

การศึกษาและการสร้างแบบจำลองการทำงานของท่อนำคลื่น
แบบเข้าคู่ของวัสดุซิลิกอนและลิเทียมไนโอเบต

Design and Modeling of Silicon and Lithium Niobate
Optical Directional Coupler Waveguide



ภวภาส จตุรภากร

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

Design and Modeling of Silicon and Lithium Niobate Optical Directional Coupler Waveguide

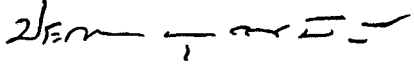

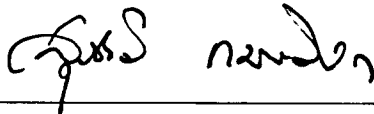
PAWAPHAT JATURAPHAGORN

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2018

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาและการสร้างแบบจำลองการทำงานของท่อนำคลื่นแบบเข้าสู่ของวัสดุซิลิกอนและลิเทียมไนโอเบต
Design and Modeling of Silicon and Lithium Niobate Optical Directional Coupler Waveguide

ชื่อนักศึกษา นายภวภาส จตุรภากร รหัสนักศึกษา 58051113
ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2561
อาจารย์ที่ปรึกษา อ.สุรชาติ กมลติลก

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ ประธานกรรมการ	
ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข กรรมการ	
อ.สุรชาติ กมลติลก กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาและการสร้างแบบจำลองการทำงานของท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ของวัสดุซิลิกอนและลิเทียมไนโอเบต
ชื่อนักศึกษา	นายภวภาส จตุรภากร รหัสนักศึกษา 58051113
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ.สุรชาติ กมลดีลก

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการค้นคว้าท่อนำคลื่นสองชนิดซึ่งสร้างมาจากวัสดุ ซิลิกอน และลิเทียมไนโอเบต โดยดำเนินการจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ของแสงผ่านท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ด้วยโปรแกรม OptiFDTD (ซึ่งซิลิกอนและลิเทียมไนโอเบตมีค่าดัชนีหักเห 3.4758 และ 2.2111 ตามลำดับ) (โดยค่าดัชนีหักเหนี้ได้มาจากการเคลื่อนที่ของแสงผ่านท่อนำคลื่น โดยที่แสงมีความยาวคลื่นเท่ากับ 1.55 ไมโครเมตร) โดยผลลัพธ์จากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์จะได้รับความเข้มแสงขาเข้าและความเข้มแสงขาออก ในการจำลองสถานการณ์นี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างท่อนำคลื่นครั้งละ 10 นาโนเมตร เริ่มต้นที่ท่อนำคลื่นทั้งสองวางติดกัน (0 นาโนเมตร) จนกระทั่งท่อนำคลื่นทั้งสองวางห่างกัน 200 นาโนเมตร ซึ่งในการสรุปผลการทดลองสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ความเข้มแสงขาออกเทียบกับความเข้มแสงขาเข้า ซึ่งผลปรากฏว่า ท่อนำคลื่นแบบลิเทียมไนโอเบตมีความเข้มแสงขาออกใกล้เคียงกับความเข้มแสงขาเข้ามากกว่าท่อนำคลื่นแบบซิลิกอน กล่าวคือ ท่อนำคลื่นแบบลิเทียมไนโอเบตมีการสูญเสียของแสงภายในท่อนำคลื่นน้อยกว่าท่อนำคลื่นแบบลิเทียมไนโอเบต และมีประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานสูงกว่าท่อนำคลื่นแบบซิลิกอน ดังนั้นสามารถสรุปผลการทดลองนี้ได้ว่า ท่อนำคลื่นแบบลิเทียมไนโอเบตมีประสิทธิภาพสูงกว่าท่อนำคลื่นแบบซิลิกอน

คำสำคัญ : ซิลิกอน ท่อนำคลื่น ท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ ลิเทียมไนโอเบต

Title	Design and Modeling of Silicon and Lithium Niobate Optical Directional Coupler Waveguide
Student	Mr.Pawaphat Jaturaphagorn Student ID 58051113
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2018
Advisor	Mr.Surachart Kamondilok

Abstract

In this special project has researched about two waveguides which they fabricated from silicon and lithium niobate. In this research had simulated the propagation of light within optical directional coupler waveguide via OptiFDTD program (Silicon and Lithium Niobate have refractive indices are 3.4758 and 2.2111, respectively) (refractive indices came from propagation of light through distinct waveguides at wavelength at 1.55 micrometer). The simulation results obtained input intensities and output intensities. In this project varied distance between two waveguides by 10 nanometer per time, started at contact waveguide (0 nanometer) until they separate to each other 200 nanometers. The result can be analyzed by comparison output intensities with input intensities. Consequently, lithium niobate waveguide has output intensities closer to input intensities than silicon waveguide, but energy transfer efficiency is higher. Therefore, the simulation result can conclude that lithium niobate waveguide has efficiency higher than silicon waveguide.

