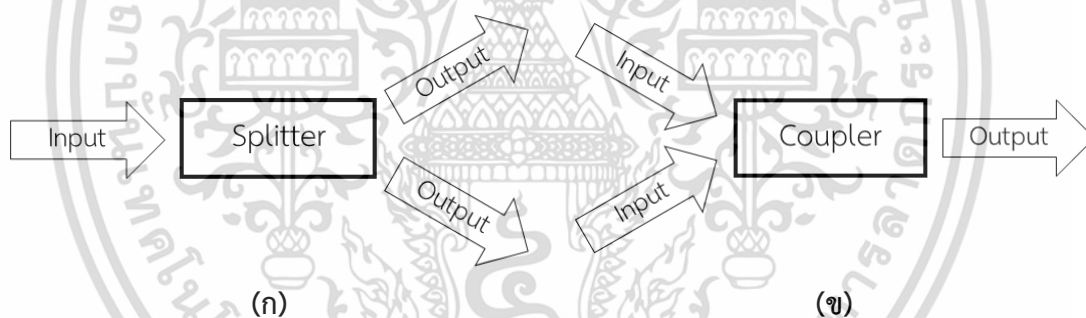
ตารางที่ 2.1 แสงในย่านความยาวคลื่นต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารด้วยแสง

ย่าน	ความยาวคลื่น (nm)	การใช้งาน
O-band (Original band)	1260 - 1360	เป็นย่านที่ถูกนำมาใช้ในการสื่อสารด้วยแสงเป็นย่านแรกสุด
E-band (Extended band)	1360 - 1460	เป็นย่านที่นิยมนำมาใช้ในการสื่อสารด้วยแสงน้อยที่สุดเนื่องจากแสงในย่านดังกล่าวเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้ง่าย
S-band (Short-wavelength band)	1460 - 1530	เป็นย่านที่นิยมนำมาใช้ในเครือข่ายการสื่อสารด้วยแสงแบบพาสซีฟ (Passive Optical Network : PON)
C-band (Conventional band)	1530 - 1565	เป็นย่านที่นิยมใช้ในการรับส่งข้อมูลด้วยแสงมากที่สุด เนื่องจากสามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์ขยายความเข้มของสัญญาณหรือการรวมสัญญาณในระบบเครือข่ายการสื่อสารด้วยแสง
L-band (Long-wavelength band)	1565 - 1625	เป็นย่านที่นิยมใช้ในการรับส่งข้อมูลด้วยแสงรองลงมาจากย่าน C-band เนื่องจากเกิดการลดทอนของสัญญาณต่ำ และสามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์เครือข่ายสำหรับย่าน C-band ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสงเนื่องจากมีค่าการลดทอนสัญญาณต่ำกว่าแสงในย่านความยาวคลื่นอื่นๆ นอกจากนี้คลื่นแสงดังกล่าวยังสามารถทำงานร่วมกับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร ในอุปกรณ์ขยายความเข้มของสัญญาณด้วยเส้นใยแก้วนำแสงที่เจือด้วยธาตุเออร์เบียม (Erbium Dope Fiber Amplifier : EDFA) แล้วเกิดสัญญาณรบกวนต่ำ

โดยทั่วไปท่อนำคลื่นแสงมักถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวกลางในงานด้านการสื่อสารด้วยแสง ท่อนำคลื่นแสงที่มีขนาดใหญ่ หรือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าหนึ่งร้อยไมโครเมตร มักจะถูกนำไปประยุกต์เป็นเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งเป็นสื่อกลางในการรับส่งข้อมูลระยะไกล ในขณะที่ท่อนำคลื่นแสงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณหนึ่งไมโครเมตรมักจะถูกนำมาใช้ในการรับส่งข้อมูลในระยะทางสั้น ๆ ในลักษณะของวงจรรวมเชิงแสง นอกจากนี้แล้วท่อนำคลื่นแสงยังสามารถถูกออกแบบโครงสร้างให้มีลักษณะเฉพาะเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นการแข่งขันแสงอื่น ๆ ได้ตามความต้องการของผู้ออกแบบ อุปกรณ์เชิงแสงที่เป็นอุปกรณ์พื้นฐานซึ่งมีความสำคัญ และเป็นที่ยุติอย่างแพร่หลาย ได้แก่ อุปกรณ์แยกแสงและอุปกรณ์รวมแสง ดังรูปที่ 2.11

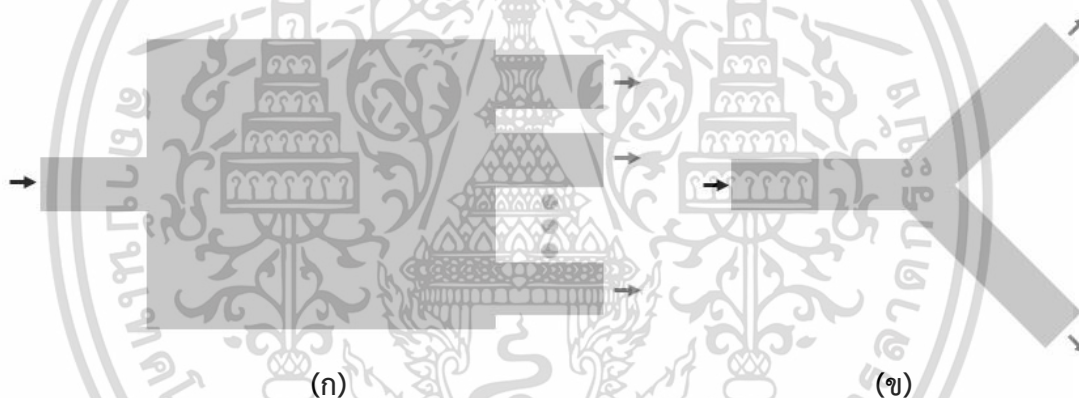


รูปที่ 2.11 แผนภาพการทำงานของอุปกรณ์เชิงแสง (ก) อุปกรณ์แยกแสง (ข) อุปกรณ์รวมแสง

2.4.1.1 อุปกรณ์แยกแสง (Beam splitter) เป็นหนึ่งในอุปกรณ์ทางแสงขั้นพื้นฐานที่สำคัญทั้งในระบบวัดทางแสง และระบบเครือข่ายการสื่อสารด้วยแสง อุปกรณ์ชนิดนี้ทำหน้าที่ในการแบ่งแยกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือสัญญาณแสงจากหนึ่งช่องสัญญาณขาเข้า (Input) ออกเป็นหลาย ๆ ช่องสัญญาณขาออก (Output) ตามที่ได้ถูกออกแบบไว้ อุปกรณ์แยกแสงบนท่อนำคลื่นแสง (Beam splitter based on optical waveguide) เป็นอุปกรณ์ที่นำเอาโครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงมาประยุกต์ให้สามารถทำหน้าที่แบ่งแยกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือ สัญญาณแสงภายในท่อนำคลื่นแสงหนึ่งออกเป็นหลาย ๆ ขบวนได้ เพื่อให้สัญญาณแสงดังกล่าวสามารถเดินทางไปยังจุดหมายที่แตกต่างกันภายในวงจรรวมเชิงแสง

อุปกรณ์แยกแสงบนท่อนำคลื่นแสงที่เป็นที่นิยมในการศึกษา และวิจัยในปัจจุบันสามารถแบ่งออกเป็นสองลักษณะ ตามลักษณะโครงสร้างและหลักการการทำงานของอุปกรณ์แยกแสงดังกล่าว [8] ได้แก่

1) โพรงสั้นพ้องแบบหลายโหมด (Multi-mode Interference : MMI) อุปกรณ์แยกแสงซึ่งถูกออกแบบด้วยโครงสร้างแบบโพรงสั้นพ้องแบบหลายโหมด ดังรูปที่ 2.12(ก) ได้รับความนิยมนเป็นอย่างมากในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์แยกแสงซึ่งมีช่องสัญญาณขาออกเป็นจำนวนมาก ($1 \times N$ Beam splitter) และต้องการความเข้มของสัญญาณแสงที่ช่องสัญญาณขาออกเท่ากันหรือ สมก้ำลั้งกัน (Uniformity output) เนื่องจากปรากฏการณ์ของทัลบอท (Talbot effect or Self-imaging effect) [9-10] ที่ถูกค้นพบในปี ค.ศ.1836 ซึ่งเป็นการเกิดการซ้อนทับกันของโหมดซึ่งมีความเร็วแตกต่างกันทำให้ความเข้มของสัญญาณแสงที่ช่องสัญญาณขาออกมีความเข้มเท่ากัน อุปกรณ์แยกแสงซึ่งถูกออกแบบด้วยโครงสร้างดังกล่าวจะสามารถทำงานได้ที่ความยาวคลื่นเพียงค่าเดียวตามที่ได้รับการออกแบบมาเท่านั้น

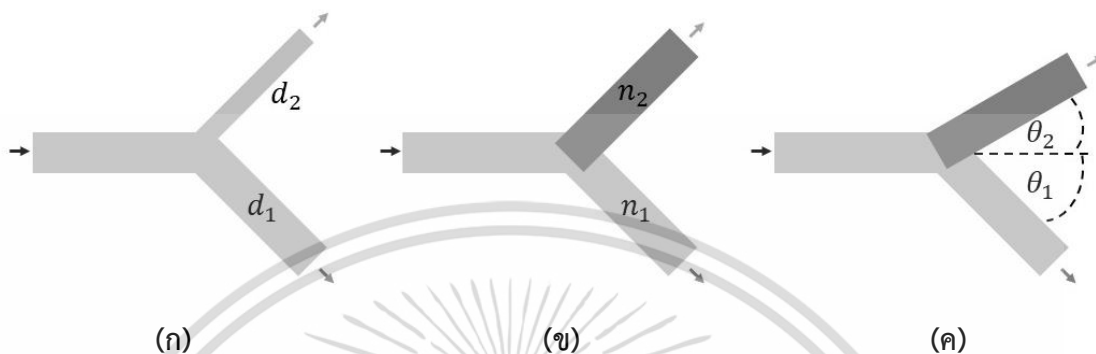


รูปที่ 2.12 โครงสร้างของอุปกรณ์แยกแสงที่เป็นที่นิยม (ก) โพรงสั้นพ้องแบบหลายโหมด (ข) ท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบสมมาตร

2) ท่อนำคลื่นรูปตัววาย (Y-junction or Y-branch waveguide) อุปกรณ์แยกแสงซึ่งถูกออกแบบด้วยโครงสร้างแบบท่อนำคลื่นรูปตัววายสามารถแบ่งแยกสัญญาณแสงได้โดยอาศัยลักษณะของโครงสร้างของท่อนำคลื่น โครงสร้างชนิดนี้นิยมนำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์แยกแสงที่มีช่องสัญญาณขาออกสองช่องสัญญาณ ซึ่งสามารถทำงานได้ที่ย่านความยาวคลื่นมากกว่าหนึ่งย่านแต่ความเข้มของสัญญาณที่ช่องสัญญาณขาออกอาจมีค่าสมก้ำลั้ง (Uniformity output) หรือไม่สมก้ำลั้ง (Non-uniformity output) ขึ้นกับการออกแบบลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์แยกแสงนั้น ๆ ท่อนำคลื่นรูปตัววายดังกล่าวสามารถแบ่งแยกได้เป็นสองชนิดตามลักษณะโครงสร้างของท่อนำคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1) ท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบสมมาตร (Symmetric Y-junction waveguide) ซึ่งมีโครงสร้างของท่อนำคลื่นฝั่งช่องสัญญาณขาออกสมมาตรกันทั้งสองช่องสัญญาณ ดังรูปที่ 2.12(ข) อุปกรณ์แยกแสงที่สร้างจากโครงสร้างชนิดนี้จะให้ความเข้มที่ช่องสัญญาณขาออกสมกำลังกันทั้งสองช่องสัญญาณ



รูปที่ 2.13 ท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตร (ก) ขนาดของท่อนำคลื่นไม่สมมาตรกัน (ข) ค่าดัชนีหักเหแสงของท่อนำคลื่นไม่สมมาตรกัน (ค) มุมระหว่างท่อนำคลื่นไม่สมมาตรกัน

2.2) ท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตร (Asymmetric Y-junction waveguide) ซึ่งมีโครงสร้างของท่อนำคลื่นฝั่งช่องสัญญาณขาออกไม่สมมาตรกัน ความไม่สมมาตรกันดังกล่าวอาจเป็นได้ทั้งขนาดของท่อนำคลื่น (Core size) ชนิดของวัสดุที่นำมาใช้สร้างท่อนำคลื่น (Material properties) หรือมุมระหว่างท่อนำคลื่นขาออก (Branching angle) ดังรูปที่ 2.13 ก็ได้ ความไม่สมมาตรของโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงดังกล่าวจึงทำให้ความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขาออกของอุปกรณ์แยกแสงนี้มีค่าไม่สมกำลังกัน

2.4.1.2 อุปกรณ์รวมแสง (Coupler) ทำหน้าที่รวมสัญญาณแสงตั้งแต่สองสัญญาณขึ้นไปให้สามารถเดินทางไปในท่อนำคลื่นแสงเดียวกันได้เพื่อเป็นการลดปริมาณตัวกลางที่ใช้ในการส่งสัญญาณ และลดความซับซ้อนของโครงสร้างทางแสงลง โดยทั่วไปมักมีท่อนำคลื่นที่ฝั่งขาเข้าตั้งแต่สองท่อนำคลื่นขึ้นไป

2.4.2 งานด้านความปลอดภัย

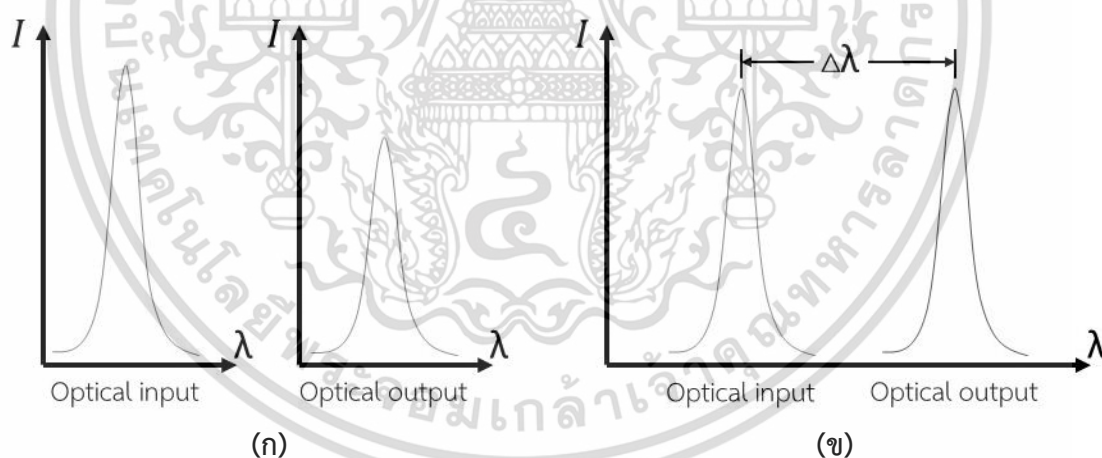
นอกจากการนำท่อนำคลื่นแสงไปประยุกต์ใช้กับงานในด้านการสื่อสารด้วยแสงแล้ว ท่อนำคลื่นแสงที่มีโครงสร้างที่ได้รับการออกแบบเป็นพิเศษยังได้รับความนิยมในการนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านความปลอดภัยโดยนำไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัด หรือตัวตรวจจับ (Sensor) สำหรับตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงในด้านต่าง ๆ ได้แก่

2.4.2.1 ตัวตรวจจับสำหรับตรวจจับค่าดัชนีหักเหแสง (Refractive Index Sensor : RI sensor) เป็นอุปกรณ์เชิงแสงที่นำเอาผลกระทบของค่าดัชนีหักเหแสงที่มีต่อการส่องผ่านแสงของท่อนำคลื่นมาประยุกต์ใช้เพื่อตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหแสงของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบเพื่อนำไปใช้ในงานด้านความปลอดภัย

2.4.2.2 ตัวตรวจจับสำหรับตรวจจับตัวอย่างทางด้านเคมี (Chemical Sensor) เป็นการนำเอาอุปกรณ์เชิงแสงมาประยุกต์เข้ากับการตรวจสอบเพื่อระบุชนิด หรือความเข้มข้นของสารเคมีตามที่ได้มีการออกแบบเอาไว้ เนื่องจากสารเคมีซึ่งมีชนิด และความเข้มข้นแตกต่างกันจะมีการตอบสนองต่อคลื่นแสงในแต่ละความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน

2.4.2.3 ตัวตรวจจับสำหรับตรวจวัดค่าทางกายภาพ (Physical sensor) เป็นการนำเอาอุปกรณ์เชิงแสงมาประยุกต์เข้ากับการตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวัตถุโดยอาศัยโครงสร้างท่อนำคลื่นที่ได้มีการออกแบบไว้เป็นการเฉพาะ เช่น การใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดแบรกก์เกรตติง (Fiber Bragg gratings) ในการตรวจสอบความเครียดที่เกิดขึ้นกับวัสดุ เป็นต้น

ตัวตรวจจับทั้งสามชนิดที่ประยุกต์มาจากท่อนำคลื่นแสงมีลักษณะการตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงของคลื่นแสงที่นิยมใช้ในการอ้างอิงสองลักษณะ ได้แก่



รูปที่ 2.14 ความเปลี่ยนแปลงของคลื่นแสงที่นิยมนำมาใช้ในตัวตรวจจับทางแสง (ก) การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง (ข) การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมของแสง

1) การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง (Intensity shift) เป็นลักษณะการตรวจสอบที่อาศัยความเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงของคลื่นแสงที่เดินทางผ่านตัวตรวจจับ ดังรูปที่ 2.14(ก) การตรวจสอบในลักษณะนี้ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนสูงก็สามารถตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้โดยอาศัยเพียงแหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับโครงสร้างของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจจับที่ได้มีการออกแบบไว้ และตัวตรวจจับแสงที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมก็สามารถตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้

2) การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมของแสง (Spectral shift) เป็นลักษณะการตรวจสอบที่อาศัยความเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมของแสงที่เดินทางผ่านตัวตรวจจับ ดังรูปที่ 2.14(ข) โดยความเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมของแสงจำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงแบบปรับค่าได้ (Broadband source : BBS) และเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมของแสง (Optical spectrum analyzer : OSA) ร่วมในการวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นด้วย การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมของแสงดังกล่าวสามารถแบ่งแยกย่อยได้เป็นสองลักษณะ คือ

2.1) การเปลี่ยนความยาวคลื่นกึ่งกลางของสเปกตรัมของแสง (Center wavelength shift) เป็นลักษณะการตรวจสอบที่อาศัยความเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นกึ่งกลางที่เปลี่ยนไปเมื่อแสงเดินทางผ่านตัวตรวจจับ โดยอาศัยสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดซึ่งจะมีการเปลี่ยนความยาวคลื่นกึ่งกลางที่แตกต่างกันมาใช้ในการระบุชนิดของวัสดุนั้น ๆ

2.2) การดูดกลืนแสงในย่านความยาวคลื่นเฉพาะ (Absorption fingerprint) เป็นลักษณะการตรวจสอบที่อาศัยหลักการดูดกลืนแสงในย่านความยาวคลื่นเฉพาะของวัสดุมาใช้ในการตรวจสอบ โดยวัสดุแต่ละชนิดจะมีสมบัติการดูดกลืนแสงในแต่ละย่านความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษา และพัฒนาโครงสร้างของท่อนำคลื่นรูปตัววายของนักวิจัยมักจะมีจุดมุ่งหมายเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์แยกแสงบนท่อนำคลื่นแสง (Beam splitter based on optical waveguide) สำหรับงานในด้านการสื่อสารด้วยแสง นอกจากนี้ท่อนำคลื่นดังกล่าวยังถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับบนท่อนำคลื่นแสง (Optical sensor based on optical waveguide) ควบคู่ไปกับท่อนำคลื่นแสงที่มีลักษณะโครงสร้างแบบพิเศษอื่น ๆ อีกด้วย ในวิทยานิพนธ์นี้ได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา และพัฒนาท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบต่าง ๆ รวมไปถึงการนำโครงสร้างดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ ดังนี้

2.5.1 อุปกรณ์แยกแสงบนท่อนำคลื่นแสงที่มีค่ากำลังการแยกแสงแบบสมกำลัง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำท่อนำคลื่นแสงไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์แยกแสงบนท่อนำคลื่นแสงที่มีค่ากำลังการแยกแสงแบบสมกำลังมีรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์แยกแสงที่มีค่ากำลังการแยกแสงแบบสมกำลังบนท่อนำคลื่นแสง

Reference	Structure type	Application	Device size (μm^2)
[11]	Asymmetric Y-junction waveguide	1x4 optical splitter with uniformity output	23×10^3
[12]	Single-mode small-core Y-branch waveguide	1x2 optical splitter with uniformity output	2.16×10^6
[13]	Symmetric Y-junction waveguide	1x32 optical splitter with uniformity output	334×10^6
[14]	3D Symmetric Y-junction waveguide	1x4 optical splitter with uniformity output	38.1×10^3

ในปี ค.ศ.2010 Tang X. และคณะ [11] ได้นำเสนอวิธีการในการออกแบบอุปกรณ์แยกแสงแบบหลายช่องสัญญาณขาออก (1xN optical splitter) ใช้โครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเป็นต้นแบบโดยการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีการผลต่างสืบเนื่องของการแพร่กระจายลำแสง (Finite-Difference Beam Propagation method) และสร้างท่อนำคลื่นแสงแบบ 4 ช่องสัญญาณขาออก (1x4 optical splitter) ด้วยวัสดุโพลีเมอร์ UV-15 และ SU-8 ลงบนแผ่นซิลิกอนด้วยกระบวนการพิมพ์ด้วยแสง (Photolithography) ร่วมกับกระบวนการเคลือบแบบหมุน (Spin coated) ผลคือคณะผู้วิจัยสามารถออกแบบและสร้างอุปกรณ์แยกแสงแบบ 4 ช่องสัญญาณขาออกซึ่งมีความเข้มของแสงใกล้เคียงกันทุกช่องสัญญาณ ($\sim 1:1:1:1$) เมื่ออุปกรณ์ดังกล่าวทำงานด้วยแสงในย่านความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร โดยอุปกรณ์แยกแสงดังกล่าวมีขนาด 23×10^3 ตารางไมโครเมตร และมีค่าการลดทอนสัญญาณ (Insertion loss) ที่ช่องสัญญาณขาออกแต่ละช่องประมาณ 27 เดซิเบล

ในปี ค.ศ.2012 Singhal R. และคณะ [12] ได้นำเสนออุปกรณ์แยกแสงแบบ 2 ช่องสัญญาณขาออก (1x2 optical splitter) โดยใช้โครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบโหมดเดี่ยวซึ่งมีแกนกลางขนาดเล็ก (Single-mode small-core Y-branch waveguide) ขนาดแกนกลางประมาณ 4 ตารางไมโครเมตร โดยการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีการการแพร่กระจายลำแสง (Beam Propagation method) และสร้างโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงด้วยเทคนิคการพิมพ์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV photolithography) โดยใช้วัสดุโพลีเมอร์ SU-8 เป็นส่วนแกนกลางของท่อนำคลื่นแสง และใช้วัสดุโพลีเมอร์ NOA 61 เป็นเปลือกหุ้มของท่อนำคลื่นแสง ผลคือคณะผู้วิจัยสามารถออกแบบ และสร้างอุปกรณ์แยกแสงแบบสองช่องสัญญาณขาออกซึ่งมีความเข้มของแสงใกล้เคียงกันทุกช่องสัญญาณ

(~1:~1) ทำงานในย่านความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร โดยอุปกรณ์แยกแสงดังกล่าวมีขนาด 7.2 มิลลิเมตร และมีค่าการลดทอนสัญญาณ (Insertion loss) ที่ช่องสัญญาณขาออกประมาณ 13 เดซิเบล

ในปี ค.ศ.2017 Burtscher C. และคณะ [13] ได้นำเสนออุปกรณ์แยกแสงแบบสามสิบสอง ช่องสัญญาณขาออก (1x32 optical splitter) โดยใช้โครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบ สมมาตรจากวัสดุซิลิกา (Silica) ซึ่งมีความแตกต่างของค่าดัชนีหักเหแสงระหว่างแกนกลางและ เปลือก หุ้มต่ำ (Low refractive index contrast) เพียง 0.75% ด้วยการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วย วิธีการการแพร่กระจายลำแสง ผลคือคณะผู้วิจัยสามารถออกแบบอุปกรณ์แยกแสงซึ่งมีขนาดยาว 86,000 ไมโครเมตร มีขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นแสง 30.25 ตารางไมโครเมตร ซึ่งมีกำลังการ แยกแสงที่แต่ละช่องสัญญาณแตกต่างกันมากที่สุด 0.26 เดซิเบล และมีค่าการลดทอนของสัญญาณ 15.33 เดซิเบล เมื่อทำงานด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร

ในปี ค.ศ.2021 Gaso P. และคณะ [14] ได้นำเสนออุปกรณ์แยกแสงสามมิติแบบสี่ช่องสัญญาณ ขาออก (3D 1x4 optical splitter) โดยใช้โครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบสมมาตรจากวัสดุ พอลิเมอร์ (Polymer based) ด้วยวิธีการเขียนด้วยเลเซอร์โดยตรง (Direct laser writing) ผลคือ คณะผู้วิจัยสามารถสร้างอุปกรณ์แยกแสงแบบสี่ช่องสัญญาณขาออกซึ่งมีความเข้มของแสงใกล้เคียงกัน ทุกช่องสัญญาณ (~1:~1:~1:~1) เมื่ออุปกรณ์ดังกล่าวทำงานด้วยแสงในย่านความยาวคลื่น 1550 นาโน เมตร โดยอุปกรณ์แยกแสงดังกล่าวมีขนาด 38.1×10^3 ตารางไมโครเมตร และ มีค่าการลดทอนสัญญาณ (Insertion loss) ที่ช่องสัญญาณขาออกแต่ละช่องประมาณ 3.56 เดซิเบล

2.5.2 อุปกรณ์แยกแสงบนท่อนำคลื่นแสงที่มีค่ากำลังการแยกแสงแบบไม่สมกำลัง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำท่อนำคลื่นแสงไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์แยกแสงบนท่อนำคลื่นแสงที่ มีค่ากำลังการแยกแสงแบบไม่สมกำลังมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์แยกแสงที่มีค่ากำลังการแยกแสงแบบไม่สมกำลังบนท่อนำ คลื่นแสง

Reference	Structure type	Application	Device size (μm^2)
[15]	1x2 PBG splitter with relocated triangular airhole	1x2 optical splitter with non-uniformity output	33.6
[16]	Asymmetric Y-junction waveguide with S-bend	1x2 optical splitter with non-uniformity output	1.08×10^6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี ค.ศ.2012 Huang C.C. และคณะ [15] ได้นำเสนอแบบจำลองของอุปกรณ์แยกแสงแบบสองช่องสัญญาณขาออก (1x2 optical splitter) แบบปรับค่ากำลังการแยกแสงได้โดยการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา โดยใช้วัสดุซิลิกอนบนฉนวน (Silicon-on-insulator : Si/SiO₂/Si) เป็นวัสดุสำหรับออกแบบอุปกรณ์ดังกล่าว ผลคือคณะผู้วิจัยสามารถออกแบบอุปกรณ์แยกแสงซึ่งมีขนาด 33.6 ตารางไมโครเมตร ซึ่งมีค่ากำลังการแยกแสงเมื่อทำงานด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร ที่สามารถปรับได้ตั้งแต่ 1:1 จนถึง 1:9 โดยการปรับตำแหน่งของโพรงอากาศ (Air hole) ภายในอุปกรณ์ให้มีตำแหน่งเข้าใกล้ช่องสัญญาณขาออกด้านใดด้านหนึ่ง โดยยังมีโครงสร้างแถบห้ามเชิงแสง (Photonics bandgap structure : PBG) ซึ่งเกิดจากโพรงอากาศรูปแบบต่าง ๆ ช่วยทำหน้าที่ในการควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ของแสงอีกภายในอุปกรณ์

ในปี ค.ศ.2020 Ab-Rahman M.S. และคณะ [16] ได้นำเสนออุปกรณ์แยกแสงแบบสองช่องสัญญาณขาออก (1x2 optical splitter) ซึ่งมีค่ากำลังการแยกแสงเปลี่ยนแปลงไปตามมุมระหว่างท่อนำคลื่นแสง (Branching angle) ของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายด้วยการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีการการแพร่กระจายลำแสง ผลคือคณะผู้วิจัยสามารถออกแบบอุปกรณ์แยกแสงซึ่งกำลังการแยกแสงแบบไม่สมกำลังตั้งแต่ 1:1 จนถึง 1:3 เมื่อมุมระหว่างท่อนำคลื่นทั้งสองเปลี่ยนแปลงไปในช่วง 5 ถึง 10 องศา

2.5.3 ตัวตรวจจับบนท่อนำคลื่นแสง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำท่อนำคลื่นแสงไปประยุกต์เป็นตัวตรวจจับบนท่อนำคลื่นแสงมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวตรวจจับบนท่อนำคลื่นแสง

Reference	Structure type	Application	Device size (μm ²)
[17]	Carbon-nanotube deposited long period fiber grating	Intensity-shift based RI sensor	2.6 cm-long
[18]	Symmetric Y-junction waveguide	Intensity-shift based pH sensor	2,100
[19]	Strip waveguide	Infrared absorption CO ₂ sensor	1,400
[20]	Single-mode-no-core-hollow-core-no-core-single-mode fiber	Intensity-shift based RI sensor	1.44x10 ⁵
[21]	Au-nanocubes on Au-film	Spectral-shift based RI sensor	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี ค.ศ.2014 Chow K.K และคณะ [17] ได้นำเสนอผลการวิจัยการพัฒนาตัวตรวจจับค่าดัชนีหักเหแสง (Refractive index sensor : RI sensor) ของของเหลว โดยการเคลือบวัสดุท่อนาโนคาร์บอน (Carbon-nanotube) ลงบนชั้นเปลือกหุ้มของเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งมีเกรตติงในลักษณะต่อเนื่อง (Long period grating) ที่บริเวณแกนกลาง ผลคือเมื่อดัชนีหักเหแสงของของเหลวที่รัยล้อมเส้นใยแก้วนำแสงดังกล่าวอยู่เกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วง 1.33 จนถึง 1.42 จะทำให้ความยาวคลื่นกึ่งกลางของแสงซึ่งเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) เนื่องจากเกรตติงภายในของเส้นใยแก้วนำแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงส่องผ่าน (Transmission intensity) ขึ้น ทำให้สามารถนำเส้นใยแก้วนำแสงดังกล่าวไปใช้ในการตรวจสอบดัชนีหักเหแสงของของเหลวในช่วงดังกล่าวได้

ในปี ค.ศ.2016 Sun H.B. และคณะ [18] ได้นำเสนออุปกรณ์แยกแสงแบบสองช่องสัญญาณขาออก (1x2 optical splitter) และแบบสี่ช่องสัญญาณขาออก (1x4 optical splitter) เพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลาย โดยใช้โครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบสมมาตรเป็นต้นแบบโดยการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีการการแพร่กระจายลำแสงและสร้างอุปกรณ์แยกแสงทั้งสองแบบด้วยโปรตีนเซรัมอัลบูมิน (Bovine serum albumin : BSA) ด้วยกระบวนการพิมพ์โดยตรงด้วยลำเลเซอร์แบบเฟมโตวินาที (Femtosecond laser direct writing : FsLDW) ผลคือสามารถสร้างอุปกรณ์แยกแสงซึ่งมีขนาด 2,100 ตารางไมโครเมตร ซึ่งมีการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายที่ถูกหยดลงบนอุปกรณ์โดยการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการส่องผ่านแสง (Splitting ratio) ที่ช่องสัญญาณขาออกในช่วง pH 2.0 จนถึง 6.0 ตั้งแต่ 1:1 จนถึง 1.85:1

ในปี ค.ศ.2018 Ranacher C. และคณะ [19] ได้นำเสนอตัวตรวจจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) โดยใช้โครงสร้างท่อนำคลื่นแสงซิลิกอน (Silicon waveguide) ขนาด 1,400 ตารางไมโครเมตร โดยการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา และเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element method : FEM) และ สร้างอุปกรณ์ดังกล่าวด้วยเทคนิคการเคลือบแบบระเหยไอของสารเคมี (Chemical vapor deposition) ร่วมกับกระบวนการพิมพ์ลาย (Lithography) และกระบวนการกัดด้วยกรดแบบแห้งและเปียก (Dry/wet etching) ผลคือสามารถสร้างตัวตรวจจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งทำงานด้วยแสงที่ย่านความยาวคลื่น 4260 นาโนเมตร โดยอาศัยหลักการการดูดกลืนแสงในย่านอินฟราเรด (Infrared absorption) ของแก๊สได้ที่ความเข้มข้นต่ำถึง 5,000 ppm

ในปี ค.ศ. 2019 Yin B. และคณะ [20] ได้นำเสนอโครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสงแบบพิเศษที่นำเอาเส้นใยแก้วนำแสงแบบโหนดเดี่ยวมาเชื่อมต่อเข้ากับเส้นใยแก้วนำแสงแบบไร้แกนกลางและ แบบแกนกลางกลวง (Single-mode-no-core-hollow-core-no-core-single-mode : SNHNS) มาใช้เป็นตัวตรวจจับค่าดัชนีหักเหแสงร่วมกับแหล่งกำเนิดแสงซึ่งมีความยาวคลื่น 1550.11 และ 1553.62 นาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมตร ผลคือเมื่อดัชนีหักเหแสงของของเหลวที่รัยล้อมเส้นใยแก้วนำแสงดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนแปลง ในช่วง 1.334 จนถึง 1.384 จะทำให้ความเข้มแสงส่องผ่านของแสงทั้งสองความยาวคลื่นเกิดการเปลี่ยนแปลง

ในปี ค.ศ. 2019 Wang X. และคณะ [21] ได้นำเสนอโครงสร้างของตัวตรวจจับค่าดัชนีหักเหแสง ซึ่งมีช่วงการวัดค่าดัชนีหักเหแสงตั้งแต่ 1.0 จนถึง 1.8 โดยการสร้างโครงสร้างของลูกบาศก์ทองขนาดนาโน (Au-nanocubes) ลงบนฟิล์มบางทองคำ (Au film) ผลที่ได้คือโครงสร้างดังกล่าวจะเกิดการสั่นพ้องของพลาสมอนที่พื้นผิว (Surface plasmon resonances) ของโลหะทองทำให้คลื่นแสงเกิดการเปลี่ยนความยาวคลื่นกึ่งกลางของสเปกตรัมที่โหดต่าง ๆ กัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการออกแบบท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตรที่ใช้ในย่านความยาวคลื่นเฉพาะสำหรับการสื่อสารด้วยแสงสองความยาวคลื่น ได้แก่ ย่านความยาวคลื่น 1480 และ 1550 นาโนเมตร โดยเริ่มจากการศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงในท่อนำคลื่นแบบตรงที่สร้างจากวัสดุอินเดียมฟอสไฟด์เพื่อพิจารณาการลดทอนของแสงในโครงสร้างท่อนำคลื่นโดยอาศัยการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา (Finite difference time domain : FDTD) ด้วยโปรแกรมสร้างแบบจำลองสำเร็จรูป OptiFDTD ของบริษัท OptiWave Inc. จากนั้นจึงเป็นการศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงของท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบสมมาตร และแบบไม่สมมาตรซึ่งมีโครงสร้างแบบหนึ่งช่องสัญญาณขาเข้า และสองช่องสัญญาณขาออก เพื่อเปรียบเทียบค่ากำลังการแยกแสงระหว่างช่องสัญญาณขาออกทั้งสองเมื่อลักษณะโครงสร้างของท่อนำคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงไป

จากนั้นจึงเป็นการศึกษาความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับค่ากำลังการแยกแสงของท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกถูกเพิ่มเข้าไปยังบริเวณกึ่งกลางของช่องสัญญาณขาออกทั้งสอง โดยข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกที่ถูกเพิ่มเข้ามานี้จะถูกเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง หรือค่าดัชนีหักเหแสง ความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำมาวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นเพื่อหาความสอดคล้องสำหรับการนำท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกไปประยุกต์เข้ากับงานในด้านการสื่อสารด้วยแสงโดยการประยุกต์เป็นอุปกรณ์แยกแสงบนท่อนำคลื่นแสง (Beam splitter based on optical waveguide) หรือการนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านความปลอดภัยเป็นอุปกรณ์ตรวจจับค่าดัชนีหักเหแสงบนท่อนำคลื่นแสง (Refractive index sensor based on optical waveguide) ในขั้นตอนต่อไป

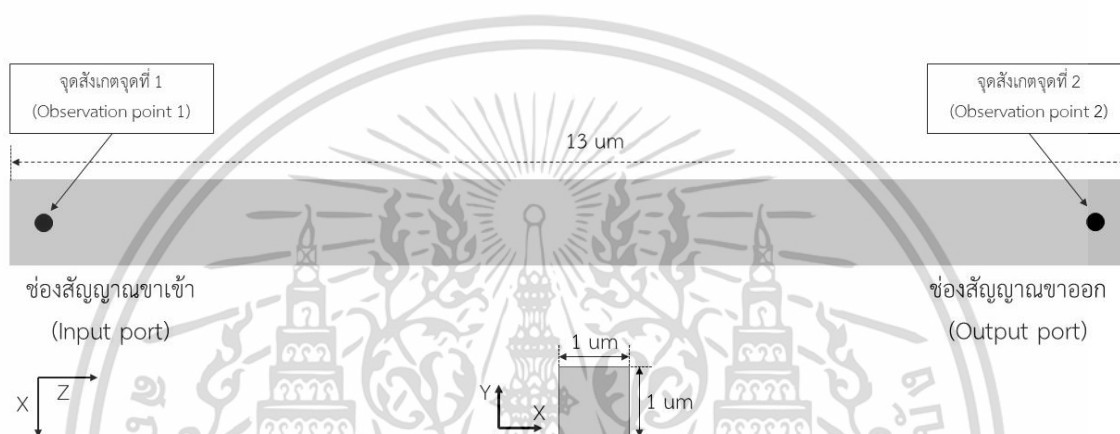
3.1 การศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงของท่อนำคลื่นแสงแบบตรง

ท่อนำคลื่นแสงแบบตรง (Straight optical waveguide) เป็นท่อนำคลื่นแสงที่มีลักษณะตรงทำหน้าทีควบคุมให้แสงเคลื่อนที่ไปตามทิศทางที่ต้องการ โดยท่อนำคลื่นแสงแบบตรงที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้จะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 ลักษณะโครงสร้างและวัสดุของท่อนำคลื่นแสงแบบตรง

ลักษณะโครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงแบบตรงที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้จะมีขนาดพื้นที่หน้าตัดสูงและกว้างด้านละ 1 ไมโครเมตร มีความยาว 13 ไมโครเมตร และมีการกำหนดให้มีจุดสังเกต (Observation point) อยู่ห่างจากปลายของช่องสัญญาณขาเข้าและขาออกฝั่งละ 1 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 3.1 สำหรับวัดปริมาณความเข้มของสนามแม่เหล็ก หรือสนามไฟฟ้าในแต่ละแนวแกน (H_x , H_z , และ E_y) ซึ่งสอดคล้องกับคลื่นแสงที่เคลื่อนที่ในโหมดสนามไฟฟ้าตามขวาง (TE mode) เพื่อนำค่าดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์ผลการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลาต่อไป



รูปที่ 3.1 ท่อนำคลื่นแสงแบบตรง

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีลักษณะแบบลำแสงเกาส์เซียน (Gaussian beam) มีความกว้างเต็มสูงสุดครึ่งหนึ่ง (Full width at half maximum : FWHM) 20 นาโนเมตร และมีความยาวคลื่นกึ่งกลาง (Center wavelength) อยู่ในย่านความยาวคลื่น 1480 และ 1550 นาโนเมตร ในโหมดพื้นฐาน (Fundamental mode) จะถูกกำหนดให้เคลื่อนที่จากช่องสัญญาณขาเข้าไปยังช่องสัญญาณขาออกโดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ (Propagation direction) ขนานไปกับแนวแกน Z เพื่อศึกษาสมบัติการส่องผ่านแสงของท่อนำคลื่นแสงเมื่อมีคลื่นแสงในย่านความยาวคลื่นทั้งสองเคลื่อนที่ผ่าน

โครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงที่ได้ถูกศึกษาในวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้ถูกออกแบบโดยใช้วัสดุอินเดียมฟอสไฟด์ (Indium phosphide : InP) [22-23] ซึ่งมีค่าสมบัติเฉพาะตัวดังข้อมูลที่แสดงด้วยตารางที่ 3.1 เป็นวัสดุที่ใช้สำหรับบริเวณแกนกลางของท่อนำคลื่นแสง โดยมีมีฐานรองและเปลือกหุ้มของท่อนำคลื่นแสงเป็นอากาศซึ่งมีค่าดัชนีหักเหแสงเป็น 1.00 ที่ความยาวคลื่นแสงทั้งสองความยาวคลื่น

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเฉพาะตัวของอินเดียมฟอสไฟด์

สูตรทางเคมี	InP
โครงสร้างผลึก	Zinc blende
ความหนาแน่น (ในสถานะของแข็ง)	4.71 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	1,062°C (1,335 K)
ช่องว่างแถบพลังงาน (Bandgap)	1.334 eV (ที่ 300 K)
ชนิดช่องว่างแถบพลังงาน	แบบตรง (Direct bandgap)
ดัชนีหักเหแสง (Refractive index)	3.1 (Infrared)
	3.1649 (ที่ 1550 nm)
	3.1734 (ที่ 1480 nm)
ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนแสง (Absorption coefficient)	324.98 cm ⁻¹ (ที่ 1550 nm)
	357.59 cm ⁻¹ (ที่ 1480 nm)

อินเดียมฟอสไฟด์เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายสำหรับใช้สร้างอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (Optoelectronics devices) จำพวกเลเซอร์ไดโอด (Laser diodes) ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode : LED) หรือตัวตรวจจับแสง (Photodetectors) เนื่องจากอินเดียมฟอสไฟด์มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (Direct bandgap) และสามารถเปล่งแสงได้ในย่านอินฟราเรดซึ่งเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งมีการลดทอนความเข้มแสงต่ำในช่วงความยาวคลื่น 1510 จนถึง 1600 นาโนเมตร

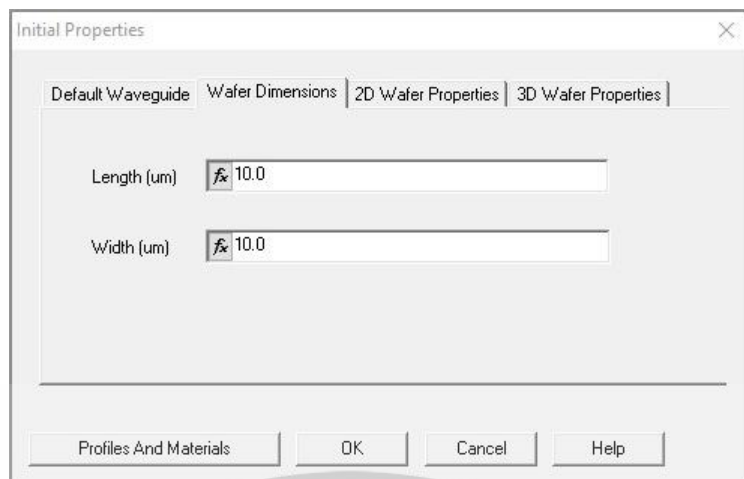
จำนวนโหมดการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นแสงสามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 2.47 และ 2.48 จากโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงซึ่งมีลักษณะโครงสร้าง และค่าดัชนีหักเหของวัสดุตามข้อมูลที่ปรากฏในวิทยานิพนธ์นี้ มีจำนวนห้าโหมดสำหรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร และสี่โหมดสำหรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร

3.1.2 การสร้างแบบจำลองสำหรับท่อนำคลื่นแสงด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา

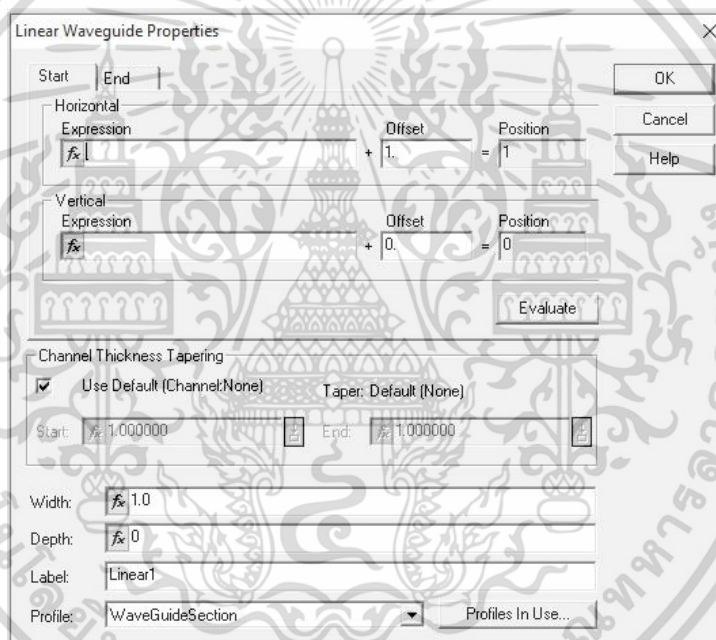
การสร้างแบบจำลองสำหรับท่อนำคลื่นแสงด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลาด้วยโปรแกรม OptiFDTD มีขั้นตอนการทำงานตามส่วนประกอบย่อยทั้งสามของโปรแกรมหาดังนี้