Keyword: Lithium Niobate, Optical Direction Coupler, Silicon, Waveguide

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไปได้เลย หากขาดอาจารย์สุรชาติ กมลติลก อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ใช้คำปรึกษาต่างๆ ตลอดจนเสนอแนะแนวคิด วิธีการดำเนินงาน รวมไปถึงช่วยปรับปรุงแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

นอกจากนี้แล้วผู้จัดทำต้องขอขอบคุณรุ่นพี่ภายในห้องปฏิบัติการเป็นอย่างสูง ที่ให้คำปรึกษาแนะนำการดำเนินงาน และช่วยปรับปรุงแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้

ภวภาส จตุรภากร

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	21
3.1 โปรแกรม OptiFDTD.....	21
3.2 การตั้งค่าโปรแกรม OptiFDTD สำหรับการดำเนินงานวิจัย.....	22
3.3 การออกแบบท่อนำคลื่นแบบ Optical directional coupler.....	23
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการอภิปรายผล.....	34
4.1 ท่อนำคลื่นจากวัสดุซิลิกอน.....	34
4.2 ท่อนำคลื่นจากวัสดุลิเทียมไนโอเบต.....	57
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	80
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	80
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	86
เอกสารอ้างอิง.....	87

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
4.1 ผลการทดลองของท่อนำคลื่นแบบซิลิกอน.....	55
4.2 ผลการทดลองของท่อนำคลื่นแบบลิเทียมไนโอเบต.....	78
5.1 ร้อยละโดยประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงาน.....	80

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงลักษณะโครงสร้างของท่อนำคลื่นแบบ Planar slab dielectric waveguide.....	10
2.2 แสดงลักษณะการสะท้อนของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบไดอิเล็กทริก.....	11
2.3 แสดงการกระจายของสนาม (Field Distribution).....	13
2.4 แสดง Couple Waveguide.....	14
2.5 ปรากฏการณ์ Optical Damage อันเนื่องมาจากปรากฏการณ์ Photorefractive effect...	19
3.1 โปรแกรม OptiFDTD.....	21
3.2 แสดงหน้าต่าง Initial Properties.....	22
3.3 แสดงหน้าต่าง Profile Designer OptiFDTD 32 bit.....	23
3.4 แสดงหน้าต่างซึ่งใช้สำหรับกำหนดคุณสมบัติวัสดุ.....	24
3.5 แสดงหน้าต่างซึ่งกำหนดคุณสมบัติวัสดุ จากนั้นข้อมูลจะถูกบันทึกไว้ที่ folder dielectric ชื่อ Si.....	25
3.6 แสดงหน้าต่างซึ่งจะกำหนดคุณสมบัติของ waveguide จากนั้นจะเกิด profile ใหม่ ภายใต folder channel.....	26
3.7 แสดงการตั้งค่าหน้าต่าง Initial Properties.....	
3.7.1 Default Waveguide.....	27
3.7.2 Wafer Dimension.....	27
3.7.3 2D Wafer Properties.....	28
3.7.4 3D Wafer Properties.....	28
3.8 แสดงหน้าต่าง OptiFDTD Designer.....	28
3.9 แสดงอุปกรณ์ที่แถบเครื่องมือสำหรับการวาดท่อนำคลื่นแบบ Optical Directional Coupler Waveguide.....	29
3.10 แสดงการออกแบบท่อนำคลื่นที่ใช้ในโครงงานพิเศษ (Optical directional Coupler Waveguide).....	30
3.11 แสดงหน้าต่าง Waveguide Properties.....	31
3.12 บริเวณกรอบสี่เหลี่ยมสีดำแสดงบริเวณที่เกิดปรากฏการณ์เข้าคู่ (Coupling effect) และ ระยะห่างระหว่างท่อนำคลื่นทั้งสองส่วน คือค่าพารามิเตอร์ที่ต้องทำการเปลี่ยนแปลง.....	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 แสดงการตั้งค่าหน้าต่าง Simulation.....	33
4.1 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 0 nm.....	34
4.2 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 10 nm.....	35
4.3 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 20 nm.....	36
4.4 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 30 nm.....	37
4.5 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 40 nm.....	38
4.6 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 50 nm.....	39
4.7 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 60 nm.....	40
4.8 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 70 nm.....	41
4.9 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 80 nm.....	42
4.10 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 90 nm.....	43
4.11 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 100 nm.....	44
4.12 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 110 nm.....	45
4.13 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 120 nm.....	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 130 nm.....	47
4.15 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 140 nm.....	48
4.16 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 150 nm.....	49
4.17 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 160 nm.....	50
4.18 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 170 nm.....	51
4.19 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 180 nm.....	52
4.20 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 190 nm.....	53
4.21 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 200 nm.....	54
4.22 กราฟแสดงผลการทดลองของท่อนำคลื่นแบบซิกโกน.....	56
4.23 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 0 nm.....	57
4.24 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 10 nm.....	58
4.25 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 20 nm.....	59
4.26 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 30 nm.....	60
4.27 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 40 nm.....	61