1) ส่วนของโปรแกรม OptiFDTD Designer สำหรับการกำหนดคุณสมบัติและลักษณะโครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงที่ต้องการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 หน้าต่างสำหรับกำหนดค่าสมบัติเริ่มต้นภายในโปรแกรม OptiFDTD Designer

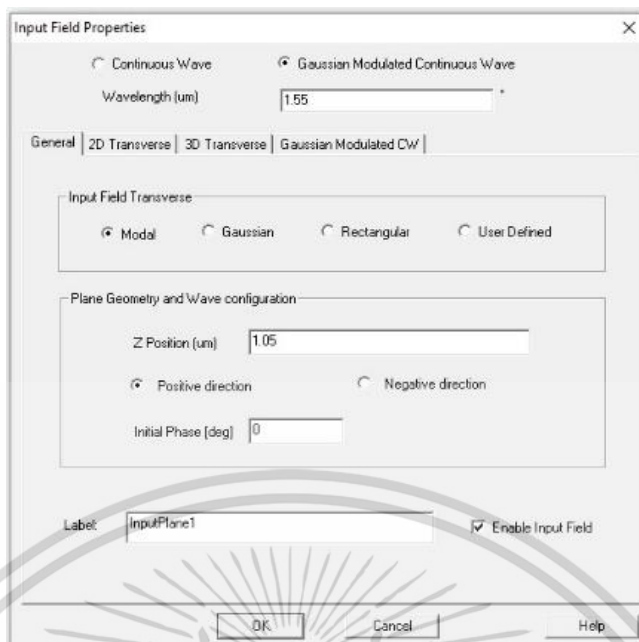


รูปที่ 3.3 หน้าต่างสำหรับการกำหนดสมบัติของโครงสร้างท่อนำคลื่นภายในโปรแกรม OptiFDTD Designer

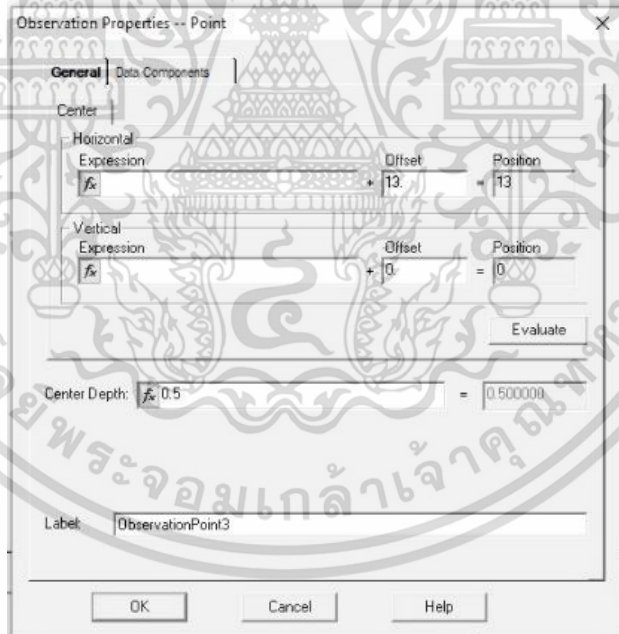
1.1) กำหนดค่าสมบัติเริ่มต้น (Initial properties) ต่าง ๆ ของโครงสร้างทางแสงที่ต้องการได้แก่ ขนาดของแผ่นเวเฟอร์ (Wafer dimensions) สมบัติของแผ่นเวเฟอร์ (Wafer properties) สมบัติทางแสงของวัสดุ (Profiles and materials) ดังรูปที่ 3.2

1.2) สร้างโครงสร้างทางแสงโดยการกำหนดสมบัติ ขนาดและตำแหน่งของโครงสร้างท่อนำคลื่น (Waveguide properties) ตามที่ได้มีการออกแบบไว้ ดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 หน้าต่างสำหรับการกำหนดสมบัติของสนามคลื่นแสงขาเข้าภายในโปรแกรม OptiFDTD Designer



รูปที่ 3.5 หน้าต่างสำหรับการกำหนดสมบัติของจุดสังเกตภายในโปรแกรม OptiFDTD Designer

1.3) กำหนดสมบัติและตำแหน่งของสนามคลื่นแสงขาเข้า (Input field properties) ที่ต้องการใช้ในการศึกษา ดังรูปที่ 3.4

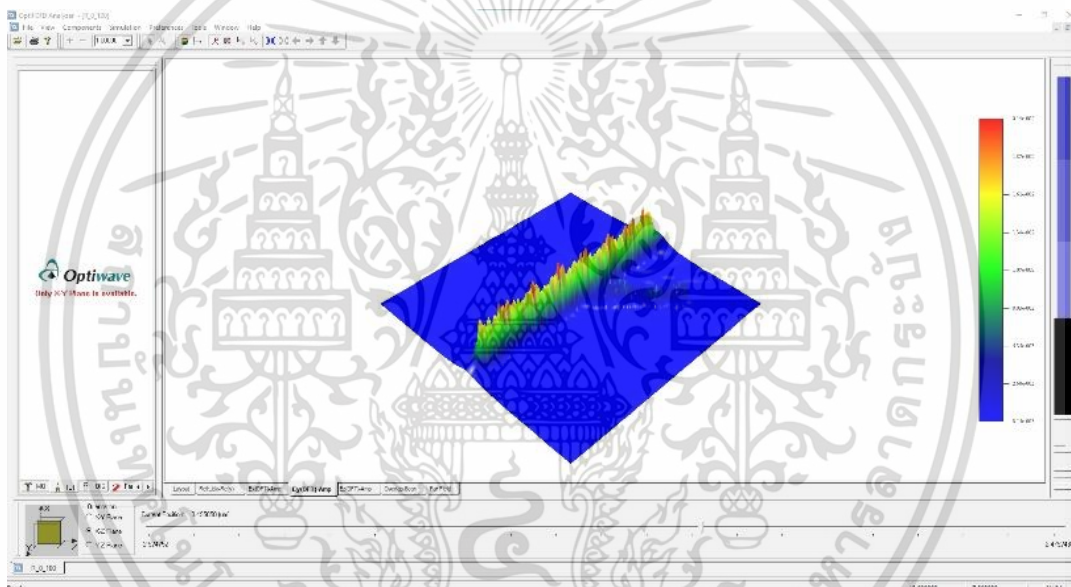
1.4) กำหนดสมบัติและตำแหน่งของจุดสังเกตที่ต้องการ (Observation properties) ที่ต้องการ ดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ส่วนของโปรแกรมฯ OptiFDTD Simulator สำหรับการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากสมบัติ และลักษณะโครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงที่ต้องการศึกษา

2.1) กำหนดพารามิเตอร์ในกระบวนการการจำลองแบบด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา (Simulation parameters) ได้แก่ รูปแบบการสั้นของสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก (TE หรือ TM mode) ขนาดของพื้นที่ที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละลำดับเวลา (Mesh parameters) จำนวนลำดับเวลา (Time steps) ขนาดของลำดับเวลา (Time step size)

2.2) โปรแกรมในส่วนของ OptiFDTD Simulator ทำการจำลองแบบโดยการคำนวณสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในแต่ละลำดับเวลาตามรายละเอียดที่ได้กำหนดไว้



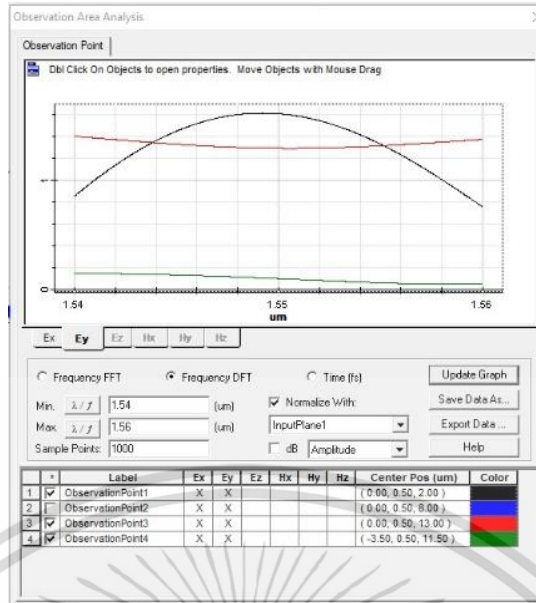
รูปที่ 3.6 หน้าต่างการทำงานภายในโปรแกรม OptiFDTD Analyzer

3) ส่วนของโปรแกรมฯ OptiFDTD Analyzer สำหรับการแสดงผลการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากสมบัติและลักษณะโครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงที่ต้องการศึกษาเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการจำลองแบบ เพื่อให้ผู้ใช้งานนำข้อมูลดังกล่าวไปวิเคราะห์ในลำดับต่อไป

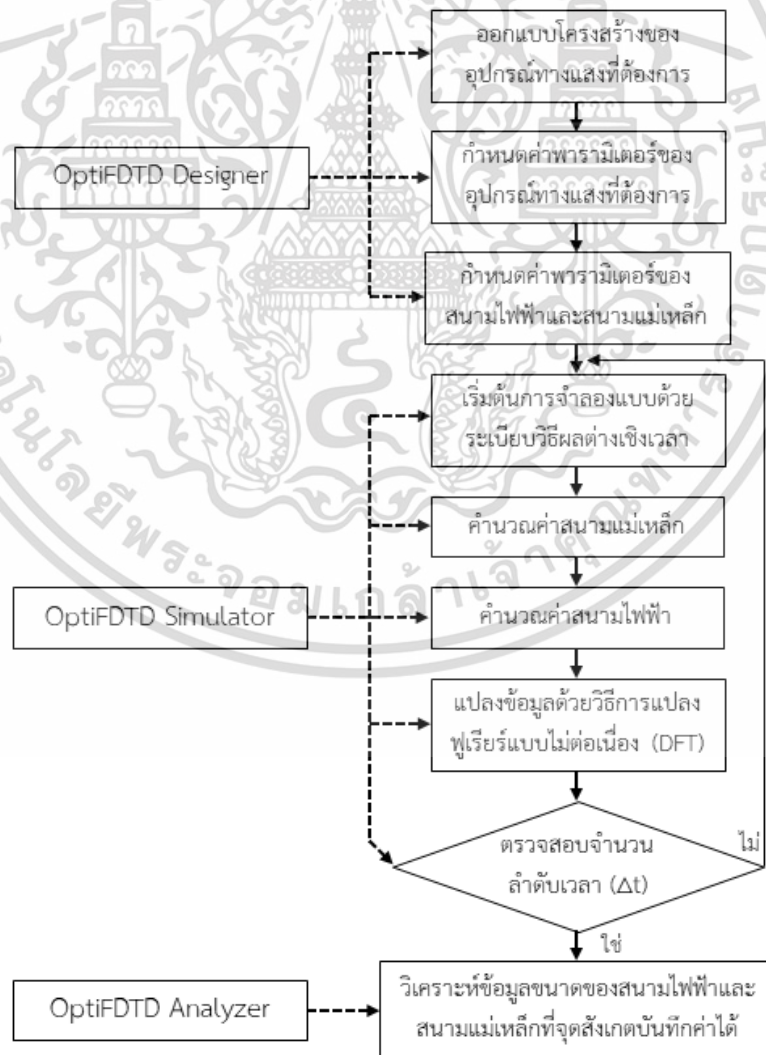
3.1) โปรแกรมในส่วนของ OptiFDTD Analyzer จะรวบรวมผลการคำนวณที่ได้จากระเบียบวิธีดังกล่าวจะแสดงผลในรูปของขนาดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเทียบกับโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงตามแนวแกน X, Y และ Z ดังรูปที่ 3.6

3.2) ตรวจสอบค่าสนามไฟฟ้าที่จุดสังเกต (Observation point) แต่ละจุดสามารถบันทึกค่าไว้ดังรูปที่ 3.7 นำผลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ค่าที่จุดสังเกตสามารถบันทึกได้ภายในโปรแกรม OptiFDTD Analyzer



รูปที่ 3.8 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม OptiFDTD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเชิงในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เห็นไปขอประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม OptiFDTD จะเป็นไปตามรูปที่ 3.8 โดยเริ่มจากการออกแบบโครงสร้างของท่อนำคลื่นที่ต้องการด้วยส่วนของโปรแกรม OptiFDTD Designer จากนั้นจึงกำหนดค่าพารามิเตอร์ทางแสงของวัสดุและค่าพารามิเตอร์ในการทำงานของโปรแกรม เมื่อเริ่มกระบวนการจำลองแบบด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลาโดยใช้ส่วนของโปรแกรม OptiFDTD Simulator ค่าสนามแม่เหล็กในลำดับเวลาที่ $t+1/2$ จะถูกคำนวณจากค่าสนามไฟฟ้าตั้งต้นร่วมกับสมบัติทางแสงของวัสดุและลักษณะของโครงสร้าง ผลที่ได้จะถูกนำไปคำนวณเป็นค่าสนามไฟฟ้าที่ลำดับเวลาถัดไป ร่วมกับสมบัติทางแสงของวัสดุและลักษณะของโครงสร้าง จากนั้นลำดับเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะถูกตรวจสอบว่าครบถ้วนตามที่ได้กำหนดไว้แล้วหรือไม่ ข้อมูลการคำนวณที่ได้จะถูกส่งไปคำนวณค่าสนามแม่เหล็กของลำดับเวลาถัดไปหากการคำนวณยังไม่ถึงลำดับเวลาที่กำหนดไว้ แต่หากมีการคำนวณจนครบตามจำนวนลำดับเวลาที่กำหนดไว้ข้อมูลผลการคำนวณจะถูกส่งต่อไปยังส่วนของโปรแกรม OptiFDTD Analyzer เพื่อให้ผู้ใช้งานได้นำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อไป

3.1.3 การวิเคราะห์สมบัติของท่อนำคลื่นแสงแบบตรง

ผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของท่อนำคลื่นที่ได้มีการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ จะถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านแสงของโครงสร้าง โดยการนำค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน Y ซึ่งจุดสังเกตสามารถบันทึกค่าได้มาคำนวณเป็นค่าความเข้มแสงของคลื่นแสงในแต่ละความยาวคลื่นเมื่อค่าความเข้มแสงมีค่าเป็นกำลังสองของขนาดของสนามไฟฟ้า จากนั้นค่าความเข้มแสงที่จุดสังเกตสามารถบันทึกได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ค่าความเข้มแสงส่องผ่าน (Optical transmission : T) คือ ค่าที่บ่งบอกปริมาณของความเข้มแสงที่ส่องผ่านที่ช่องสัญญาณขาออกเมื่อเทียบกับความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขาเข้า ค่าความเข้มแสงส่องผ่านสำหรับท่อนำคลื่นแบบตรงในวิทยานิพนธ์นี้สามารถพิจารณาได้โดยอาศัยสมการ

$$T = \frac{I_{out}}{I_{in}} \times 100\% \quad (3.1)$$

เมื่อ T คือ ค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่ช่องสัญญาณขาออก, I_{out} คือ ค่าความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขาออก และ I_{in} คือ ค่าความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขาเข้า ค่าความเข้มแสงส่องผ่านดังกล่าวจะมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (Percentage : %)

2) ค่าการลดทอนของสัญญาณ (Insertion loss : IL) [24] คือ ค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณการลดทอนของสัญญาณที่เคลื่อนที่ในตัวกลาง โดยค่าการลดทอนของสัญญาณนี้ถือได้ว่าเป็นค่าที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในการบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทางแสงภายในเครือข่ายการสื่อสารด้วยแสงว่ามีความเหมาะสมเพียงพอที่จะนำไปใช้หรือไม่

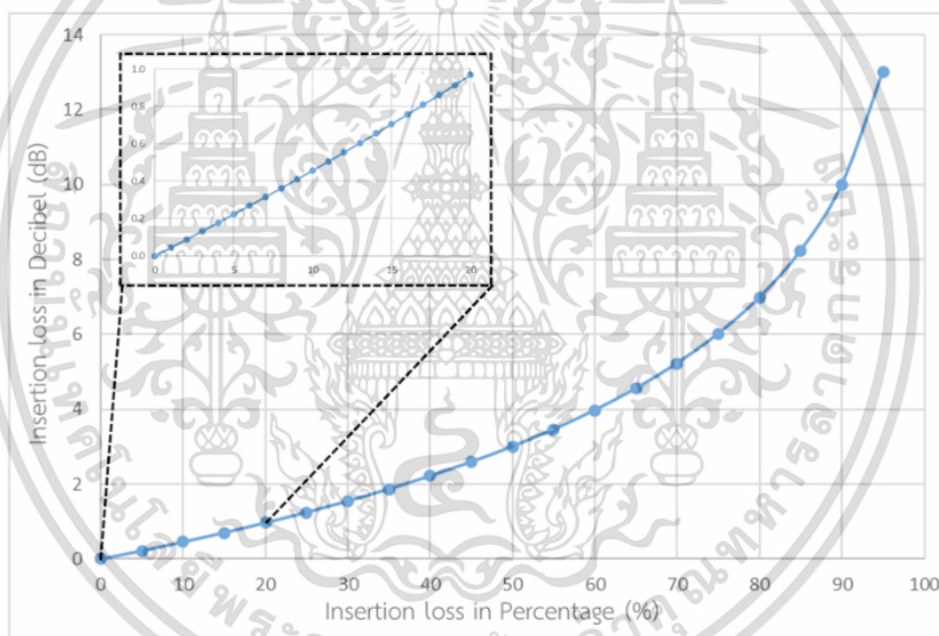
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการลดทอนของสัญญาณจะถูกบ่งบอกในหน่วยของเดซิเบล (Decibel : dB) โดยการเปรียบเทียบค่ากำลังของแสงขาเข้าและขาออกจากตัวอุปกรณ์ที่ต้องการพิจารณา ดังสมการต่อไปนี้

$$IL(\text{dB}) = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{out}}} \quad (3.2)$$

เมื่อ P_{in} คือ ค่ากำลังของแสงขาเข้า และ P_{out} คือ ค่ากำลังของแสงขาออก

โดยค่าการลดทอนของสัญญาณในหน่วยเดซิเบลจะสัมพันธ์กับค่าการลดทอนของสัญญาณในหน่วยเปอร์เซ็นต์ดังรูปที่ 3.9 ในลักษณะที่เป็นเชิงเส้นในช่วงที่ค่าการลดทอนของสัญญาณมีค่าตั้งแต่ 0 จนถึง 20 เปอร์เซ็นต์ หรือ 0 จนถึง 1.0 เดซิเบล ดังกรอบขยายมุมซ้ายบนในรูปที่ 3.9 ในขณะที่ช่วงอื่นๆ จะมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยทั่วไปหากค่าการลดทอนของสัญญาณมีค่ามากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ หรือ 3 dB จะถือว่าอุปกรณ์นั้นไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในเครือข่ายการสื่อสารด้วยแสง



รูปที่ 3.9 การเปรียบเทียบค่าการลดทอนของสัญญาณระหว่างหน่วยเปอร์เซ็นต์ (Percentage) กับหน่วยเดซิเบล (Decibel : dB)

ค่าการลดทอนของสัญญาณสำหรับท่อนำคลื่นแสงแบบตรงในวิธานิพนธ์นี้จะถูกวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบค่าความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขาเข้ากับค่าความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขาออกดังสมการ

$$IL(\text{db}) = 10 \log_{10} \frac{I_{\text{in}}}{I_{\text{out}}} \quad (3.3)$$

เมื่อ I_{in} คือ ค่าความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขาเข้า และ I_{out} คือ ค่าความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขา

ออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient) คือ ค่าที่บ่งบอกว่าตัวกลางที่คลื่นแสงเคลื่อนที่ผ่านมีการดูดกลืนคลื่นแสงมากหรือน้อยเพียงใด ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงนี้จะสัมพันธ์กับระยะทางที่แสงเคลื่อนที่ผ่านดังสมการ

$$I_{\text{out}} = I_{\text{in}} e^{-\alpha x} \quad (3.4)$$

เมื่อ I_{in} คือ ค่าความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขาเข้า, I_{out} คือ ค่าความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขาออก α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และ x คือ ระยะทางที่คลื่นแสงเคลื่อนที่ในตัวกลาง

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจึงสัมพันธ์กับค่าความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขาเข้า ค่าความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขาออก และระยะทางที่คลื่นแสงเคลื่อนที่ในตัวกลางดังสมการ

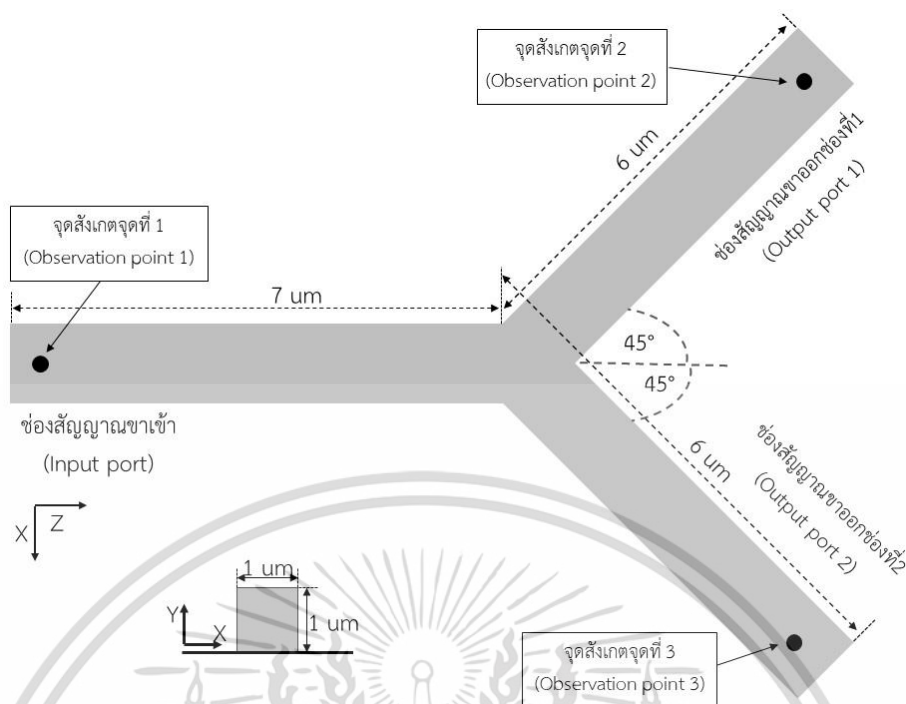
$$\alpha = -\frac{1}{x} \ln \frac{I_{\text{out}}}{I_{\text{in}}} \quad (3.5)$$

3.2 การศึกษาสมบัติการส่องผ่านแสงของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววาย

ท่อนำคลื่นแสงรูปตัววาย (Y-junction optical waveguide) เป็นท่อนำคลื่นแสงซึ่งมีช่องสัญญาณขาเข้า (Input port) หนึ่งช่องสัญญาณ และมีช่องสัญญาณขาออก (Output port) สองช่องสัญญาณ โดยโครงสร้างของช่องสัญญาณขาออกมีลักษณะคล้ายตัววาย (Y) ทำหน้าที่ควบคุมให้คลื่นแสงเคลื่อนที่ไปตามทิศทางที่ต้องการ ค่ากำลังการแยกแสงของท่อนำคลื่นรูปตัววายจะมีความแตกต่างกันขึ้นกับลักษณะโครงสร้างของช่องสัญญาณขาออกทั้งสอง โดยมีการกำหนดสมบัติของคลื่นแสง และกระบวนการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์เช่นเดียวกับที่ปรากฏในหัวข้อ “3.1 การศึกษาสมบัติการส่องผ่านแสงของท่อนำคลื่นแสงแบบตรง” โครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้มีสองลักษณะ คือ ท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบสมมาตร และท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตร ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 ท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบสมมาตร

ท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบสมมาตร (Symmetric Y-junction optical waveguide) เป็นท่อนำคลื่นแสงซึ่งมีลักษณะของช่องสัญญาณขาออกทั้งสองที่สมมาตรกัน ทั้งมุมระหว่างช่องสัญญาณขาออกทั้งสอง ขนาดของท่อนำคลื่น และวัสดุที่นำมาใช้เป็นท่อนำคลื่น ท่อนำคลื่นแสงในลักษณะนี้สามารถแบ่งคลื่นแสงให้แยกออกเป็นสองส่วนเท่า ๆ กันและเคลื่อนที่ไปตามทิศทางที่ต้องการ โดยท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบสมมาตรที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้จะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

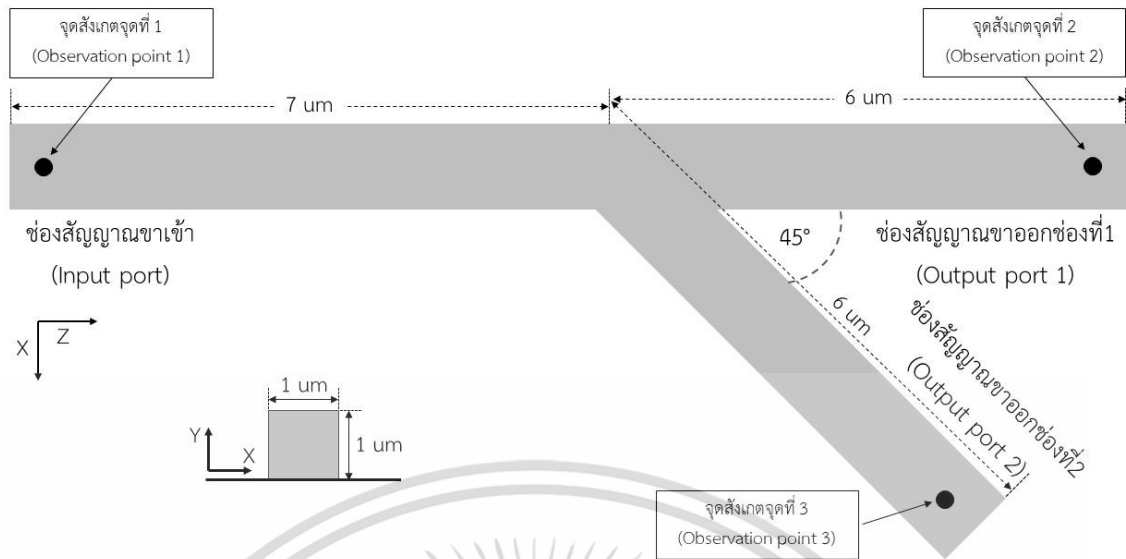


รูปที่ 3.10 ลักษณะโครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบสมมาตร

ท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบสมมาตรจะถูกออกแบบให้ลักษณะโครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงมีความสูงและความกว้างด้านละ 1 ไมโครเมตร มีความยาวของช่องสัญญาณขาเข้า 7 ไมโครเมตร และช่องสัญญาณขาออกช่องละ 6 ไมโครเมตร มีมุมที่ช่องสัญญาณขาออกทั้งสองเท่ากับแนวกึ่งกลางของช่องสัญญาณขาเข้า (Branching angle) 45 องศา ดังรูปที่ 3.10 โดยมีการกำหนดให้มีจุดสังเกตอยู่ที่ปลายของช่องสัญญาณขาเข้าและขาออกฝั่งละ 1 ไมโครเมตร สำหรับวัดปริมาณความเข้มของสนามแม่เหล็ก หรือสนามไฟฟ้าในแต่ละแนวแกนเพื่อนำค่าดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์ผล

3.2.2 ท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตร

ท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตร (Asymmetric Y-junction optical waveguide) เป็นท่อนำคลื่นแสงซึ่งมีลักษณะของช่องสัญญาณขาออกทั้งสองที่ไม่สมมาตรกัน โดยความแตกต่างระหว่างลักษณะโครงสร้างของช่องสัญญาณขาออกอาจเป็นได้ทั้งมุมระหว่างช่องสัญญาณขาออกทั้งสอง ขนาดของท่อนำคลื่น หรือวัสดุที่นำมาใช้เป็นท่อนำคลื่น โดยท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้จะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.11 ลักษณะโครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตร

ท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรจะถูกออกแบบให้ลักษณะโครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงมีความสูงและความกว้างด้านละ 1 ไมโครเมตร มีความยาวของช่องสัญญาณขาเข้า 7 ไมโครเมตร และช่องสัญญาณขาออกช่องละ 6 ไมโครเมตร โดยช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 มีลักษณะต่อเนื่องมาจากช่องสัญญาณขาเข้า ในขณะที่ช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 2 ทำมุมกับช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 เป็นมุม 45 องศา ดังรูปที่ 3.11

3.2.3 การวิเคราะห์สมบัติของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววาย

การวิเคราะห์สมบัติของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายทั้งสองลักษณะจะมีความแตกต่างจากท่อนำคลื่นแสงแบบตรงเนื่องจากลักษณะที่ต่างกันของโครงสร้างท่อนำคลื่นแสง ค่าความเข้มแสงที่จุดสังเกตสามารถบันทึกได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ค่าความเข้มแสงส่องผ่าน (Optical transmission : T) คือ ค่าที่บ่งบอกปริมาณของความเข้มแสงที่ส่องผ่านในแต่ละช่องสัญญาณขาออกเมื่อเทียบกับความเข้มแสงทั้งหมดที่ส่องผ่านช่องสัญญาณทั้งสองช่องสัญญาณ ค่าความเข้มแสงส่องผ่านของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายในวิทยานิพนธ์นี้สามารถพิจารณาได้โดยอาศัยสมการ

$$T_n = \frac{I_n}{I_1 + I_2} \times 100\% \quad (3.6)$$

เมื่อ T_n คือ ค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่ช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 หรือช่องที่ 2 ที่ต้องการพิจารณา, I_n คือ ค่าความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 หรือช่องที่ 2 ที่ต้องการพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่ I_1 คือ ค่าความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 และ I_2 คือ ค่าความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 2 ค่าความเข้มแสงส่องผ่านดังกล่าวจะมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

2) ค่าการลดทอนของสัญญาณสำหรับท่อนำคลื่นรูปตัววายในวิทยานิพนธ์นี้จะถูกวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบค่าความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขาเข้ากับค่าความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขาออกดังสมการ

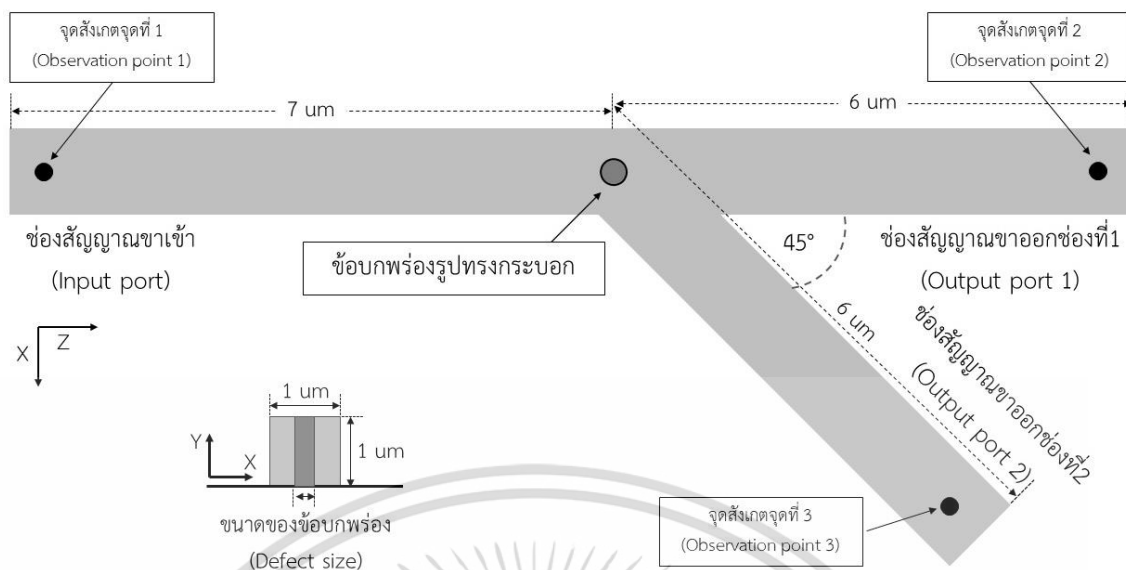
$$IL(\text{db}) = 10 \log_{10} \frac{I_{in}}{(I_1+I_2)} \quad (3.7)$$

เมื่อ I_{in} คือ ค่าความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขาเข้า ในขณะที่ I_1 คือ ค่าความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 และ I_2 คือ ค่าความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 2

3.3 การศึกษาสมบัติการส่องผ่านแสงของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกอยู่ที่บริเวณรอยต่อของช่องสัญญาณขาออก

จากการศึกษาท่อนำคลื่นซึ่งมีลักษณะโครงสร้างแตกต่างกันถึงสามลักษณะ ได้แก่ โครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงแบบตรง โครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบสมมาตร และโครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตร พบว่าลักษณะที่แตกต่างกันของโครงสร้างทั้งสามทำให้ค่าความเข้มแสงส่องผ่าน และค่าการลดทอนของสัญญาณมีค่าแตกต่างกันไปด้วย ดังนั้นจึงได้นำเอาข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมาประยุกต์เข้ากับโครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเพื่อศึกษาสมบัติการส่องผ่านแสงที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาด หรือค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องและการนำไปประยุกต์ใช้ โดยมีการกำหนดสมบัติของคลื่นแสง และกระบวนการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์เช่นเดียวกับที่ปรากฏในหัวข้อ “3.1 การศึกษาสมบัติการส่องผ่านแสงของท่อนำคลื่นแสงแบบตรง”

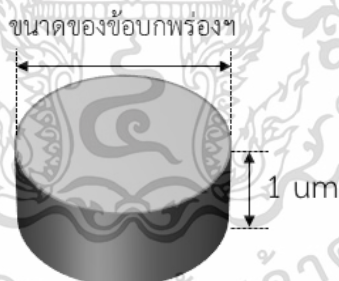
ท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรที่ศึกษาในหัวข้อนี้จะมีลักษณะโครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงเช่นเดียวกับที่แสดงในหัวข้อ “3.2.2 ท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตร” โดยมีการเพิ่มข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก (Cylindrical rod defect) ซึ่งมีลักษณะเป็นโพรงอากาศรูปทรงกระบอกภายในโครงสร้างท่อนำคลื่นที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างช่องสัญญาณขาออกทั้งสองดังรูปที่ 3.12 ข้อบกพร่องที่ถูกเพิ่มเข้ามานี้จะถูกเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง หรือค่าดัชนีหักเหแสงตามรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.12 ท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก

3.3.1 ท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก

การเปลี่ยนแปลงขนาดของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกที่ถูกเพิ่มที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างช่องสัญญาณขาออกของโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรมีลักษณะดังรูปที่ 3.13



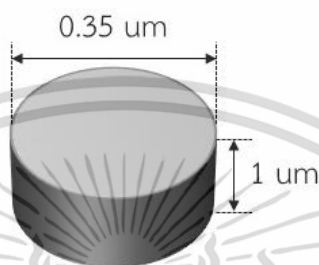
รูปที่ 3.13 ลักษณะของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

ข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกที่ถูกเพิ่มที่บริเวณรอยต่อของช่องสัญญาณขาออกนี้จะมีขนาดความสูง 1 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 3.13 และถูกกำหนดให้มีค่าดัชนีหักเหแสงเท่ากับ 1.00 โดยมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางครั้งละ 0.01 ไมโครเมตร เมื่อข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีขนาดตั้งแต่ 0.20 จนถึง 0.50 ไมโครเมตร เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นกับสมบัติการส่งผ่านแสงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของข้อบกพร่อง โดยการดัดแปลงโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงให้มีขนาดตามที่ต้องการภายในโปรแกรม OptiFDTD Designer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงของ ข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก

การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกที่ถูกเพิ่มที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างช่องสัญญาณขาออกของโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรมีลักษณะดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ลักษณะของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสง

ข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกที่ถูกเพิ่มที่บริเวณรอยต่อของช่องสัญญาณขาออกนี้จะมีขนาดความสูง 1 ไมโครเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.35 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 3.14 โดยเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงครั้งละ 0.10 เมื่อค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องมีค่าตั้งแต่ 1.00 จนถึง 2.50 และมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงครั้งละ 0.01 เมื่อค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องมีค่าตั้งแต่ 1.00 จนถึง 1.50 เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นกับสมบัติการส่งผ่านแสงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่อง โดยการตัดแปลงโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงให้มีค่าดัชนีหักเหแสงตามที่ต้องการภายในโปรแกรม OptiFDTD Designer

3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีข้อบกพร่องรูป ทรงกระบอกอยู่ที่บริเวณรอยต่อของช่องสัญญาณขาออก

การวิเคราะห์สมบัติการส่งผ่านแสงของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกอยู่ที่บริเวณรอยต่อของช่องสัญญาณขาออกจะมีส่วนที่เหมือนกันกับการวิเคราะห์สมบัติของท่อนำคลื่นรูปตัววายดังที่ได้แสดงในหัวข้อ “3.2.3 การวิเคราะห์สมบัติของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววาย” และส่วนที่เพิ่มเติมดังนี้

1) ค่ากำลังการแยกแสง (Splitting ratio) คือ ค่าที่บ่งบอกอัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มแสงส่งผ่านที่ช่องสัญญาณขาออกทั้งสองของท่อนำคลื่นแสง ค่ากำลังการแยกแสงของท่อนำคลื่นแสงในวิทยานิพนธ์นี้สามารถพิจารณาได้โดยอาศัยสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Splitting ratio} = \frac{T_1}{T_2} \quad (3.8)$$

เมื่อ T_1 คือ ค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่ช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 และ T_2 คือ ค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่ช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 2

2) ค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลง (Sensitivity) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงอัตราส่วนระหว่างความเปลี่ยนแปลงที่ถูกวัดได้ด้วยตัวตรวจจับ (Sensor) ต่อความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับพื้นที่ตรวจจับ (Sensing area) ของตัวตรวจจับ ค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสามารถพิจารณาได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Sensitivity} = \frac{\Delta \text{output}}{\Delta \text{input}} \quad (3.9)$$

เมื่อ Δoutput คือ ความเปลี่ยนแปลงที่ถูกวัดได้ด้วยตัวตรวจจับ และ Δinput คือ ความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับพื้นที่ตรวจจับของตัวตรวจจับ

ในวิทยานิพนธ์นี้ ค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวตรวจจับทางแสงที่ประยุกต์ขึ้นจากท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรที่มีการเพิ่มข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกจะถูกวิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังการแยกแสงของท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตรกับความเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหแสงภายในข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกดังสมการ

$$\text{Sensitivity} = \frac{\text{Splitting ratio}}{n} = \frac{(T_1/T_2)}{n} \quad (3.10)$$

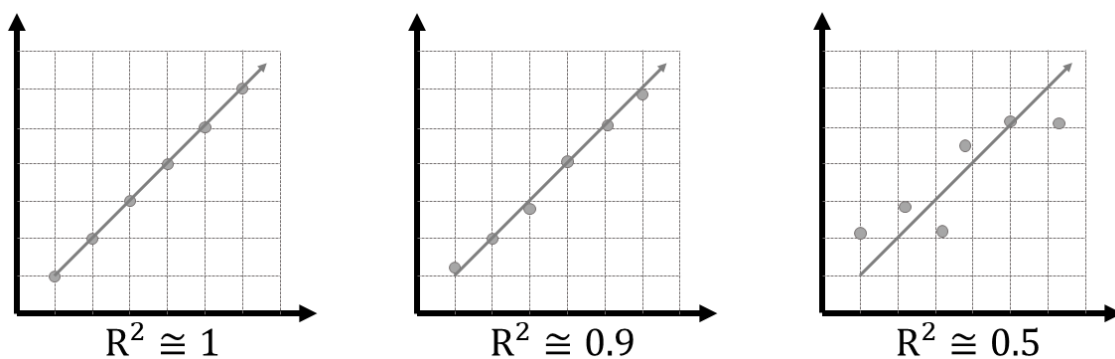
เมื่อ T_1 คือ ค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่ช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1, T_2 คือ ค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่ช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 2 และ n คือ ค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกที่ทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับ โดยค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของเซนเซอร์ทางแสงในวิทยานิพนธ์นี้จะมีหน่วยเป็นเศษส่วนของค่าดัชนีหักเหแสง (1/Refractive index unit หรือ RIU⁻¹)

3) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination) หรือค่าอาร์สแควร์ (R-square : R²) คือ ค่าที่ใช้ในการบ่งบอกความแม่นยำของค่าที่วัดได้ในการวัดผลแต่ละครั้งเทียบกับค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมดในรูปของความสัมพันธ์เชิงเส้น ดังสมการ

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.11)$$

เมื่อ Y_i คือ สมการเส้นตรงที่เกิดจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่วัดได้หรือ ค่ากำลังการแยกแสงเทียบกับความเปลี่ยนแปลงที่กำหนดขึ้นในการวัดหรือ ค่าดัชนีหักเหแสงในตัวตรวจจับ ในขณะที่ y_i คือ ข้อมูลที่วัดได้ในแต่ละครั้งหรือ ค่ากำลังการแยกแสงเมื่อค่าดัชนีหักเหแสงมีค่าค่าหนึ่ง และ \bar{y} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่วัดได้ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจกับลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลแบบต่าง ๆ

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของตัวตรวจจับเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจนี้เป็นค่าที่บ่งบอกว่าการเปลี่ยนแปลงที่ตัวตรวจจับสามารถตรวจวัดได้มีการตอบสนองแบบเชิงเส้น (Linear) มากน้อยเพียงใด หากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจนี้มีค่าใกล้เคียงกับ 1 แสดงว่าข้อมูลที่ได้ค่าใกล้เคียงกับสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ หากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่าข้อมูลที่ได้มีความแตกต่างกับสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์มาก ดังรูปที่ 3.15

เนื่องจากการตอบสนองในรูปแบบเชิงเส้นนี้จะทำให้การนำเอาตัวตรวจจับไปใช้งานมีการตอบสนองที่สม่ำเสมอในทุกช่วงการวัดตามที่ได้รับการออกแบบมาทำให้การจัดการสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และการแปรผลมีความซับซ้อนน้อยลง

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ผลการวิจัยในวิทยานิพนธ์การออกแบบท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตรในย่านความยาวคลื่นเฉพาะและการประยุกต์ใช้นี้จะถูกนำเสนอในรูปแบบของค่าความเข้มแสงส่องผ่านจากคลื่นแสงในย่านความยาวคลื่น 1480 และ 1550 นาโนเมตร ที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงซึ่งถูกจำลองด้วยโปรแกรมสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา โดยมีโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ ได้แก่ ท่อนำคลื่นแสงแบบตรง ท่อนำคลื่นแสงรูปตัววาย และท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกถูกเพิ่มเข้าไปยังบริเวณกึ่งกลางของช่องสัญญาณขาออกทั้งสอง ค่าความเข้มแสงส่องผ่านดังกล่าวจะถูกนำมาวิเคราะห์เป็นค่าการลดทอนของสัญญาณ ค่ากำลังการแยกแสง ค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลง หรือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจตามลักษณะของโครงสร้างท่อนำคลื่นที่ศึกษาตามรายละเอียดที่ปรากฏใน “บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย”

ผลที่ได้จะถูกนำมาอภิปรายผลของสมบัติการส่องผ่านแสงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อลักษณะโครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะต่าง ๆ กัน ความเปลี่ยนแปลงที่เหมาะสมแก่การนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการสื่อสารด้วยแสง หรืองานทางด้านความปลอดภัยจะถูกอภิปรายตามรายละเอียดที่ปรากฏดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวิจัยการศึกษาท่อนำคลื่นแสงแบบตรงและการอภิปรายผล

ผลการวิจัยและการอภิปรายผลที่ได้จากการศึกษาท่อนำคลื่นแสงแบบตรงที่ได้ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

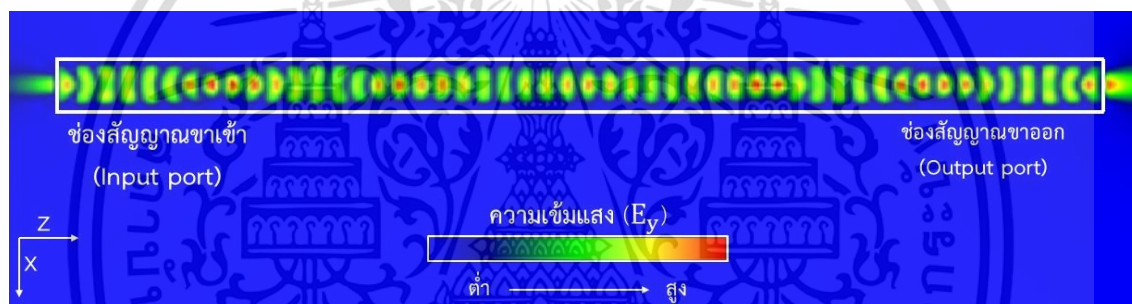
จำนวนของลำดับเวลาที่ใช้ในการคำนวณในกระบวนการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลาในวิทยานิพนธ์นี้สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 2.34 จนถึง 2.37 จากลักษณะโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงเมื่อกำหนดให้ผลต่างเชิงพื้นที่มีขนาด 1.5 นาโนเมตร คือ 8611.94 ลำดับเวลา ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดจำนวนของลำดับเวลาที่ใช้ในการคำนวณเป็นจำนวน 10,000 ลำดับเวลา เพื่อให้การเดินทางของคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 และ 1550 นาโนเมตร สามารถเดินทางผ่านท่อนำคลื่นแบบตรงซึ่งมีลักษณะโครงสร้างดังกล่าวได้อย่างครอบคลุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