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 50 nm.....	62
4.29 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 60 nm.....	63
4.30 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 70 nm.....	64
4.31 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 80 nm.....	65
4.32 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 90 nm.....	66
4.33 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 100 nm.....	67
4.34 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 110 nm.....	68
4.35 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 120 nm.....	69
4.36 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 130 nm.....	70
4.37 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 140 nm.....	71
4.38 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 150 nm.....	72
4.39 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 160 nm.....	73
4.40 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 170 nm.....	74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.41 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 180 nm.....	75
4.42 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 190 nm.....	76
4.43 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 200 nm.....	77
4.44 กราฟแสดงผลการทดลองของท่อนำคลื่นแบบลิเทียมไนโอเบต.....	79
5.1 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานของท่อนำคลื่นแบบซิลิกอน.....	84
5.2 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานของท่อนำคลื่นแบบลิเทียมไนโอเบต.....	85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

Waveguide หรือท่อนำคลื่น เป็นอุปกรณ์เชิงแสงชนิดหนึ่ง สำหรับใช้ในการนำพา และควบคุม คลื่นแสง ที่เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ซึ่งถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการสื่อสารเชิงแสง (Optical Communication) ดังนั้นท่อนำคลื่นจึงได้ถูกพัฒนาขึ้นมาอย่างเป็นลำดับ แม้กระทั่งในปัจจุบันท่อนำคลื่นก็ยังเป็นหัวข้อวิจัยในระดับสูง

นอกจากนี้ท่อนำคลื่นยังมีรูปแบบที่หลากหลายตามแต่การออกแบบของผู้ผลิต หรือผู้วิจัย ซึ่งการ ออกแบบที่แตกต่างกัน ก็จะมีประสิทธิภาพในการควบคุมแสงที่แตกต่างกัน อีกทั้งพฤติกรรมของแสง ภายในท่อนำคลื่นก็ยังคงแตกต่างกันออกไปตามแต่รูปร่างของท่อนำคลื่นอีกด้วย ดังนั้นในโครงการพิเศษ ฉบับนี้ ผู้ทำโครงการได้เลือกรูปแบบหนึ่งของท่อนำคลื่นมาเพื่อทำการศึกษาในระดับพื้นฐานถึง พฤติกรรมของแสงภายในท่อนำคลื่น ลักษณะการออกแบบที่เหมือนกัน แต่มีการเปลี่ยนแปลง พารามิเตอร์เล็กน้อย เช่น ความกว้าง ความห่าง ขนาดของท่อนำคลื่น จะส่งผลกระทบต่อ การเคลื่อนที่ ของแสงอย่างไร โดยรูปแบบของท่อนำคลื่นที่ผู้จัดทำโครงการเลือกมา คือ Directional Coupler Waveguide

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการออกแบบ และการจำลองสถานการณ์ (Simulation) ของท่อนำคลื่น
- 1.2.2 ค้นคว้าการเคลื่อนที่ของแสงภายในท่อนำแสงแบบเข้าคู่
- 1.2.3 ศึกษาการเกิดปรากฏการณ์เข้าคู่ (Coupling Effect)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการออกแบบและการจำลองสถานการณ์ ผ่านโปรแกรม OptiFDTD
- 1.3.2 วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ผ่านโปรแกรม OptiFDTD

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถใช้โปรแกรม OptiFDTD เพื่อการออกแบบ และการจำลองสถานการณ์ สำหรับ อุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์ได้ (Optical Equipment)
- 1.4.2 ฐานข้อมูลสำหรับวัสดุที่นำมาใช้สร้างเป็นท่อนำคลื่นประเภทต่าง ๆ ได้แก่ ซิลิกอน และ ลิเทียมไนโอเบต ซึ่งจะนำไปสู่การเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมกับประเภทของงาน

ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

กิจกรรม	ระยะเวลา									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง										
ดำเนินการวิจัยด้วยโปรแกรม OptiFDTD										
ตรวจสอบความถูกต้อง										
สรุป และวิเคราะห์ผลการทดลอง										

บทที่ 2

ทฤษฎีและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับแสง (Electromagnetic Theory of Light)

2.1.1 สมการแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations)

2.1.1.1 กฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้า (Gauss's Law of Electricity)

เป็นกฎที่กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ไฟฟ้า (Flux) และแหล่งกำเนิดซึ่งเป็นตัวสร้างฟลักซ์ไฟฟ้านั้นให้เกิดขึ้น หรืออาจเรียกว่าประจุไฟฟ้า (Electrical Charge) ซึ่งความสัมพันธ์นี้สามารถอธิบายได้ โดยการสร้างพื้นที่ผิวปิดรูปทรงใดๆ ขึ้นล้อมรอบประจุไฟฟ้านั้น ซึ่งพื้นที่ผิวปิดนั้นถือว่าเป็นพื้นที่ที่จินตนาการขึ้นมา (Imaginary closed surface) ซึ่งสามารถนิยามได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

$$\Phi_E = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \quad (1)$$

เมื่อ Φ คือ ฟลักซ์ไฟฟ้าของสนามไฟฟ้า, E คือ สนามไฟฟ้า (ในโครงงานพิเศษฉบับนี้ถือว่าตัวอักษรตัวพิมพ์หนาแสดงถึงการเป็นเวกเตอร์)

โดยทั่วไปพื้นที่ผิวปิดที่พิจารณาจะเป็นพื้นที่ผิวปิดทรงกลม ดังนั้น $d\mathbf{S} = \hat{R}R^2\sin(\theta)d\theta d\phi$ ดังนั้นจาก Vector Calculus จะได้ว่า

$$\Phi_E = \iiint \mathbf{E} \cdot \hat{R}R^2 \sin(\theta) d\theta d\phi$$

$$\Phi_E = \iiint ER^2 \sin(\theta) d\theta d\phi \quad (2)$$

$$\Phi_E = ER^2 4\pi \quad (3)$$

เมื่อ R คือ รัศมีของทรงกลม และ

$$\Phi_E = \frac{q}{\epsilon_0} = Q_{enc} \quad (4)$$

ดังนั้นจะได้สนามไฟฟ้าของประจุทรงกลม คือ

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^2} \quad (5)$$

เมื่อ E เป็นเวกเตอร์จะได้สมการของสนามไฟฟ้า คือ

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^2} \hat{n} \quad (6)$$

\hat{n} เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยใดๆ และกฎของเกาส์สามารถเขียนได้ว่า

$$\oint E \cdot dS = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (7)$$

ซึ่งสมการที่ 7 เรียกว่า Integral form of Gauss's Law of Electricity

2.1.1.2 กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก (Gauss's Law of Magnetism)

เป็นกฎที่บอกมีรูปแบบสมการเชิงคณิตศาสตร์คล้ายกันกับสมการที่ 1 หากแต่ว่ากฎข้อนี้เป็นกฎที่บอกว่า ในธรรมชาติไม่สามารถพบแม่เหล็กขั้วเดียวได้ (Magnetic Monopole)

$$\oint B \cdot dS = 0 \quad (8)$$

2.1.1.3 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law)

ก่อนหน้าการทดลองของฟาราเดย์ เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าภายในขดลวด สามารถกำเนิดสนามแม่เหล็กได้ แล้วในทางกลับกันการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กสามารถสร้างกระแสไฟฟ้าได้หรือไม่ จากการทดลองเคลื่อนแท่งแม่เหล็กเข้าไปภายในขดลวด สามารถสร้างกระแสไฟฟ้าขึ้นมาได้ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองนี้ได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กสามารถสร้างกระแสไฟฟ้าขึ้นมาได้ ซึ่งปรากฏการณ์นี้ได้ทำให้เกิดการนิยามแรงชนิดหนึ่งขึ้นมาในธรรมชาติ ซึ่งก็คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive Force – EMF)

$$EMF = - \frac{d\Phi_M}{dt} \quad (9)$$

สมการข้างต้นเรียกว่า Induced EMF และสนามแม่เหล็กมีฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux) ดังนี้

$$\Phi_M = \int B \cdot dS \quad (10)$$

EMF จะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่มีสนามไฟฟ้า ดังนั้น

$$EMF = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (11)$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (12)$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\int \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad (13)$$