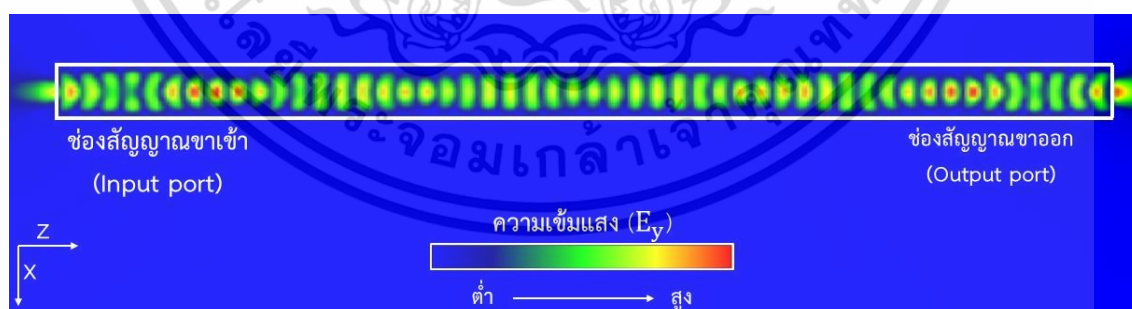
ผลที่ได้จากการศึกษาโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงแบบตรงตามข้อมูลที่แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า ความเข้มแสงส่องผ่านของคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 และ 1550 นาโนเมตร มีค่าเป็น 99.8288 และ 99.8272 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่ค่าการลดทอนของสัญญาณของคลื่นแสงทั้งสองความยาวคลื่นมีค่าเป็น 0.0074 และ 0.0075 เดซิเบล ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่สามารถคำนวณได้สำหรับคลื่นแสงทั้งสองความยาวคลื่นมีค่า 0.1318 และ 0.1330 ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ผลที่ได้จากการศึกษาโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงแบบตรง

Wavelength (nm)	1480	1550
Optical transmission (%)	99.8288	99.8272
Insertion loss (dB)	0.0074	0.0075
Absorption coefficient (cm^{-1})	0.1318	0.1330



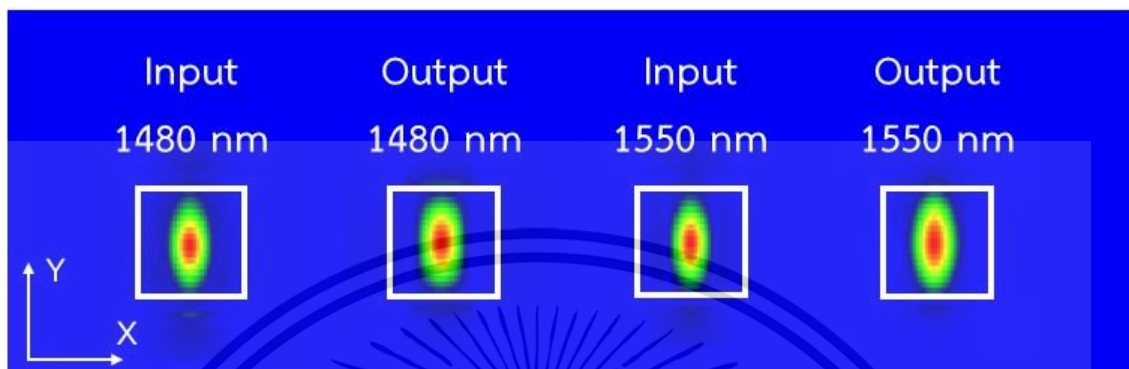
รูปที่ 4.1 แผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน Y (E_y) ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงแบบตรงที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร



รูปที่ 4.2 แผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน Y (E_y) ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงแบบตรงที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงแผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน Y (E_y) ที่ได้จากการจำลองแบบด้วยโปรแกรม OptiFDTD ของคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 และ 1550 นาโนเมตร ตามลำดับ เมื่อเคลื่อนที่ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงแบบตรง จากภาพพบว่าการกระจายตัวของความเข้มแสงเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่น่าจะผิดเพี้ยนไปเสียทีเดียว อย่างไรก็ตามให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้มแสงเฉพาะที่บริเวณภายในโครงสร้างของท่อนำคลื่น หรือที่แสดงด้วยกรอบสีขาวซึ่งสอดคล้องกับที่ความเข้มแสงส่องผ่านสำหรับแสงทั้งสองความยาวคลื่นมีค่า 99.8288 และ 99.8272 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงโหมดการเคลื่อนที่ของคลื่นแสงที่บริเวณช่องสัญญาณขาเข้าและขาออกของโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงแบบตรง

รูปที่ 4.3 แสดงแผนภาพการกระจายตัวความเข้มของสนามไฟฟ้าตามพื้นที่หน้าตัดของโครงสร้างท่อนำคลื่นแบบตรงที่ช่องสัญญาณขาเข้า และขาออกที่ได้จากการจำลองแบบด้วยโปรแกรม OptiFDTD จากภาพพบว่าโหมดการเคลื่อนที่ของคลื่นแสงทั้งสองความยาวคลื่นมีลักษณะเป็นการกระจายตัวแบบเกาส์เซียนในลักษณะของโหมดพื้นฐานที่ช่องสัญญาณขาเข้าและขาออก

จากผลการศึกษาท่อนำคลื่นแสงแบบตรงจึงสามารถสรุปได้ว่า คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 และ 1550 นาโนเมตร ในโหมดพื้นฐานสามารถเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างท่อนำคลื่นแบบตรงได้โดยมีความเข้มแสงส่องผ่านที่ช่องสัญญาณขาออกใกล้เคียงกันกับค่าความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขาเข้า หรือเกิดการลดทอนสัญญาณในโครงสร้างเพียงเล็กน้อย

4.2 ผลการวิจัยการศึกษาท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายและการอภิปรายผล

ผลการวิจัยและการอภิปรายผลที่ได้จากการศึกษาท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตรที่ได้ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลการวิจัยการศึกษาท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบสมมาตรและการอภิปรายผล

ผลที่ได้จากการศึกษาโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบสมมาตร พบว่าความเข้มแสงส่องผ่านของคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร ที่บริเวณช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ ไม่ว่าจะในรูปแบบใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

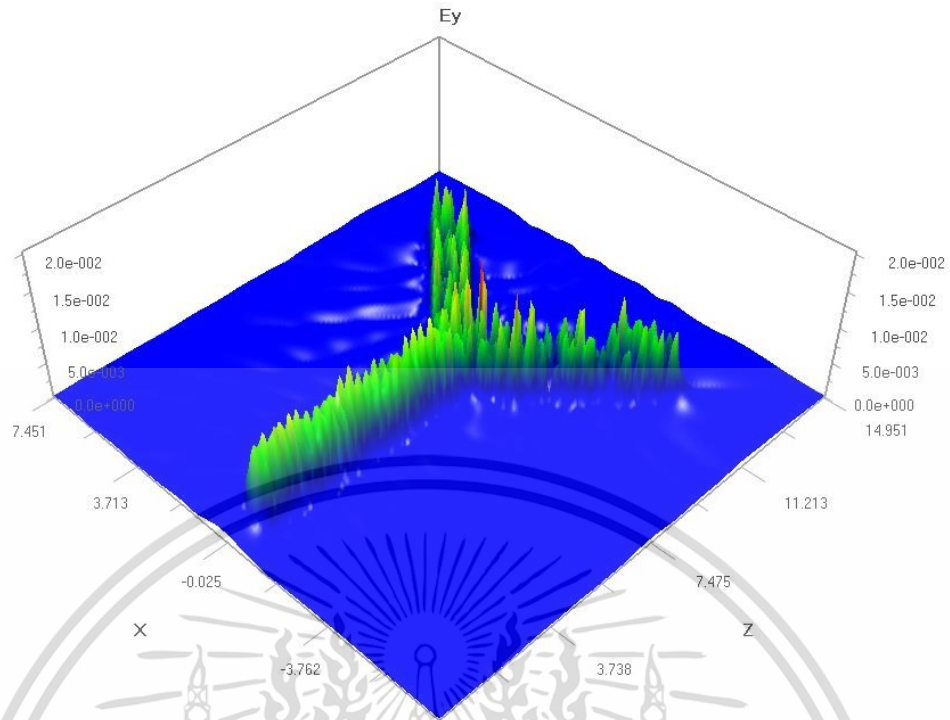
ช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 2 มีค่าเป็น 50.2318 และ 49.7682 เพอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่ความเข้มแสงส่องผ่านของคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร ที่บริเวณช่องสัญญาณขาออกทั้งสองมีค่าเป็น 63.6173 และ 36.3828 เพอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ค่าการลดทอนของสัญญาณของคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร มีค่าเป็น 0.0089 เดซิเบล และสำหรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร มีค่าเป็น 0.0112 เดซิเบล ตามข้อมูลที่แสดงดังตารางที่ 4.2

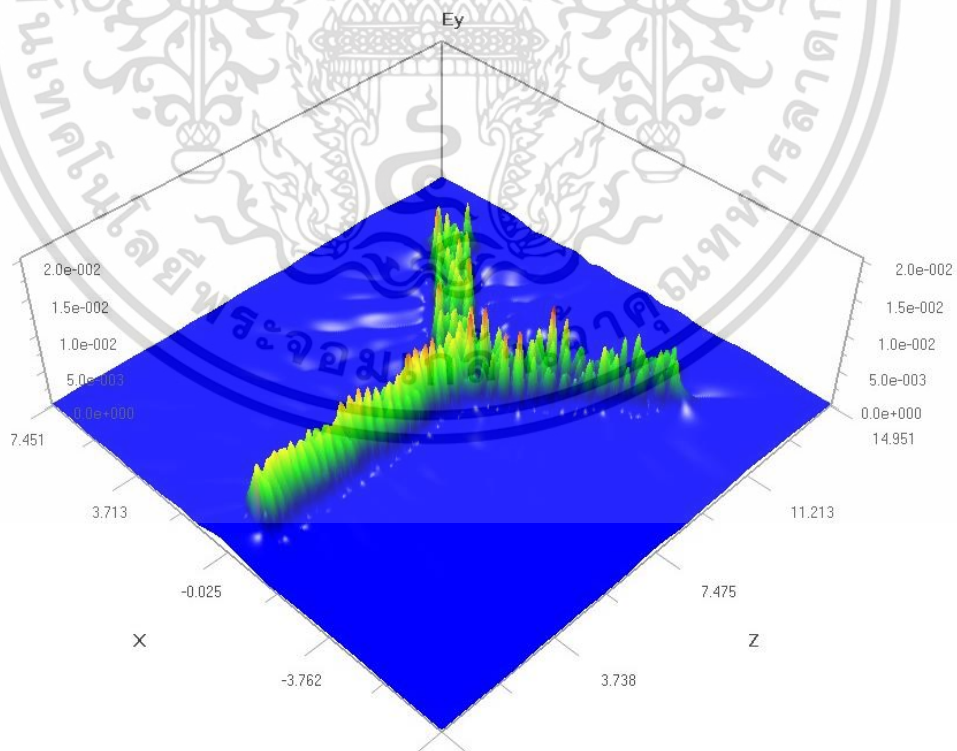
ตารางที่ 4.2 ค่าความเข้มแสงส่องผ่านและค่าการลดทอนของสัญญาณของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบสมมาตร

Wavelength (nm)	Optical transmission (%)		Insertion loss (dB)
	Output port 1	Output port 2	
1480	50.2318	49.7682	0.0089
1550	63.6173	36.3828	0.0112

รูปที่ 4.4 แสดงแผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน Y (E_y) ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบสมมาตรที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร ที่ได้จากการจำลองแบบด้วยโปรแกรม OptiFDTD จากภาพพบว่าการกระจายตัวของความเข้มแสงที่บริเวณช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 ของโครงสร้างของท่อนำคลื่นใกล้เคียงกับบริเวณช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 2 ซึ่งสอดคล้องกับที่ค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่ช่องสัญญาณทั้งสองมีค่าเป็น 50.2318 และ 49.7682 เพอร์เซ็นต์ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 แผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน Y (E_y) ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่น
แสงรูปตัววายแบบสมมาตรที่ความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร



รูปที่ 4.5 แผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน Y (E_y) ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่น
แสงรูปตัววายแบบสมมาตรที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 แสดงแผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน Y (E_y) ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบสมมาตรที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร ที่ได้จากการจำลองแบบด้วยโปรแกรม OptiFDTD จากภาพพบว่าการกระจายตัวของความเข้มแสงที่บริเวณช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 ของโครงสร้างของท่อนำคลื่นมากกว่าบริเวณช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 2 เล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับที่ค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่ช่องสัญญาณทั้งสองมีค่าเป็น 63.6173 และ 36.3828 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากผลการศึกษาท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบสมมาตรจึงสามารถสรุปได้ว่า คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 และ 1550 นาโนเมตร ในโหมดพื้นฐานสามารถเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบสมมาตรได้โดยมีค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่ช่องสัญญาณขาออกทั้งสองข้างมีค่าใกล้เคียงกัน และรวมกันได้เท่ากับค่าความเข้มแสงที่ช่องสัญญาณขาเข้า หรือเกิดค่าการลดทอนสัญญาณในโครงสร้างเพียงเล็กน้อย

4.2.2 ผลการวิจัยการศึกษาท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรและการอภิปรายผล

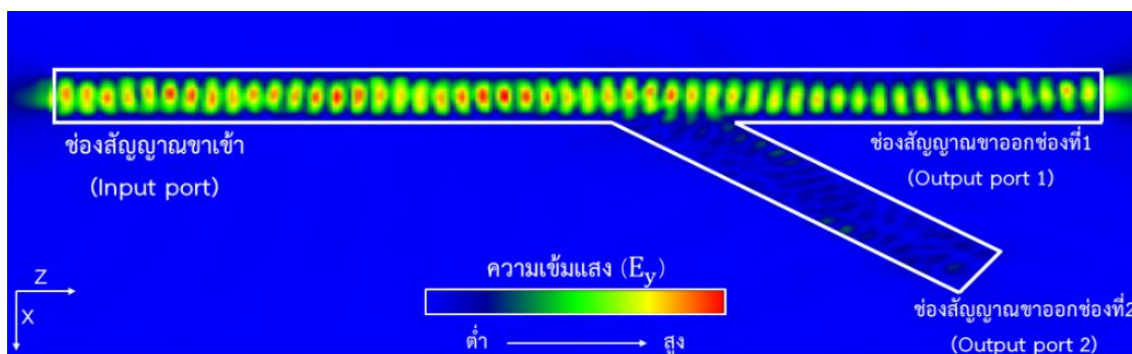
ผลที่ได้จากการศึกษาโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตร พบว่าความเข้มแสงส่องผ่านของคลื่นแสงทั้งสองความยาวคลื่นที่บริเวณช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 และช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 2 มีค่าเป็น 92 และ 8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่ค่าการลดทอนของสัญญาณของคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร มีค่าเป็น 0.0532 เดซิเบล และ 0.0905 เดซิเบล สำหรับมีคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร ตามข้อมูลที่แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าความเข้มแสงส่องผ่านและค่าการลดทอนของสัญญาณของท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตร

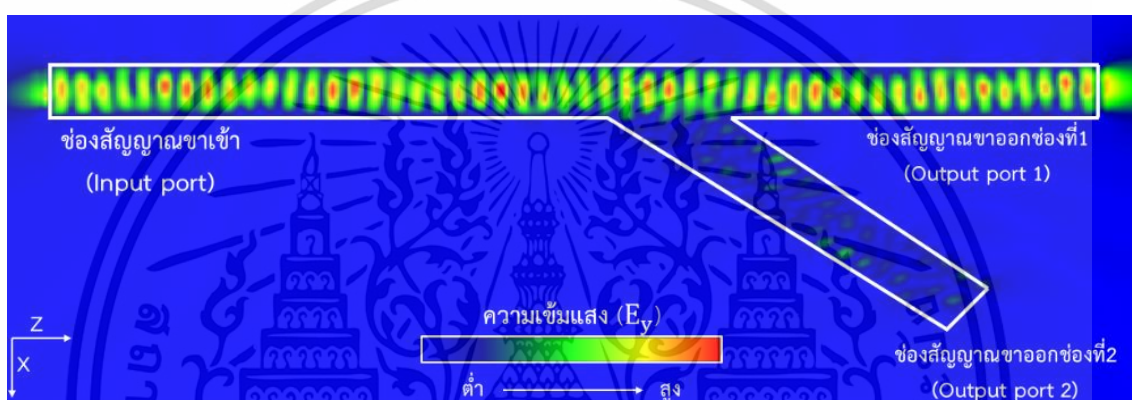
Wavelength (nm)	Optical transmission (%)		Insertion loss (dB)
	Output port 1	Output port 2	
1480	92	8	0.0532
1550			0.0905

รูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงแผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน Y (E_y) ที่ได้จากการจำลองแบบด้วยโปรแกรม OptiFDTD ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตรที่มีความยาวคลื่น 1480 และ 1550 นาโนเมตร ตามลำดับ จากภาพพบว่าการกระจายตัวของความเข้มแสงที่บริเวณช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 ของโครงสร้างของท่อนำคลื่นมากกว่าบริเวณช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 2 ซึ่งสอดคล้องกับที่ค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่ช่องสัญญาณทั้งสองมีค่าเป็น 92 และ 8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน Y (E_y) ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร



รูปที่ 4.7 แผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน Y (E_y) ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร

จากผลการศึกษาท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรจึงสามารถสรุปได้ว่า เมื่อคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 และ 1550 นาโนเมตร เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรจะทำให้ความเข้มแสงส่องผ่านที่ช่องสัญญาณขาออกทั้งสองช่องสัญญาณมีค่าแตกต่างกันในอัตรา 92 ต่อ 8 หรือเกิดค่ากำลังการแยกแสงแบบไม่สมกำลัง

จากผลการศึกษาท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายทั้งสองแบบจึงสามารถสรุปได้ว่า ลักษณะโครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงส่งผลทำให้ความเข้มแสงส่องผ่านที่ช่องสัญญาณขาออกทั้งสองช่องสัญญาณมีค่าแตกต่างกันตามลักษณะโครงสร้าง

4.3 ผลการวิจัยการศึกษาที่นำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกอยู่ที่บริเวณรอยต่อของช่องสัญญาณขาออกและการอภิปรายผล

ผลการวิจัยและการอภิปรายผลที่ได้จากการศึกษาที่นำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกอยู่ที่บริเวณรอยต่อของช่องสัญญาณขาออกที่ได้ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลการวิจัยและการอภิปรายผลการศึกษาที่นำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกอยู่ที่บริเวณรอยต่อของช่องสัญญาณขาออกและมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก

ผลที่ได้จากการศึกษาที่นำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกอยู่ที่บริเวณรอยต่อของช่องสัญญาณขาออก และมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกในวิทยานิพนธ์นี้แสดงได้ด้วยข้อมูลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 ค่าการส่องผ่านแสงและค่าการลดทอนสัญญาณเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก

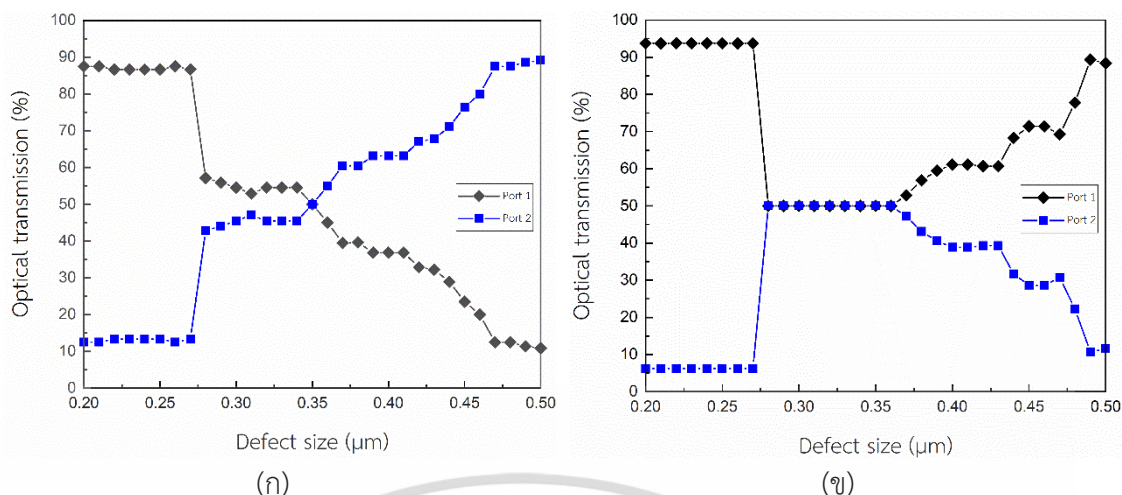
Wavelength (nm)	Optical transmission (%)				Insertion loss (dB)	
	1480		1550		1480	1550
Defect size (μm)	Output port1	Output port2	Output port1	Output port2		
0.20	87.5000	12.5000	93.7500	6.2500	0.2098	0.2644
0.21	87.5000	12.5000	93.7500	6.2500	0.2194	0.2896
0.22	86.6667	13.3333	93.7500	6.2500	0.2216	0.2945
0.23	86.6667	13.3333	93.7500	6.2500	0.2223	0.3002
0.24	86.6667	13.3333	93.7500	6.2500	0.2248	0.3021
0.25	86.6667	13.3333	93.7500	6.2500	0.2258	0.3038
0.26	87.5000	12.5000	93.7500	6.2500	0.2245	0.3055
0.27	86.6667	13.3333	93.7500	6.2500	0.2268	0.3039
0.28	57.1429	42.8571	50.0000	50.0000	0.2460	0.3055
0.29	55.8824	44.1176	50.0000	50.0000	0.2488	0.3049

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4(ต่อ) ค่าการส่องผ่านแสงและค่าการลดทอนสัญญาณเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก

Wavelength (nm)	Optical transmission (%)				Insertion loss (dB)	
	1480		1550		1480	1550
	Output port1	Output port2	Output port1	Output port2		
0.30	54.5455	45.4545	50.0000	50.0000	0.2587	0.3299
0.31	52.9412	47.0588	50.0000	50.0000	0.2630	0.3458
0.32	54.5455	45.4545	50.0000	50.0000	0.2616	0.3436
0.33	54.5455	45.4545	50.0000	50.0000	0.2618	0.3442
0.34	54.5455	45.4545	50.0000	50.0000	0.2696	0.3869
0.35	50.0000	50.0000	50.0000	50.0000	0.2832	0.4605
0.36	45.0000	55.0000	50.0000	50.0000	0.3062	0.4785
0.37	39.4737	60.5263	52.8000	47.2000	0.3475	0.4732
0.38	39.6552	60.3448	56.8966	43.1034	0.3558	0.4732
0.39	36.8421	63.1579	59.4595	40.5405	0.3791	0.4808
0.40	36.8421	63.1579	61.1111	38.8889	0.3741	0.4868
0.41	36.8421	63.1579	61.1111	38.8889	0.3812	0.4894
0.42	32.8859	67.1141	60.7143	39.2857	0.3826	0.4931
0.43	32.2034	67.7966	60.7143	39.2857	0.3855	0.4942
0.44	28.9256	71.0744	68.2927	31.7073	0.4184	0.5096
0.45	23.5294	76.4706	71.4286	28.5714	0.4304	0.5113
0.46	20.0000	80.0000	71.4286	28.5714	0.4327	0.5190
0.47	12.5000	87.5000	69.2308	30.7692	0.4474	0.5233
0.48	12.5000	87.5000	77.7778	22.2222	0.4488	0.5269
0.49	11.3636	88.6364	89.3617	10.6383	0.4604	0.5273
0.50	10.8696	89.1304	88.3721	11.6279	0.4655	0.5292

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงส่องผ่านและขนาดของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก (ก) ที่ความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร (ข) ที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร

รูปที่ 4.8(ก) แสดงผลการศึกษาที่นำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก เมื่อคลื่นแสงมีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร พบว่าค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่บริเวณช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 มีค่าลดลงจาก 92.0000 เป็น 87.5000 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการเพิ่มข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกขนาด 0.20 ไมโครเมตร ที่บริเวณรอยต่อของช่องสัญญาณขาออก และลดลงเป็น 10.8696 เปอร์เซ็นต์ เมื่อขนาดของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 0.50 ไมโครเมตร ในขณะที่ค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่บริเวณช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 12.5000 เป็น 89.1304 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการเพิ่มข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกที่บริเวณรอยต่อของช่องสัญญาณขาออกและข้อบกพร่องดังกล่าวมีขนาดเพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.8(ข) แสดงผลการศึกษาที่นำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกเมื่อคลื่นแสงมีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร พบว่าค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่บริเวณช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 มีค่าเป็น 93.7500 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการเพิ่มข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีขนาดตั้งแต่ 0.20 จนถึง 0.27 ไมโครเมตร ที่บริเวณรอยต่อของช่องสัญญาณขาออก จากนั้นค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่ช่องสัญญาณดังกล่าวจึงลดลงเป็น 50.0000 เปอร์เซ็นต์ เมื่อขนาดของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีขนาดเพิ่มขึ้นในช่วง 0.28 จนถึง 0.36 ไมโครเมตร และค่าความเข้มแสงส่องผ่านดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 52.8000 จนถึง 88.3721 เปอร์เซ็นต์ เมื่อขนาดของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.37 จนถึง 0.50 ไมโครเมตร ในขณะที่ค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่บริเวณช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 2 มีแนวโน้มตรงกันข้ามกัน

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ย ค่ามากที่สุด และค่าน้อยที่สุดของค่าการลดทอนของสัญญาณ

Wavelength (nm)	Insertion loss (dB)		
	มากที่สุด	เฉลี่ย	น้อยสุด
1480	0.4655	0.3188	0.2098
1550	0.5292	0.4097	0.2644

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าการลดทอนของสัญญาณโดยเฉลี่ยของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกจะมีค่าเป็น 0.3188 และ 0.4097 เดซิเบล สำหรับความยาวคลื่น 1480 และ 1550 นาโนเมตร ตามลำดับ

จากข้อมูลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่บริเวณช่องสัญญาณขาออกทั้งสองของโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกถูกเพิ่มที่บริเวณรอยต่อของช่องสัญญาณขาออก โดยค่าความเข้มแสงส่องผ่านจะมีการเปลี่ยนแปลงตามขนาดของข้อบกพร่องดังกล่าวตามข้อมูลที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้

ความเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสอดคล้องกับการนำเอาโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์แยกแสงบนท่อนำคลื่นสำหรับงานในด้านการสื่อสารด้วยแสง โดยการเพิ่มข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกลงในโครงสร้างของท่อนำคลื่น และเปลี่ยนขนาดของข้อบกพร่องดังกล่าวให้สอดคล้องกับค่าความเข้มแสงส่องผ่าน หรือค่ากำลังการแยกแสงที่ต้องการตามข้อมูลที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ อุปกรณ์แยกแสงบนท่อนำคลื่นที่สามารถประยุกต์ได้ดังกล่าวสามารถแบ่งออกเป็นสองชนิด ได้แก่

- 1) การประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์แยกแสงที่มีค่ากำลังการแยกแสงแบบสมกำลัง

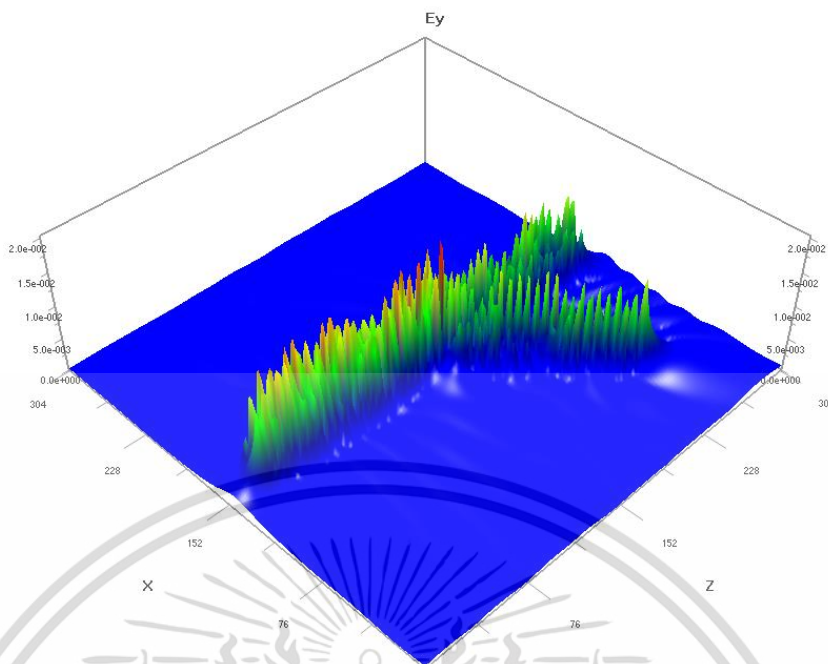
ขนาดของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกที่ทำให้เกิดค่ากำลังการแยกแสงแบบสมกำลังสำหรับอุปกรณ์แยกแสงบนท่อนำคลื่นที่ประยุกต์มาจากท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตรสำหรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 และ 1550 นาโนเมตร สามารถแสดงด้วยข้อมูลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.6 ขนาดของข้อบกพร่องที่เหมาะสมกับการนำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์แยกแสงที่มีค่ากำลังการแยกแสงแบบสมกำลัง

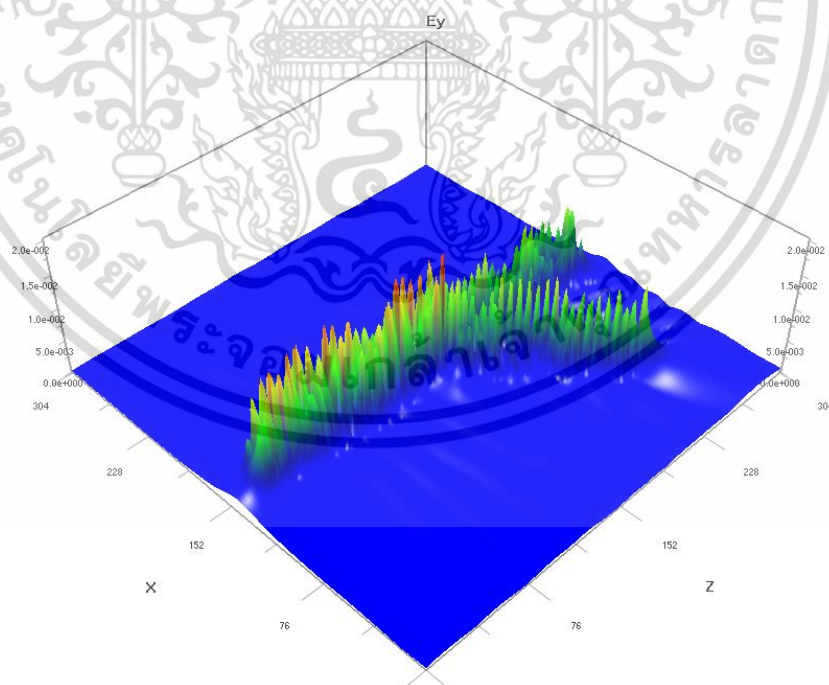
Wavelength (nm)	Defect size (μm)	Insertion loss (dB)
1480	0.35	0.2832
1550	0.28	0.3055
	0.29	0.3049
	0.30	0.3299
	0.31	0.3458
	0.32	0.3436
	0.33	0.3442
	0.34	0.3869
	0.35	0.4605
	0.36	0.4785

จากข้อมูลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกขนาด 0.35 ไมโครเมตร ทำให้เกิดค่ากำลังการแยกแสงแบบสมกำลังสำหรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร โดยมีค่าการลดทอนของแสงเป็น 0.2832 เดซิเบล ในขณะที่คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร จะเกิดค่ากำลังการแยกแสงแบบสมกำลังขึ้นเมื่อข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกขนาดมีขนาด 0.28 จนถึง 0.36 ไมโครเมตร โดยข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกขนาด 0.29 ไมโครเมตร ทำให้เกิดค่าการลดทอนของสัญญาณที่ต่ำที่สุดคือ 0.3049 เดซิเบล

เมื่อนำความยาวคลื่นทั้งสองมาพิจารณาควบคู่กันพบว่าข้อบกพร่องแบบโพรงอากาศซึ่งมีรูปทรงกระบอกขนาด 0.35 ไมโครเมตร ทำให้เกิดการแยกแสงแบบสมกำลังขึ้นกับความยาวคลื่นทั้งสอง และมีค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 0.2832 และ 0.4605 เดซิเบล ตามลำดับ ท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรซึ่งมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกที่มีขนาดดังกล่าวจึงมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์แยกแสงบนท่อนำคลื่นเมื่อต้องการอุปกรณ์แยกแสงที่มีกำลังการแยกแสงแบบสมกำลังสำหรับความยาวคลื่นแสงทั้งสองดังแสดงด้วยรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.9 แผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (E_y) ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรซึ่งมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกขนาด 0.35 ไมโครเมตร และมีค่ากำลังการแยกแสงแบบสมกำลังที่ความยาวคลื่นแสง 1480 นาโนเมตร



รูปที่ 4.10 แผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (E_y) ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรซึ่งมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกขนาด 0.35 ไมโครเมตร และมีค่ากำลังการแยกแสงแบบสมกำลังที่ความยาวคลื่นแสง 1550 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

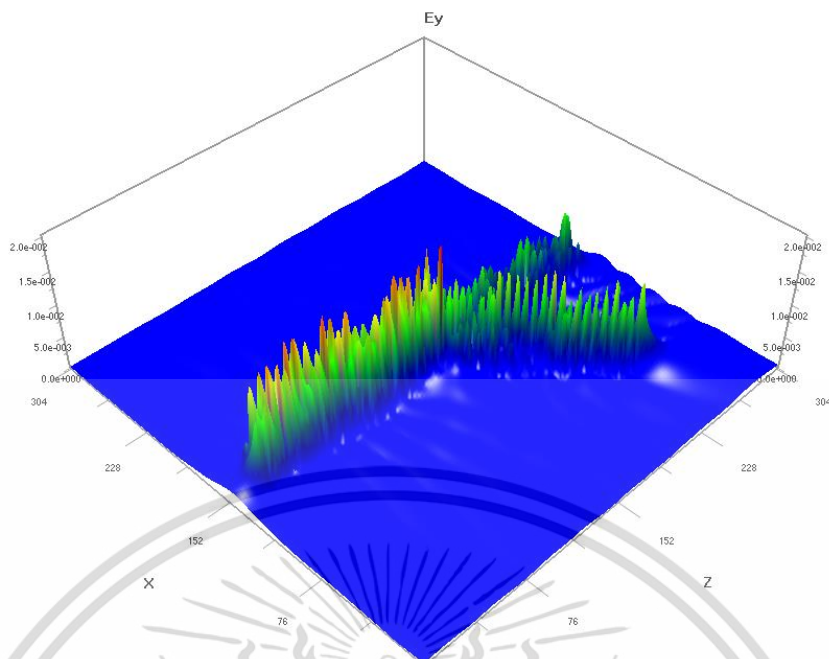
2) การประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์แยกแสงที่มีค่ากำลังการแยกแสงแบบไม่สมกำลัง

ขนาดของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกที่ทำให้เกิดค่ากำลังการแยกแสงแบบไม่สมกำลังสำหรับอุปกรณ์แยกแสงบนท่อนำคลื่นที่ประยุกต์มาจากท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตรสำหรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 และ 1550 นาโนเมตร สามารถแสดงตามข้อมูลดังตารางที่ 4.7

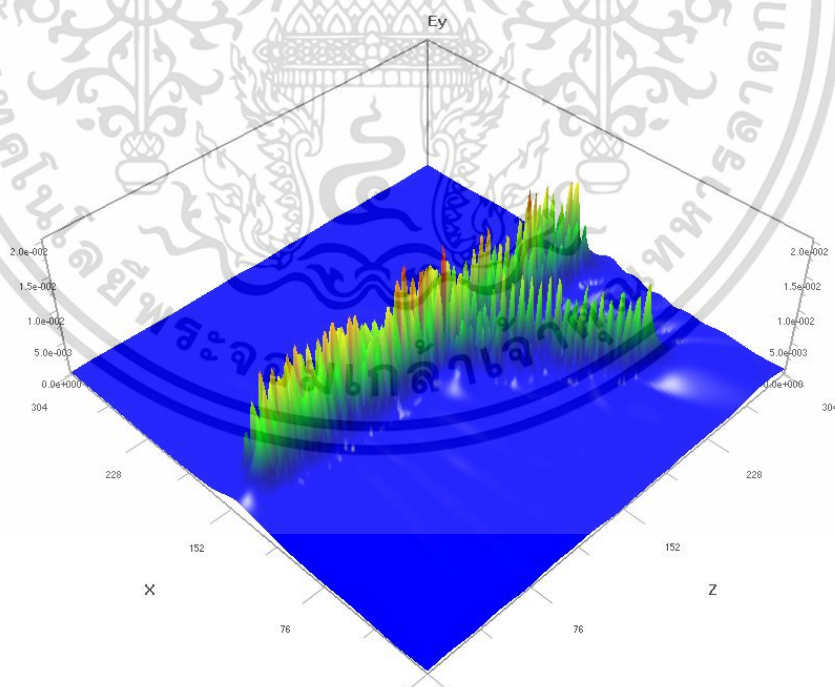
ตารางที่ 4.7 ขนาดของข้อบกพร่องที่เหมาะสมกับการนำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์แยกแสงที่มีค่ากำลังการแยกแสงแบบไม่สมกำลังสำหรับคลื่นแสงความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร

ค่ากำลังการแยกแสง	Defect size (μm)	Insertion loss (dB)
1 : 2	0.42	0.3826
	0.43	0.3855
1 : 4	0.46	0.4327
1 : 7	0.47	0.4474
	0.48	0.4488
2 : 3	0.37	0.3475
	0.38	0.3558
4 : 3	0.28	0.2460
6 : 5	0.32	0.2616
	0.33	0.2618
	0.34	0.2696
7 : 1	0.20	0.2098
	0.21	0.2194
	0.26	0.2245

จากข้อมูลในตารางที่ 4.7 จึงสรุปได้ว่าข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกสามารถทำให้เกิดค่ากำลังการแยกแสงแบบไม่สมกำลังสำหรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร โดยมีค่ากำลังการแยกแสงในอัตรา 1 ต่อ 2, 1 ต่อ 4, 1 ต่อ 7, 2 ต่อ 3, 4 ต่อ 3, 6 ต่อ 5 และ 7 ต่อ 1 เมื่อข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีขนาดดังที่ปรากฏ



รูปที่ 4.11 แผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (E_y) ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรซึ่งมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกขนาด 0.42 ไมโครเมตร และมีค่ากำลังการแยกแสงในอัตรา 1 ต่อ 2 ที่ความยาวคลื่นแสง 1480 นาโนเมตร



รูปที่ 4.12 แผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (E_y) ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรซึ่งมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกขนาด 0.28 ไมโครเมตร และมีค่ากำลังการแยกแสงในอัตรา 4 ต่อ 3 ที่ความยาวคลื่นแสง 1480 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

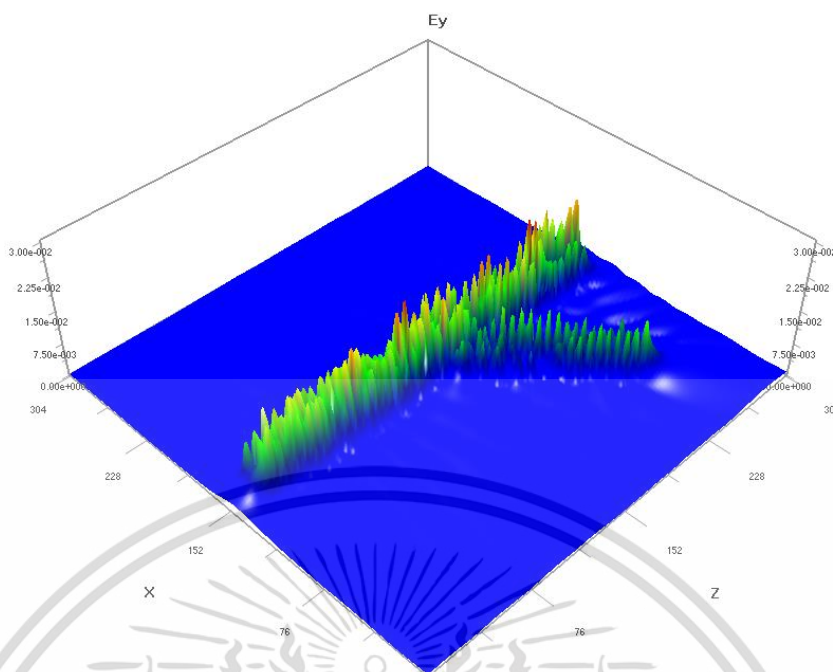
รูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงแผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน Y (E_y) ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร เมื่อข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีขนาด 0.42 และ 0.28 ไมโครเมตร ตามลำดับ ที่ได้จากการจำลองแบบด้วยโปรแกรม OptiFDTD จากภาพพบว่าการกระจายตัวของความเข้มแสงที่บริเวณช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 และช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 2 สอดคล้องกับที่ค่ากำลังการแยกแสงในอัตรา 1 ต่อ 2 และ 4 ต่อ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 ขนาดของข้อบกพร่องที่เหมาะสมกับการนำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์แยกแสงที่มีค่ากำลังการแยกแสงแบบไม่สมกำลังสำหรับคลื่นแสงความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร

ค่ากำลังการแยกแสง	Defect size (μm)	Insertion loss (dB)
3 : 2	0.42	0.4931
	0.43	0.4942
5 : 2	0.45	0.5113
	0.46	0.5190

จากข้อมูลในตารางที่ 4.8 จึงสรุปได้ว่าข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกสามารถทำให้เกิดค่ากำลังการแยกแสงแบบไม่สมกำลังสำหรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร โดยมีค่ากำลังการแยกแสงในอัตรา 3 ต่อ 2 เมื่อข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีขนาด 0.42 และ 0.43 ไมโครเมตร และมีค่ากำลังการแยกแสงในอัตรา 5 ต่อ 2 เมื่อข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีขนาด 0.45 และ 0.46 ไมโครเมตร

รูปที่ 4.13 แสดงแผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน Y (E_y) ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตรที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร เมื่อข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีขนาด 0.45 ไมโครเมตร ที่ได้จากการจำลองแบบด้วยโปรแกรม OptiFDTD จากภาพพบว่าการกระจายตัวของความเข้มแสงที่บริเวณช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 และช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 2 สอดคล้องกับที่ค่ากำลังการแยกแสงในอัตรา 5 ต่อ 2



รูปที่ 4.13 แผนภาพการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (E_y) ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรซึ่งมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกขนาด 0.45 ไมโครเมตร และมีค่ากำลังการแยกแสงในอัตรา 5 ต่อ 2 ที่ความยาวคลื่นแสง 1550 นาโนเมตร

4.3.2 ผลการวิจัยและการอภิปรายผลการศึกษาท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกอยู่ที่บริเวณรอยต่อของช่องสัญญาณขาออกและมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก

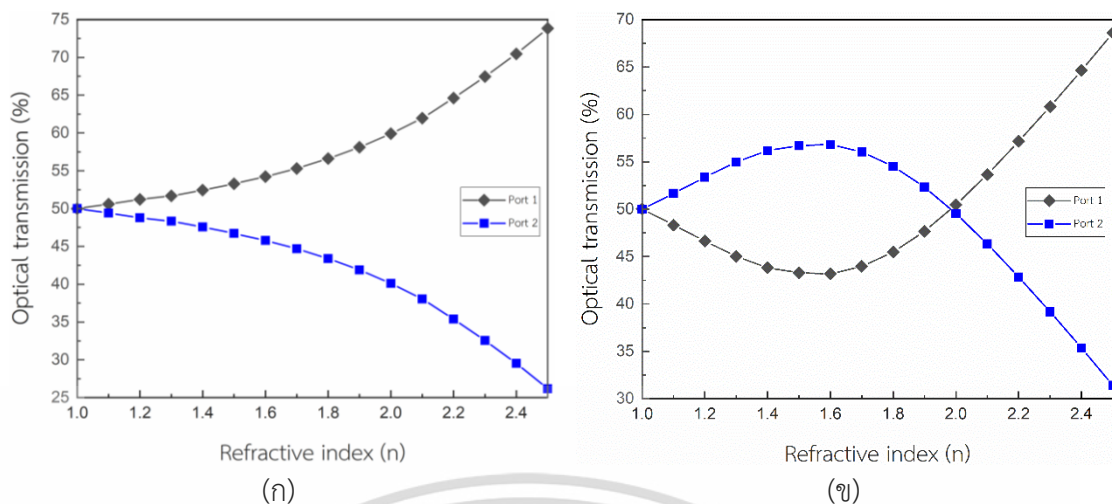
ผลที่ได้จากการศึกษาท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกอยู่ที่บริเวณรอยต่อของช่องสัญญาณขาออก และมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกในวิทยานิพนธ์นี้แสดงตามข้อมูลดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าการส่องผ่านแสงและค่ากำลังการแยกแสงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงของ
ข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกในช่วง 1.00 จนถึง 2.50