สมการที่ 13 เรียกว่า Integral form of Faraday's Law

2.1.1.4 กฎของแอมแปร์ และการแก้ไขของแมกซ์เวลล์ (Ampere's Law with Maxwell Correction)

แสดงความสัมพันธ์ของขดลวดกับสนามแม่เหล็ก โดยที่เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปภายในขดลวดเส้นตรง จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบขดลวด

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} \quad (14)$$

แต่กฎนี้ไม่เป็นจริงเสมอไป ในกรณีที่ความต่างศักย์มีความเปลี่ยนแปลงกับเวลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งการชาร์จตัวเก็บประจุซึ่งจะทำให้กระแสในวงจรเป็นศูนย์ จนกระทั่งตัวเก็บประจุชาร์จเต็ม และเริ่มคายประจุ โดยกระบวนการดังกล่าวนี้ ทำให้กฎของแอมแปร์เกิดข้อผิดพลาดขึ้น เนื่องจากสนามแม่เหล็กจะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ความหนาแน่นกระแส J มีค่าไม่เป็นศูนย์ นอกจากนั้นจากการทดลองของฟาราเดย์ เมื่อความต่างศักย์มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา สนามแม่เหล็กย่อมเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วย

$$\epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{i}{A} = J_D \quad (15)$$

เมื่อ J_D คือ ความหนาแน่นกระแสเชิงระยะทาง (Displacement Current) โดยการแก้ข้อผิดพลาดของแอมแปร์ แมกซ์เวลล์ได้ทำการบวก Displacement Current กับกฎของแอมแปร์จะได้

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu \int (\mathbf{J} + J_D) \cdot d\mathbf{S} \quad (16)$$

2.1.2 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetics Wave)

จากสมการของแมกซ์เวลล์ทั้ง 4 สมการ สามารถเขียนออกมาได้ดังนี้

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (17)$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (18)$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad (19)$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu \int (\mathbf{J} + \mathbf{J}_D) \cdot d\mathbf{S} \quad (20)$$

สมการทั้งสี่ คือสมการของแมกซ์เวลล์ในรูปแบบอินทิกรัล (Integral form of Maxwell's Equation) และจากทฤษฎีบทไดเวอร์เจนซ์ และทฤษฎีบทของเคิร์ล (Divergence's Theorem and Stokes's Theorem) สามารถลดรูปสมการที่ 1-4 ให้กลายเป็นสมการในรูปแบบดิฟเฟอเรนเชียลได้ ดังนี้ (Differential form of Maxwell's Equation)

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{q}{\epsilon_0} = Q_{enc} \quad (21)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (22)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (23)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left(\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \right) \quad (24)$$

จากนั้นพิจารณาสมการที่ 5-8 ในสุญญากาศ (Free Space) จะได้ว่า (ไม่มีประจุ, ไม่มีกระแส)

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (25)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (26)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (27)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (28)$$

จากเอกลักษณ์เวกเตอร์ $\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$ พิจารณาสมการที่

27 จะได้ว่า

$$\nabla \times \left(-\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) = -\nabla^2 \mathbf{E} \quad (29)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{B}) = \nabla^2 \mathbf{E} \quad (30)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \left(\mu_0 \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \left(\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \nabla^2 \mathbf{E} \quad (31)$$

และในกรณีของสมการที่ 12 ก็ดำเนินการในลักษณะเดียวกัน จะได้สมการคลื่นเคลื่อนที่

ในสุญญากาศสำหรับสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ดังต่อไปนี้

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (32)$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} \quad (33)$$

2.1.3 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางไดอิเล็กทริก (Electromagnetic Wave in Dielectric Media)

การจะกล่าวถึงวัสดุไดอิเล็กทริก จำเป็นต้องทราบถึงตัวแปรซึ่งตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในตัววัสดุ อันได้แก่ โพลาริเซชัน และแมกนีไทเซชัน (Polarization and Magnetization)

โพลาริเซชัน และแมกนีไทเซชัน เป็นความสามารถของไดโพลภายในวัสดุซึ่งไดโพลนี้จะจัดเรียงตัวแบบไม่มีทิศทางในสถานะคงตัว (Steady State) กล่าวคือ สภาวะที่วัสดุไดอิเล็กทริกยังไม่ได้รับสนามไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็กภายนอก (External Electric and Magnetic Field) เมื่อมีการป้อนสนามไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็กเข้าไปภายในตัววัสดุ ไดโพลจะมีแนวโน้มการปรับตัวโน้มเอียงเข้าหาทิศทางของสนามภายนอก โดยเมื่อกล่าวถึงโพลาริเซชัน จะเป็นการกล่าวถึงพฤติกรรมของไดโพลของวัสดุไดอิเล็กทริก เมื่อกล่าวถึงการเกิดแมกนีไทเซชัน จะกล่าวถึงพฤติกรรมการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของวัสดุไดอิเล็กทริก (โดยทั่วไปเรียกว่าวัสดุที่มีไดโพลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกว่า วัสดุแม่เหล็ก (Magnetic Material) ซึ่งในที่นี้จะไม่กล่าวถึงวัสดุประเภทนี้ เนื่องจากมีรายละเอียดที่ค่อนข้างมาก และซับซ้อน)

ความสัมพันธ์ของโพลาริเซชัน และสนามไฟฟ้าในวัสดุไดอิเล็กทริกประเภทไอโซโทรปิก (Isotropic – กล่าวถึงการจัดเรียงตัวของอะตอมของวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวแบบสมมาตรในทุกทิศทาง พฤติกรรมของวัสดุจะเหมือนกันในทุกทิศทางที่เกิดการวัด)

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi \mathbf{E} \quad (34)$$

χ คือ ความสามารถในการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าภายนอกของวัสดุไดอิเล็กทริก (Electric Susceptibility)

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (35)$$

$$\epsilon = \epsilon_0 (1 + \chi) \quad (36)$$

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = (1 + \chi) \quad (37)$$

สมการที่ 37 เรียกว่า สมการของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และ ϵ คือ ค่าการซึบซาบทางไฟฟ้าของวัสดุ (Electric Permittivity of Medium)

แสงจะมีความเร็วในตัวกลางเท่ากับ

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (38)$$

$$n = \frac{c_0}{c} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \frac{\mu}{\mu_0}} \quad (39)$$

เมื่อตัวกลางไม่ใช่วัสดุแม่เหล็กจะได้

$$n = \frac{c_0}{c} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} = \sqrt{1 + \chi} \quad (40)$$

จากสมการที่ 32 จะได้

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (41)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \frac{\partial^2 (\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P})}{\partial t^2} \quad (42)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2} \quad (43)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2} \quad (44)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2} \quad (45)$$

สมการที่ 45 คือสมการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางไดอิเล็กทริก แบบไอโซโทรปิก และเป็นสารเนื้อเดียว (Homogeneous)

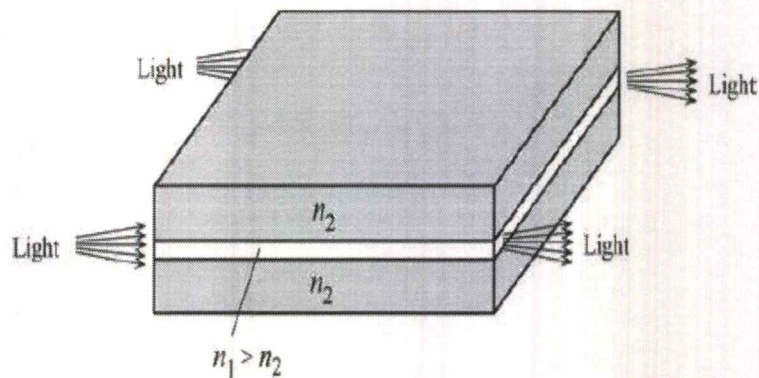
2.2 ท่อนำคลื่น (Waveguide)

ในวิชาทัศนศาสตร์แบบดั้งเดิมนั้นจะพิจารณาการเคลื่อนที่ของแสงผ่านอากาศซึ่งมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1 ผ่านอุปกรณ์ทางทัศนศาสตร์ (Optical Equipment) เช่น เลนส์ ปริซึม แก้ว กระจก การพิจารณาเส้นทางการเคลื่อนที่ของแสงผ่านตัวกลางอากาศ และอุปกรณ์ทางทัศนศาสตร์เพียงไม่กี่อย่างนี้เกิดข้อจำกัดขึ้นมากมาย ในยุคหลังที่ความรู้ทางด้านแสงเพิ่มมากขึ้น และมีการพัฒนาทางด้านอุปกรณ์ทางทัศนศาสตร์มากขึ้นเป็นลำดับ จึงเกิดการพิจารณาการเคลื่อนที่ของแสงในตัวกลางที่หลากหลายมากขึ้น เช่น ในตัวกลางไดอิเล็กทริก ซึ่งได้อธิบายดังหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งการพัฒนาอุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์ที่เพิ่มมากขึ้น ควบคู่กับวิชาความรู้ที่หลากหลายศาสตร์สาขานั้น ทำให้เกิดการประยุกต์ใช้แสง และหลักการทางทัศนศาสตร์เพื่อนำแสงไปใช้ในการสื่อสารข้อมูล โดยอุปกรณ์หลักๆ ที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในการสื่อสารข้อมูลเชิงแสง (Optical Communication) คืออุปกรณ์ที่เรียกว่า ท่อนำคลื่น (Waveguide)