Wavelength (nm)	Optical transmission (%)				Splitting ratio 1:2	
	1480		1550		1480	1550
Refractive Index (n)	Output port1	Output port2	Output port1	Output port2		
1.00	50.0000	50.0000	50.0000	50.0000	1.0000	1.0000
1.10	50.5812	49.4188	48.3314	51.6686	1.0235	0.9354
1.20	51.2201	48.7799	46.6390	53.3610	1.0500	0.8740
1.30	51.6750	48.3250	45.0211	54.9789	1.0693	0.8189
1.40	52.4418	47.5582	43.8172	56.1828	1.1027	0.7799
1.50	53.2827	46.7173	43.2998	56.7002	1.1405	0.7637
1.60	54.2203	45.7797	43.1676	56.8324	1.1844	0.7596
1.70	55.3090	44.6910	43.9696	56.0304	1.2376	0.7847
1.80	56.6086	43.3914	45.4678	54.5322	1.3046	0.8338
1.90	58.1013	41.8987	47.6725	52.3275	1.3867	0.9110
2.00	59.9078	40.0922	50.4661	49.5339	1.4943	1.0188
2.10	61.9580	38.0420	53.6693	46.3307	1.6287	1.1584
2.20	64.6277	35.3723	57.1625	42.8375	1.8271	1.3344
2.30	67.4444	32.5556	60.8304	39.1696	2.0717	1.5530
2.40	70.4584	29.5416	64.6553	35.3447	2.3851	1.8293
2.50	73.8247	26.1753	68.6016	31.3984	2.8204	2.1849

รูปที่ 4.14(ก) แสดงผลการศึกษาที่นำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกในช่วง 1.00 จนถึง 2.50 เมื่อคลื่นแสงมีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร พบว่าค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่บริเวณช่องสัญญาณขาออกช่องทางที่ 1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 50.0000 เป็น 73.8247 เปอร์เซ็นต์ เมื่อค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่บริเวณช่องสัญญาณขาออกช่องทางที่ 2 มีค่าลดลงจาก 50.0000 เป็น 26.1753 เปอร์เซ็นต์

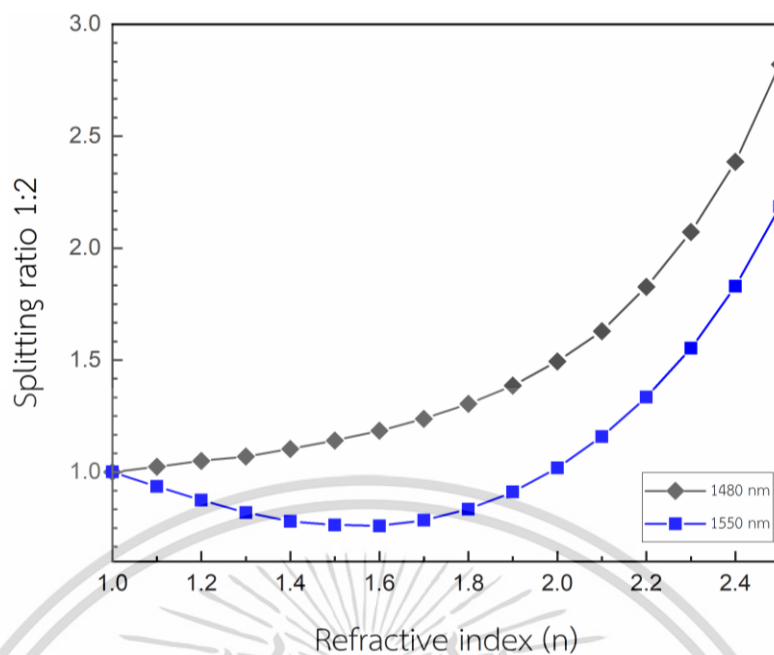
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงส่องผ่านและค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก (ก) ความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร (ข) ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร

รูปที่ 4.14(ข) แสดงผลการศึกษาที่นำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกในช่วง 1.00 จนถึง 2.50 เมื่อคลื่นแสงมีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร พบว่าค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่บริเวณช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 มีแนวโน้มลดลงจาก 50.0000 เป็น 43.1676 เปอร์เซ็นต์ เมื่อค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1.60 และเพิ่มขึ้นเป็น 64.6553 เปอร์เซ็นต์ เมื่อค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2.50 ในขณะที่ค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่บริเวณช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 50.0000 เป็น 56.8324 เปอร์เซ็นต์ เมื่อค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1.60 และลดลงเป็น 35.3447 เปอร์เซ็นต์ เมื่อค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2.50

รูปที่ 4.15 แสดงค่ากำลังการแยกแสงของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกในช่วง 1.00 จนถึง 2.50 พบว่าค่ากำลังการแยกแสงของแสงทั้งสองความยาวคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นหรือ ในรูปของการเพิ่มขึ้นแบบเอกโปเนนเชียล (Exponential) โดยมีเพียงช่วงที่ค่าดัชนีหักเหแสงมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1.00 จนถึง 1.50 เท่านั้นที่ค่าดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังการแยกแสงและค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก

ดังนั้นจึงได้มีการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์ของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรสำหรับศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกในช่วงระหว่าง 1.00 จนถึง 1.50 เพิ่มเติมเพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังการแยกแสงโดยการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกในช่วงดังกล่าวครั้งละ 0.01 ผลการศึกษาสามารถแสดงตามข้อมูลดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่าการส่องผ่านแสงและค่ากำลังการแยกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกในช่วง 1.00 จนถึง 1.50

Wavelength (nm)	Optical transmission (%)				Splitting ratio 1:2	
	1480		1550		1480	1550
Refractive Index (n)	Output port1	Output port2	Output port1	Output port2		
1.00	50.0000	50.0000	50.0000	50.0000	1.0000	1.0000
1.01	50.0827	49.9173	49.7726	50.2274	1.0033	0.9909
1.02	50.2172	49.7828	49.6399	50.3601	1.0087	0.9857
1.03	50.2564	49.7436	49.4680	50.5320	1.0103	0.9789

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10(ต่อ) ค่าการส่องผ่านแสงและค่ากำลังการแยกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสง
ของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกในช่วง 1.00 จนถึง 1.50

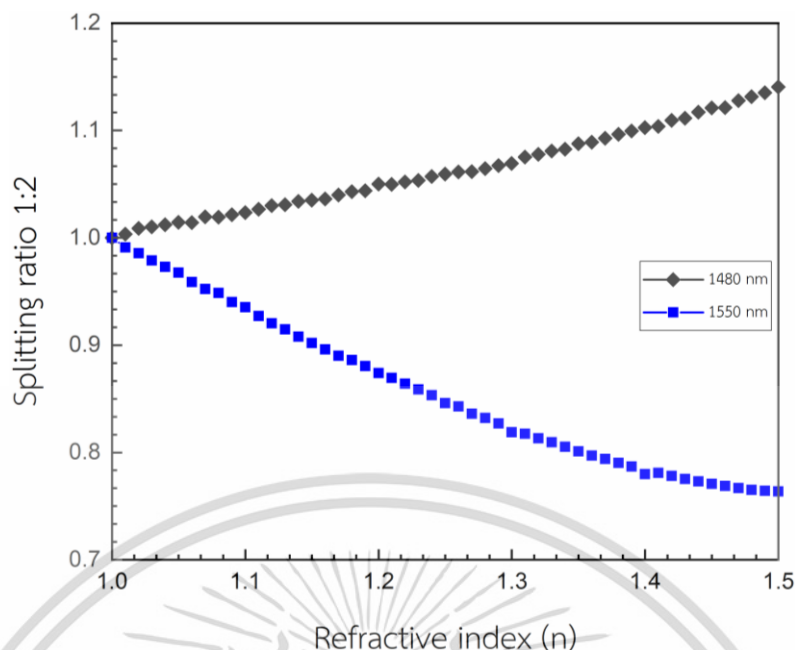
Wavelength (nm)	Optical transmission (%)				Splitting ratio 1:2	
	1480		1550		1480	1550
Refractive Index (n)	Output port1	Output port2	Output port1	Output port2		
1.04	50.3035	49.6965	49.3108	50.6892	1.0122	0.9728
1.05	50.3608	49.6392	49.1772	50.8228	1.0145	0.9676
1.06	50.3538	49.6462	48.9493	51.0507	1.0143	0.9588
1.07	50.4873	49.5127	48.7799	51.2201	1.0197	0.9524
1.08	50.4747	49.5253	48.6773	51.3227	1.0192	0.9485
1.09	50.5343	49.4657	48.4541	51.5459	1.0216	0.9400
1.10	50.5812	49.4188	48.3314	51.6686	1.0235	0.9354
1.11	50.6586	49.3414	48.1113	51.8887	1.0267	0.9272
1.12	50.7398	49.2602	47.9246	52.0754	1.0300	0.9203
1.13	50.7631	49.2369	47.7710	52.2290	1.0310	0.9146
1.14	50.8343	49.1657	47.5872	52.4128	1.0339	0.9079
1.15	50.8656	49.1344	47.4214	52.5786	1.0352	0.9019
1.16	50.8884	49.1116	47.2572	52.7428	1.0362	0.8960
1.17	50.9787	49.0213	47.0915	52.9085	1.0399	0.8901
1.18	51.0522	48.9478	46.9844	53.0156	1.0430	0.8862
1.19	51.0744	48.9256	46.8213	53.1787	1.0439	0.8805
1.20	51.2201	48.7799	46.6390	53.3610	1.0500	0.8740
1.21	51.2131	48.7869	46.5107	53.4893	1.0497	0.8695
1.22	51.2661	48.7339	46.3510	53.6490	1.0520	0.8640
1.23	51.3031	48.6969	46.1993	53.8007	1.0535	0.8587
1.24	51.3878	48.6122	46.0400	53.9600	1.0571	0.8532
1.25	51.4404	48.5596	45.8298	54.1702	1.0593	0.8460
1.26	51.4889	48.5111	45.7334	54.2666	1.0614	0.8428
1.27	51.4974	48.5026	45.5357	54.4643	1.0617	0.8361
1.28	51.5614	48.4386	45.4171	54.5829	1.0645	0.8321

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10(ต่อ) ค่าการส่องผ่านแสงและค่ากำลังการแยกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสง
ของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกในช่วง 1.00 จนถึง 1.50

Wavelength (nm)	Optical transmission (%)				Splitting ratio 1:2	
	1480		1550		1480	1550
Refractive Index (n)	Output port1	Output port2	Output port1	Output port2		
1.29	51.6253	48.3747	45.2621	54.7379	1.0672	0.8269
1.30	51.6750	48.3250	45.0211	54.9789	1.0693	0.8189
1.31	51.8162	48.1838	44.9768	55.0232	1.0754	0.8174
1.32	51.8718	48.1282	44.8486	55.1514	1.0778	0.8132
1.33	51.9469	48.0531	44.7323	55.2677	1.0810	0.8094
1.34	51.9859	48.0141	44.6085	55.3915	1.0827	0.8053
1.35	52.0976	47.9024	44.4762	55.5238	1.0876	0.8010
1.36	52.1310	47.8690	44.3573	55.6427	1.0890	0.7972
1.37	52.2175	47.7825	44.2548	55.7452	1.0928	0.7939
1.38	52.2995	47.7005	44.1380	55.8620	1.0964	0.7901
1.39	52.3733	47.6267	44.0367	55.9633	1.0997	0.7869
1.40	52.4418	47.5582	43.8172	56.1828	1.1027	0.7799
1.41	52.4643	47.5357	43.8485	56.1515	1.1037	0.7809
1.42	52.5932	47.4068	43.7568	56.2432	1.1094	0.7780
1.43	52.6420	47.3580	43.6750	56.3250	1.1116	0.7754
1.44	52.7626	47.2374	43.5967	56.4033	1.1170	0.7729
1.45	52.8524	47.1476	43.5288	56.4712	1.1210	0.7708
1.46	52.8629	47.1371	43.4601	56.5399	1.1215	0.7687
1.47	53.0066	46.9934	43.3969	56.6031	1.1280	0.7667
1.48	53.0820	46.9180	43.3472	56.6528	1.1314	0.7651
1.49	53.1653	46.8347	43.3150	56.6850	1.1352	0.7641
1.50	53.2827	46.7173	43.2998	56.7002	1.1405	0.7637

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังการแยกแสงและค่าดัชนีหักเหแสงที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วง 1.00 จนถึง 1.50 ของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก

รูปที่ 4.11 แสดงผลการศึกษาที่นำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกในช่วง 1.00 จนถึง 1.50 เมื่อคลื่นแสงมีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร พบว่าค่ากำลังการแยกแสงมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.0000 เป็น 1.1405 เมื่อค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่ากำลังการแยกแสงของคลื่นแสงมีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร มีค่าลดลงจาก 1.0000 เป็น 0.7637

จากข้อมูลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่บริเวณช่องสัญญาณขาออกทั้งสองของโครงสร้างที่นำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรจะมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก โดยเมื่อค่าดัชนีหักเหแสงมีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 1.00 จนถึง 2.50 การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น หากพิจารณาช่วงที่ค่าดัชนีหักเหแสงมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1.00 จนถึง 1.50 ค่ากำลังการแยกแสงจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่เป็นเชิงเส้น

ความเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสอดคล้องกับการนำเอาโครงสร้างที่นำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับค่าดัชนีหักเหแสงบนที่นำคลื่นแสงสำหรับงานทางด้านความปลอดภัยดังนี้

- 1) การนำไปประยุกต์ใช้อุปกรณ์ตรวจจับค่าดัชนีหักเหแสงบนที่นำคลื่นแสง

การนำผลการวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ไปประยุกต์ใช้อุปกรณ์ตรวจจับค่าดัชนีหักเหแสงบนที่นำคลื่นแสงจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านแสงของที่นำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกกว่ามีความเหมาะสมกับการประยุกต์เป็นตัวตรวจจับหรือไม่ ตามขั้นตอนที่ได้ปรากฏในหัวข้อ “3.3 การศึกษาสมบัติการส่องผ่านแสงของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกอยู่ที่บริเวณรอยต่อของช่องสัญญาณขาออก” ด้วยข้อมูลจากตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.16

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังการแยกแยะแสงเมื่อค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 1.00 จนถึง 1.50 พบว่า ค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตรมีค่า 0.2653 และ 0.4908 RIU⁻¹ เมื่อคลื่นแสงมีความยาวคลื่น 1480 และ 1550 นาโนเมตร ตามลำดับ ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่า 0.9889 และ 0.9777 สำหรับคลื่นแสงทั้งสองความยาวคลื่นตามลำดับ

จากข้อมูลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าโครงสร้างท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตรซึ่งมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกขนาด 0.35 ไมโครเมตร ทำหน้าที่เป็นพื้นที่ตรวจจับสำหรับบรรจุสารตัวอย่างร่วมกับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 และ 1550 นาโนเมตร มีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับค่าดัชนีหักเหแสงสำหรับตรวจจับตัวอย่างที่มีค่าดัชนีหักเหแสงในช่วง 1.00 จนถึง 1.50 โดยตัวอย่างที่ต้องการตรวจวัดค่าดัชนีหักเหแสงดังกล่าวเมื่อถูกบรรจุในข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกจะประพฤติตัวเหมือนเป็นข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกซึ่งมีค่าดัชนีหักเหแสงในช่วงดังกล่าวดังเช่นข้อมูลที่ได้นำเสนอ

2) การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบเมื่อค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 1.00 จนถึง 2.50

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบเมื่อค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 1.00 จนถึง 2.50 สามารถทำได้โดยการพิจารณาค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่ช่องสัญญาณขาออกทั้ง 2 ช่องสัญญาณการจากข้อมูลในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.15 ตามขั้นตอนที่ได้ปรากฏในหัวข้อ “2.3 สัมประสิทธิ์คู่ควบ”

เมื่อพิจารณาความเข้มแสงส่องผ่านที่แปรผันกับค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบของคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร จะสามารถแสดงได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$\kappa_{1480} = (-0.1078 \times n^2) + (0.2267 \times n) + 0.3740 \quad (4.1)$$

ดังนั้น เมทริกซ์การกระเจิงของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรซึ่งค่าความเข้มแสงส่องผ่านมีค่าแปรผันตามค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกในช่วง 1.00 จนถึง 2.50 สำหรับแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร จึงสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1 - ((-0.1078 \times n^2) + (0.2267 \times n) + 0.3740)} & 0 \\ \sqrt{(-0.1078 \times n^2) + (0.2267 \times n) + 0.3740} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in1} \\ E_{in2} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

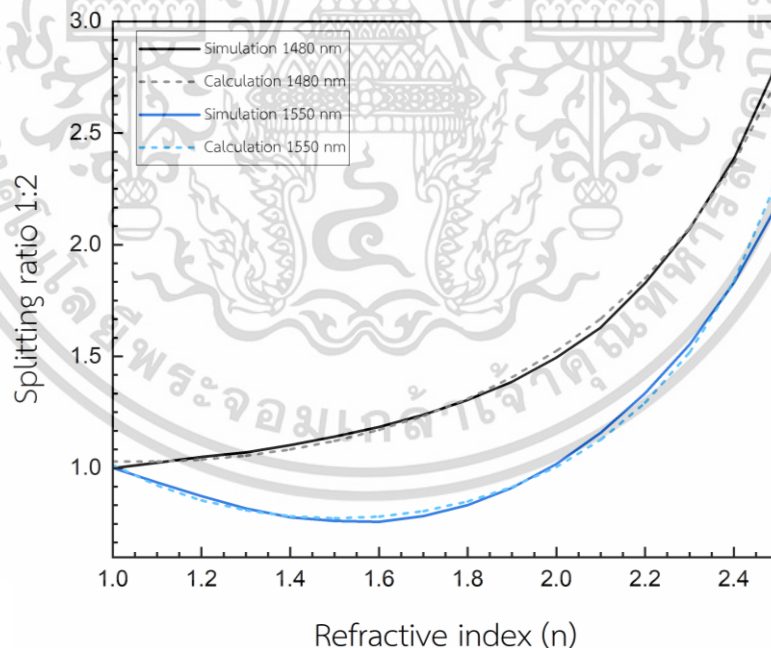
และเมื่อพิจารณาความเข้มแสงส่องผ่านที่แปรผันกับค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบของคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร จะสามารถแสดงได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$\kappa_{1550} = (-0.2628 \times n^2) + (0.7907 \times n) - 0.0313 \quad (4.3)$$

ดังนั้น เมทริกซ์การกระเจิงของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรซึ่งค่าความเข้มแสงส่องผ่านมีค่าแปรผันตามค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกในช่วง 1.00 จนถึง 2.50 สำหรับแสงที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร จึงสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1 - ((-0.2628 \times n^2) + (0.7907 \times n) - 0.0313)} & 0 \\ \sqrt{(-0.2628 \times n^2) + (0.7907 \times n) - 0.0313} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in1} \\ E_{in2} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

เมื่อ κ_{1480} และ κ_{1550} คือ สัมประสิทธิ์คู่ควบที่มีความยาวคลื่น 1480 และ 1550 นาโนเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังการแยกแสงที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ และค่ากำลังการแยกแสงที่ได้จากคำนวณค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบกับค่าดัชนีหักเหแสงที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วง 1.00 จนถึง 2.50 ของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก

เส้นประบนรูปที่ 4.17 แสดงค่ากำลังการแยกแแสงของคลื่นแสงทั้งสองความยาวคลื่นซึ่งถูกคำนวณ จากค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบดังที่ปรากฏในสมการที่ 4.1 และ 4.3 เมื่อนำมาค่ากำลังการแยกแแสงดังกล่าว มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์พบว่ามีค่าความแตกต่างโดย เฉลี่ย 0.6927 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร และมีค่าความแตกต่าง โดยเฉลี่ย 0.9819 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร

3) การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบเมื่อค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีการ เปลี่ยนแปลงในช่วง 1.00 จนถึง 1.50

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบเมื่อค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีการ เปลี่ยนแปลงในช่วง 1.00 จนถึง 1.50 สามารถทำได้โดยการพิจารณาค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่ ช่องสัญญาณขาออกทั้ง 2 ช่องสัญญาณการจากข้อมูลในตารางที่ 4.10 ตามขั้นตอนที่ได้ปรากฏในหัวข้อ “2.3 สัมประสิทธิ์คู่ควบ”

เมื่อพิจารณาความเข้มแสงส่องผ่านที่แปรผันกับค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบของคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร จะสามารถแสดงได้ด้วยสมการ ดังต่อไปนี้

$$\kappa_{1480} = 0.56258 - (0.062154 \times n) \quad (4.5)$$

ดังนั้น เมทริกซ์การกระเจิงของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรซึ่งค่าความเข้มแสงส่อง ผ่านมีค่าแปรผันตามค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกในช่วง 1.00 จนถึง 1.50 สำหรับ แสงที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร จึงสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1-(0.56258-(0.062154 \times n))} & 0 \\ \sqrt{0.56258-(0.062154 \times n)} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in1} \\ E_{in2} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

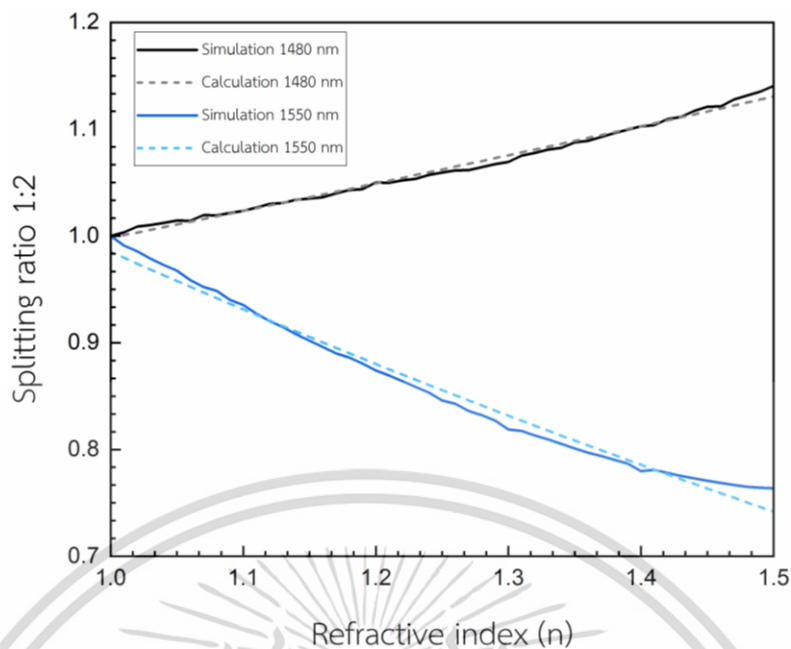
และเมื่อพิจารณาความเข้มแสงส่องผ่านที่แปรผันกับค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูป ทรงกระบอก ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบของคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร จะสามารถแสดงได้ ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$\kappa_{1550} = 0.36301 - (0.14072 \times n) \quad (4.7)$$