2.2.1 Planar Slab Waveguide

เป็นท่อนำคลื่นแบบที่พื้นฐานที่สุดรูปแบบหนึ่ง โดยมีลักษณะดังรูปที่ 2.1 กล่าวคือ มีความหนา $2a$ มีค่าดัชนีหักเหที่แตกต่างกัน 2 ค่า คือ n_1 และ n_2 โดยที่ $n_1 > n_2$ และท่อนำคลื่นที่มีค่าดัชนีหักเหมากกว่าจะถูกล้อมรอบด้วยท่อนำคลื่นที่มีดัชนีหักเหน้อยกว่า โดยส่วนที่มีดัชนีหักเหมากกว่าเรียกว่า ชั้นแกน (Core) และส่วนที่มีดัชนีหักเหน้อยกว่าเรียกว่า ชั้นห่อหุ้ม (Cladding)

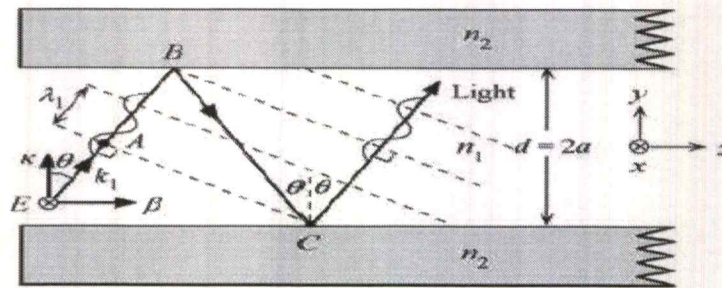
112 Chapter 2 • Dielectric Waveguides and Optical Fibers



ที่มา: **Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices, S.O. Kasap, Second Edition.**

รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะโครงสร้างของท่อนำคลื่นแบบ Planar Slab Dielectric Waveguide

โดยลักษณะการเคลื่อนที่ของแสงภายในท่อนำคลื่นนั้นมีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นเส้นทางแบบสลับฟันปลา (Zigzag) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากเกิดการสะท้อนกลับหมดภายในท่อนำคลื่น (สะท้อนที่ชั้นรอยต่อระหว่างวัสดุไดอิเล็กทริก 2 ชนิด ซึ่งมีค่าดัชนีหักเหแตกต่างกัน) แสดงได้ดังรูปที่ 2.2



ที่มา: Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices, S.O. Kasap,

รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการสะท้อนของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบไดอิเล็กทริก

จากภาพที่ 2.2 จะเห็นว่ามียุคที่ที่น่าสนใจอยู่ 3 จุด นั่นคือ จุด A, B และ C โดยจุด A เป็นจุดเริ่มต้นที่ใช้ในการพิจารณาการเคลื่อนที่ของแสงภายในท่อนำคลื่น จุด B และ C เป็นจุดที่เกิดการสะท้อนกลับหมดครั้งแรก และครั้งที่สองตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่จุด A และ C แล้วจะพบว่า การสะท้อนของลำแสงทั้งสองบริเวณนี้มีลักษณะเฟสตรงกัน (in Phase) ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันกับคลื่นที่บริเวณอื่นๆ

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาเส้นทางการเคลื่อนที่ของแสง (Optical Path Length) ของเส้นทางการเคลื่อนที่ทั้งหมด จะได้ว่า $AB+BC$ และมีเฟสต่างกัน $\Delta\phi_{AC}$

$$\Delta\phi_{AC} = k_1(AB + BC) - 2\phi = 2m\pi \quad (46)$$

เมื่อ $m = 0, 1, 2, \dots$ เป็นจำนวนจริงใดๆ และ k คือ wavevector หรือ propagation constant

$$k_1 = kn_1 = \frac{2\pi m}{\lambda} \quad (47)$$

เส้นทางการเคลื่อนที่ของแสง $AB+BC$ สามารถประมาณค่าได้ดังนี้

$$AB + BC = BC\cos(2\theta) + BC = 2d\cos(\theta) \quad (48)$$

จากสมการที่ 46 จะได้

$$k_1(2d\cos(\theta)) - 2\phi = 2m\pi \quad (49)$$

สมการที่ 49 แสดงการแทรกสอดแบบเสริมกัน (Constructive Interference)