ดังนั้น เมทริกซ์การกระเจิงของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรซึ่งค่าความเข้มแสงส่อง ผ่านมีค่าแปรผันตามค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกในช่วง 1.00 จนถึง 1.50 สำหรับ แสงที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร จึงสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1-(0.36301-(0.14072 \times n))} & 0 \\ \sqrt{0.36301-(0.14072 \times n)} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in1} \\ E_{in2} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังการแยกแสงที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ และค่ากำลังการแยกแสงที่ได้จากคำนวณค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบกับค่าดัชนีหักเหแสงที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วง 1.00 จนถึง 1.50 ของข้อบกพร่องรูปทรงระบอบ

เส้นประบนรูปที่ 4.18 แสดงค่ากำลังการแยกแสงของคลื่นแสงทั้งสองความยาวคลื่นซึ่งถูกคำนวณจากค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบดังที่ปรากฏในสมการที่ 4.5 และ 4.7 เมื่อนำมาค่ากำลังการแยกแสงดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์พบว่ามีค่าความแตกต่างโดยเฉลี่ย 0.1320 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร และมีค่าความแตกต่างโดยเฉลี่ย 0.4304 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยการออกแบบท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรในย่านความยาวคลื่นเฉพาะและการประยุกต์ใช้สามารถสรุปได้ตามรายละเอียดที่ปรากฏดังนี้

5.1.1 สรุปผลการศึกษาท่อนำคลื่นแสงแบบตรง

ผลการศึกษาท่อนำคลื่นแสงแบบตรงซึ่งมีความยาวของ 13 ไมโครเมตร และขนาดพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางไมโครเมตร โดยการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลาด้วยโปรแกรม OptiFDTD ในวิทยานิพนธ์นี้พบว่า

ค่าความเข้มแสงส่องผ่านจากท่อนำคลื่นแสงมีค่า 99.8288 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร และมีค่าความเข้มแสงส่องผ่าน 99.8272 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร นอกจากนี้ค่าการลดทอนของสัญญาณของคลื่นแสงทั้งสองความยาวคลื่นมีค่าเป็น 0.0074 และ 0.0075 เดซิเบล ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่สามารถคำนวณได้สำหรับคลื่นแสงทั้งสองความยาวคลื่นมีค่า 0.1318 และ 0.1330 ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ

จากผลการศึกษาดังกล่าวจึงสามารถสรุปได้ว่า คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 และ 1550 นาโนเมตร ในโหมดพื้นฐานสามารถเดินทางภายในโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงซึ่งมีแกนกลางเป็นวัสดุอินเดียมฟอสไฟด์ และมีเปลือกหุ้มเป็นอากาศได้

5.1.2 สรุปผลการศึกษาท่อนำคลื่นแสงรูปตัววาย

ผลการศึกษาท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายซึ่งมีช่องสัญญาณขาเข้าหนึ่งช่องสัญญาณและมีช่องสัญญาณขาออกสองช่องสัญญาณ พบว่าโครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบสมมาตรจะมีค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่ช่องสัญญาณทั้งสองใกล้เคียงกันสำหรับคลื่นแสงทั้งสองความยาวคลื่น ในขณะที่โครงสร้างของท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรจะมีค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่ช่องสัญญาณทั้งสองที่แตกต่างกันสำหรับคลื่นแสงทั้งสองความยาวคลื่น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) โครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบสมมาตรซึ่งมีช่องสัญญาณขาออกทั้งสองทำมุม 45 องศา กับแนวกึ่งกลางของช่องสัญญาณขาเข้าพบว่า ค่าความเข้มแสงส่องผ่านจากช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 มีค่า 50.2318 เปอร์เซ็นต์ และช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 2 มีค่า 49.7682 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร และสำหรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร มีค่าความเข้มแสงส่องผ่าน 63.6173 และ 36.3828 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าการลดทอนของสัญญาณของคลื่นแสงทั้งสองความยาวคลื่นมีค่าเป็น 0.0089 และ 0.0112 เดซิเบล ตามลำดับ

2) โครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรซึ่งมีช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 2 ทำมุม 45 องศา กับช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 พบว่าค่าความเข้มแสงส่องผ่านจากช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 มีค่า 92 เปอร์เซ็นต์ และช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 2 มีค่า 8 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคลื่นแสงทั้งสองความยาวคลื่น นอกจากนี้ค่าการลดทอนของสัญญาณมีค่าเป็น 0.0532 เดซิเบล สำหรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร และ 0.0905 เดซิเบล สำหรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร

จากผลการศึกษาดังกล่าวจึงสามารถสรุปได้ว่า คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 และ 1550 นาโนเมตร ในโหมดพื้นฐานสามารถเดินทางภายในโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายทั้งสองลักษณะได้ โดยท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรจะมีค่าการลดทอนของสัญญาณสำหรับคลื่นแสงทั้งสองความยาวคลื่นมากกว่าท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบสมมาตร

5.1.3 สรุปผลการศึกษาท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกอยู่ที่บริเวณรอยต่อของช่องสัญญาณขาออก

ผลการศึกษาท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกอยู่ที่บริเวณรอยต่อของช่องสัญญาณขาออก พบว่าข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกที่ถูกเพิ่มลงในโครงสร้างของท่อนำคลื่นสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่ช่องสัญญาณขาออกทั้งสองสำหรับคลื่นแสงทั้งสองความยาวคลื่นโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1.3.1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก

พบว่าสำหรับคลื่นแสงมีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร ค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่บริเวณช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 มีค่าลดลงเมื่อขนาดของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีขนาดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่บริเวณช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า สำหรับคลื่นแสงมีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร ค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่บริเวณช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 1 มีค่าลดลงเมื่อขนาดของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีขนาดเพิ่มขึ้นในช่วง 0.28 จนถึง 0.36 ไมโครเมตร และค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่ช่องสัญญาณดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.37 จนถึง 0.50 ไมโครเมตร ในขณะที่ค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่บริเวณช่องสัญญาณขาออกช่องที่ 2 มีแนวโน้มตรงกันข้ามกัน

จากผลการศึกษาดังกล่าวจึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่ช่องสัญญาณขาออกทั้งสองมีค่าเปลี่ยนแปลงไปขึ้นกับขนาดของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกและ ความยาวคลื่นของคลื่นแสง ความเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสอดคล้องกับการนำไปประยุกต์กับงานในด้านการสื่อสารด้วยแสงได้ดังนี้

1) การประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์แยกแสงที่มีกำลังการแยกแสงแบบสมกำลัง

จากผลการศึกษาดังกล่าวพบว่าข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกขนาด 0.35 ไมโครเมตร ทำให้เกิดค่ากำลังการแยกแสงแบบสมกำลังสำหรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร โดยมีค่าการลดทอนของสัญญาณเป็น 0.2832 เดซิเบล ในขณะที่คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร จะเกิดค่ากำลังการแยกแสงแบบสมกำลังขึ้นเมื่อข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกขนาดมีขนาด 0.28 จนถึง 0.36 ไมโครเมตร โดยข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกขนาด 0.29 ไมโครเมตร ทำให้มีค่าการลดทอนของสัญญาณต่ำที่สุดคือ 0.3049 เดซิเบล

2) การประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์แยกแสงที่มีกำลังการแยกแสงแบบไม่สมกำลัง

จากผลการศึกษาดังกล่าวพบว่าข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกสามารถทำให้เกิดค่ากำลังการแยกแสงแบบไม่สมกำลังสำหรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร โดยมีค่ากำลังการแยกแสงในอัตรา 1 ต่อ 2, 1 ต่อ 4, 1 ต่อ 7, 2 ต่อ 3, 4 ต่อ 3, 6 ต่อ 5 และ 7 ต่อ 1 ในขณะที่คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร จะเกิดค่ากำลังการแยกแสงแบบไม่สมกำลังในอัตรา 3 ต่อ 2 และ 5 ต่อ 2

จากผลการศึกษาจึงสามารถสรุปได้ว่า ท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกจะส่งผลให้ค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่ช่องสัญญาณขาออกทั้งสองมีค่าเปลี่ยนแปลงไป การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้สามารถนำไปประยุกต์เข้ากับงานในด้านการสื่อสารด้วยแสงได้โดยการนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์แยกแสงสำหรับวงจรรวมเชิงแสงที่มีความซับซ้อนโดยอาศัยโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรร่วมกับข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก จากผลการวิจัยพบว่าความเข้มแสงที่เดินทางในแต่ละช่องสัญญาณขาออกสามารถควบคุมหรือกำหนดได้โดยการปรับขนาดของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกให้เหมาะสม ทำให้สามารถลดความซับซ้อนในการออกแบบโครงสร้างของวงจรรวมเชิงแสงที่ต้องการอุปกรณ์แยกแสงที่มีกำลังการแยกแสงทั้งแบบสมกำลังและ แบบไม่สมกำลังได้

5.1.3.2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอก

พบว่าค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่ช่องสัญญาณขาออกทั้งสองของโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกดังนี้

เมื่อค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 1.00 จนถึง 2.50 พบว่าค่าความเข้มแสงส่องผ่านของคลื่นแสงทั้งสองความยาวคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งส่งผลให้ค่ากำลังการแยกแสงมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อพิจารณาช่วงที่ค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกมีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 1.00 จนถึง 1.50 พบว่าค่ากำลังการแยกแสงของคลื่นแสงทั้งสองความยาวคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับค่าดัชนีหักเหแสง

ค่ากำลังการแยกแสงของคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 1.0000 เป็น 1.1405 โดยมีค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลง 0.2653 RIU^{-1} และมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนใจ 0.9889 ในขณะที่ค่ากำลังการแยกแสงของคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร มีแนวโน้มลดลงจาก 1.0000 เป็น 0.7637 มีค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลงและมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนใจ 0.4908 RIU^{-1} และ 0.9889 ตามลำดับ

จากผลการศึกษาก็สามารถสรุปได้ว่าท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกจะส่งผลให้ค่าความเข้มแสงส่องผ่านที่ช่องสัญญาณขาออกทั้งสองมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งความเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับค่าดัชนีหักเหแสงสำหรับตรวจสอบสารตัวอย่างที่มีค่าดัชนีหักเหแสงในช่วง 1.00 จนถึง 1.50 เมื่อมีข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกขนาด 0.35 ไมโครเมตร ทำหน้าที่เป็นพื้นที่ตรวจจับสำหรับบรรจุสารตัวอย่างที่ต้องการตรวจวัดค่าดัชนีหักเหแสงร่วมกับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1480 และ 1550 นาโนเมตร โดยอาศัยหลักการการเปลี่ยนค่าความเข้มแสงของตัวตรวจจับสำหรับงานในด้านความปลอดภัย

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยการออกแบบท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรในย่านความยาวคลื่นเฉพาะและการประยุกต์ใช้ที่ได้นำเสนอไปในวิทยานิพนธ์นี้ พบว่าโครงสร้างท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตรสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์แยกแสงบนท่อนำคลื่นสำหรับงานด้านการสื่อสารด้วยแสง หรืออุปกรณ์ตรวจจับค่าดัชนีหักเหแสงสำหรับงานด้านความปลอดภัยได้ ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์จึงได้มีข้อเสนอแนะสำหรับการนำงานวิจัยไปต่อยอดในอนาคตดังต่อไปนี้

5.2.1 การต่อยอดการออกแบบท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตร

โครงสร้างท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตรยังสามารถต่อยอดได้โดยอาศัยการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลาสำหรับพัฒนาอุปกรณ์สำหรับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรวมเชิงแสงอื่น ๆ เช่น อุปกรณ์แยกแสงแบบหลายช่องสัญญาณขาออก (1xN Optical splitter) อุปกรณ์รวมแสง (Optical coupler) ลอจิกเกตเชิงแสง (Optical logic gate) เป็นต้น

5.2.2 การต่อยอดเป็นอุปกรณ์ทางแสงจากท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตร

โครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรและ ผลของข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกที่ได้ศึกษายังสามารถนำไปต่อยอดได้โดยการสร้างชิ้นงานจริงด้วยเทคนิคที่สามารถประยุกต์มาจากเทคนิคการสร้างฟิล์มบาง (Thin-film fabrication technique) โดยเทคนิคที่ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์พบว่ามีความเหมาะสมได้แก่ เทคนิคกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรด้วยแสง (Photolithography) ซึ่งเป็นการสร้างหน้ากากของโครงสร้างที่ต้องการขึ้นด้วยการทำลวดลายลงบนสารไวแสงแล้วฉาบทับด้วยวัสดุที่ต้องการสร้างโครงสร้างของท่อนำคลื่น หรือเทคนิคการเขียนโดยตรงด้วยลำแสงเลเซอร์ (Direct Laser writing) ซึ่งเป็นการแกะสลักโครงสร้างของท่อนำคลื่นลงบนวัสดุของฐานรองตามลักษณะที่ต้องการ โดยเทคนิคดังกล่าวสามารถสร้างโครงสร้างซึ่งมีขนาดเล็กกว่าระดับไมโครเมตร (Sub-micron) ได้อย่างแม่นยำ

สำหรับการนำโครงสร้างท่อนำคลื่นแสงรูปตัววายแบบไม่สมมาตรมาต่อยอดเป็นอุปกรณ์แยกแสงบนท่อนำคลื่นสามารถทำได้โดยการสร้างโครงสร้างท่อนำคลื่นด้วยเทคนิคที่ได้กล่าวมาข้างต้น ร่วมกับการสร้างข้อบกพร่องรูปทรงกระบอกโดยใช้แสงเลเซอร์เจาะลงบนโครงสร้างของท่อนำคลื่นตามขนาดที่ต้องการ การทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์แยกแสงดังกล่าวสามารถทำได้โดยอาศัยเทคนิคการส่งแสงผ่านอุปกรณ์ (Optical launching technique) เพื่อยืนยันถึงค่ากำลังการแยกแสงของอุปกรณ์แยกแสง และความถูกต้องแม่นยำของผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

ในขณะที่การนำโครงสร้างท่อนำคลื่นรูปตัววายแบบไม่สมมาตรมาต่อยอดเป็นอุปกรณ์ตรวจจับค่าดัชนีหักเหแสงอาจจำเป็นต้องมีการอาศัยกลไกของเครื่องกลระดับไมโครหรือนาโน (Nano or Micro Electro-Mechanical Systems : NEMS or MEMS) ในการออกแบบอุปกรณ์ชนิดสารตัวอย่างในระดับไมโครหรือนาโน (Micro or Nano injector) เพื่อฉีดตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบเข้าสู่บริเวณพื้นที่ตรวจจับของโครงสร้างท่อนำคลื่น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Pollock, C. and Lipson, M. 2003. **Integrated Photonics**. Boston : Springer.
- [2] Boudrioua A. 2009. **Photonic Waveguides: Theory and Applications**. New York : John Wiley and Sons.
- [3] Pedrotti, F.L. Pedrotti, L.M. and Pedrotti, L.S. 2017. **Introduction to Optics**. 3rd ed. London : Prentice-Hall International.
- [4] Kawano, K. and Kitch, T. 2001. **Introduction to Optical Waveguide Analysis**. New York : John Wiley and Sons.
- [5] Yee, K.S. 1966. "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 14(3) : 302-307.
- [6] Kasap, S.O. 2013. **Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices**. Harlow : Pearson Education Limited.
- [7] ปรีชา ยุพาพิน. 2543. **เครือข่ายใยแก้วนำแสง**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.
- [8] Burtscher, C., Lucki, M. and Seyringer, D. 2015. "Comparison of optical properties of 1x8 splitters based on Y-branch and MMI approaches." *Romanian Reports in Physics*. 67(4) : 1578-1585.
- [9] Blahut, M. and Kasprzak, D. 2004. "Multimode interference structures – properties and applications." *Optica Applicata*. 34(4) : 573-587.
- [10] Talbot, H.F. 1836. "Facts relating to optical science." *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. 9(56) : 401-407.
- [11] Tang, X., Liao, J., Li, H., Zhang, L., Lu, R., and Liu, Y. 2010. "A novel scheme for 1xN optical power splitter." *Optics Express*. 18(21) : 21697-21704.
- [12] Singhal, R., Satyanarayan, M.N., and Pal, S. 2012. "Fabrication of single-mode Y-branch waveguides in photosensitive polymer with reduced Y-junction residue." *Optik*. 123 : 1911-1914.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Burtscher, C., Seyringer, D., Kuzma, A., and Lucki, M. 2017. "Modeling and optimization of 1 9 32 Y-branch splitter for optical transmission systems." *Optical Quantum Electronics*. 49 : 396.
- [14] Gašo, P., Pudiš, D., Seyringer, D., Kuzma, A., Gajdošová, L., Mizera, T., and Goraus, M. 2021. "3D Polymer Based 1x4 Beam Splitter." *Journal of Lightwave Technology*. 39(1) : 154-161.
- [15] Yang, L.C., Huang, C.C., Huang, H.C., and Tsao, S.L. 2012. "A novel 1 × 2 optical power splitter with PBG structures on SOI substrate." *Optik*. 123 : 306-309.
- [16] Ab-Rahman, M.S., Aziz, A.N.A., Nordin, R., and Jumari, K. 2020. "Optimum design of an optical waveguide: Determination of the branching angle of s-bend waveguides." *Optik*. 200 : 163249.
- [17] Tan, Y.C., Ji, W.B., Mamidala, V., Chow, K.K., and Tjin, S.C. 2014. "Carbon-nanotube-deposited long period fiber grating for continuous refractive index sensor applications." *Sensors and Actuators B: Chemical*. 196 : 260-264.
- [18] Sun, S.M., Sun, Y.L., Zheng, B.Y., Wang, P., Hou, Z.S., Dong, W.F., Zhang, L., Chen, Q.D., Tong, L.M., Sun, H.B. 2016. "Protein-based Y-junction optical micro-splitters with environment-stimulus-actuated adjustments." *Sensors and Actuators B: Chemical*. 232 : 571-576.
- [19] Ranacher, C., Consani, C., Tortschanoff, A., Jannesari, R., Bergmeister, M., Grille, T., and Jakoby, B. 2018. "Mid-infrared absorption gas sensing using a silicon strip waveguide." *Sensors and Actuators A: Physical*. 277 : 117-123.
- [20] Yin, B., Wu, S., Wang, M., Liu, W., Li, H., Wu, B., and Wang, Q. 2019. "High-sensitivity refractive index and temperature sensor based on cascaded dualwavelength fiber laser and SNHNS interferometer." *Optics Express*. 27(1).
- [21] Wang, X., Zhu, J., Wen, X., Wu, X., Wu, Y., Su, Y., Tong, H., Qi, Y., Yang, H. 2019. "Wide range refractive index sensor based on a coupled structure of Au nanocubes and Au film." *Optics Materials Express*. 9(7).
- [22] Pettit, G.D. and Turner, W.J. 1965. "Refractive index of InP." *Journal of Applied Physics*. 36(2081).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] Adachi S. 1989. "Optical dispersion relations for GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, InSb, $Al_xGa_{1-x}As$, and $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$." *Journal of Applied Physics*. 66 : 6030-6040.
- [24] บริษัท ทีโอที จำกัด (มหาชน). 2563. **โครงการวิจัยศึกษาผลการประยุกต์นำเส้นใยแก้วนำแสงหลายเส้นท่อหุ้มร่วมใน Protective Sleeves เดียวกัน**. กรุงเทพฯ : สถาบันนวัตกรรม ทีโอที(นฐ.).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นาย พชร พงศ์วิศิษฐ์
วัน เดือน ปีเกิด	12 พฤศจิกายน พ.ศ.2535
ประวัติการศึกษา	(2558) วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2560) วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2566) ปรัชญาดุสิตบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษา	(2560-2562) ทุนอุดหนุนการศึกษาระดับดุสิตบัณฑิตแบบมีค่าครองชีพ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประวัติการทำงาน	(2564) ผู้ช่วยวิจัย โครงการวิจัยเรื่อง ระบบไอโอทีสำหรับควบคุมปัจจัยที่มี ผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายคลอเรลล่าเพื่อใช้ในการเพาะเลี้ยงไรแดง ทุนอุดหนุนเพื่อการพัฒนาวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม สำนักงาน คณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (2565) ผู้ช่วยวิจัย โครงการวิจัยเรื่อง ระบบอัตโนมัติสำหรับติดตามการ เจริญเติบโตของจิ้งหรีดด้วยกล้องอินฟราเรด ทุนวิจัยส่งเสริมผลงานวิชาการ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	Phongwisit, P., Kamoldilok, S., Limsuwan, P. and Srinuanjan, K. 2023. “Ultra-wide range optical refractive index sensor based on asymmetric Y-junction integrated optical waveguide.” <i>Ukrainian Journal of Physical Optics</i> . 24(2) : 161-171. Srinuanjan, K., Kruakuanphet, A., Phongwisit, P. , Yindeesuk, W. and Kamoldilok, S. 2023. “Electronic nose ammonia gas monitoring via IoT system for Chlorella sp. Cultivation.” <i>Proc. SPIE 12327, SPIE Future Sensing Technologies 2023, 123271F.</i> Kruakuanphet, A., Phongwisit, P. , Yindeesuk, W., Kamoldilok, S. and Srinuanjan, K. 2022. “Multi-range ammonia gas sensor control and display via IoT system.” <i>2022 26th International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC), Sakon Nakhon, Thailand, 2022, 182-185.</i>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Phongwisit, P., Kamoldilok, S., Buranasiri, P., Srinuanjan, K. and Limsuwan, P. 2022. “Design and simulation of asymmetric Y-junction beam splitter with controllable splitting based on adjusted air-hole defect.” *Ukrainian Journal of Physical Optics*. 23(3) : 142-149.

Kamoldilok, S., **Phongwisit, P.** and Tipaphong, W. 2019. “Low-cost tunable light source using RGB-LED module for absorption spectroscopy.” *Proc. SPIE 11205*, 7th International Conference on Optical and Photonic Engineering (icOPEN 2019), 1120515.

Phongwisit, P., Kamoldilok, S. and Buranasiri, P. 2016. “Elongation measurement using 1-dimensional image correlation method.” *Proc. SPIE 10023*, Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications IV, 1002305.

Kamoldilok, S. and **Phongwisit, P.** 2016. “Low Cost Ultraviolet-Visible Spectroscopy Using LED Light Source.” *The 4th International Symposium on Fundamental and Applied Sciences 2016*. Kyoto, Japan, 1284-1286.

Plagiarism Checking Report

Created on Jul 3, 2023 at 13:42 PM

Submission Information

ID	SUBMISSION DATE	SUBMITTED BY	ORGANIZATION	FILENAME	STATUS	SIMILARITY INDEX
3250492	Jul 3, 2023 at 13:42 PM	60605010@kmitl.ac.th	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	Thesis_3_7_63.pdf	Completed	0.00 %

Match Overview

NO.	TITLE	AUTHOR(S)	SOURCE	SIMILARITY INDEX
No data available in table				



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TEXT FROM SUBMITTED DOCUMENT

TEXT FROM SOURCE DOCUMENT(S)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้