สำหรับค่า m ใดๆ ได้ทำให้เกิด θ_m และ ϕ_m และเมื่อหารสมการที่ 20 ด้วย 2 ทั้งสมการจะทำให้เกิดเงื่อนไขท่อนำคลื่น (Waveguide Condition) ซึ่งแสดงเงื่อนไขการเคลื่อนที่ของคลื่นภายในท่อนำคลื่น เช่น การเคลื่อนที่ของคลื่นภายในท่อนำคลื่นโดยปราศจากการแทรกสอดแบบหักล้างกัน (Destructive Interference) และไม่เกิดการสูญเสียที่ Cladding

$$\frac{2\pi m}{\lambda}(2a)\cos(\theta_m) - 2\phi = m\pi \quad (50)$$

Wavevector หรือ Propagation Constant สามารถแสดงได้ 2 รูปแบบ คือ แบบที่มีทิศทางเดียวกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น และแบบที่มีทิศทางตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของคลื่น

$$\beta_m = k_1\sin(\theta_m) = \left(\frac{2\pi n_1}{\lambda}\right)\sin(\theta_m) \quad (51)$$

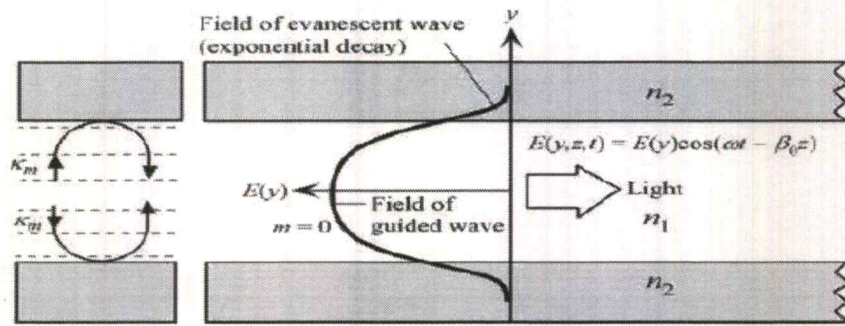
$$\kappa_m = k_1\cos(\theta_m) = \left(\frac{2\pi n_1}{\lambda}\right)\cos(\theta_m) \quad (52)$$

โดยสมการที่ 51 และ 52 คือ propagation constant แบบมีทิศทางตามทิศการเคลื่อนที่ของแสง และตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงตามลำดับ

อย่างที่กล่าวไปข้างต้นค่า m ทำให้เกิด θ_m และ ϕ_m ซึ่งสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของคลื่นไปตามทิศทางแกน z (ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นภายในท่อนำคลื่น) ซึ่งการเคลื่อนที่ของคลื่นแต่ละขบวนจะมีรูปแบบของสนามที่แตกต่างกัน (Field Pattern) ซึ่งจะสนับสนุนโหมดของการเคลื่อนที่ (Mode of Propagation)

$$E(y, z, t) = E_m(y)\cos(\omega t + \beta_m z + \delta) \quad (53)$$

โดยที่ $E_m(y)$ คือ Field Distribution หรือ Field Pattern แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงโหมดที่น้อยที่สุด $m = 0$ (ความเข้มมีค่าสูงสุดที่ศูนย์กลาง)



(ที่มา: Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices, S.O. Kasap, Second Edition).

รูปที่ 2.3 แสดงการกระจายของสนาม (Field Distribution)

จำนวนของโหมดจะสอดคล้องกับการสะท้อนกลับหมด ดังนั้น $\sin(\theta_m) > \sin(\theta_c)$ และสามารถคำนวณจำนวนของโหมดได้ดังนี้

$$m \leq \frac{2V - \phi}{\pi} \quad (54)$$

โดยที่ V คือ Normalized Thickness

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (55)$$

Normalized Thickness คือลักษณะเฉพาะของท่อนำคลื่นที่กำหนดค่าความยาวคลื่นมาให้ก่อนแล้ว (ขึ้นอยู่กับค่าดัชนีหักเห และรูปทรงเรขาคณิตของท่อนำคลื่น) โดยถ้า $m = 0$ จะมีค่า $V < \pi/2$

โหมดของท่อนำคลื่นโดยทั่วไป แบ่งได้หลักๆ 2 โหมดคือ Transverse Electric Mode และ Transverse Magnetic Mode

Transverse Electric Mode TE คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นในท่อนำคลื่น ในทำนองเดียวกัน Transverse Magnetic Mode TM จะมีทิศทางของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นภายในท่อนำคลื่น

2.2.2 Directional coupler and couple mode theory

กล่าวถึงท่อนำคลื่นที่มีลักษณะเฉพาะโดยการ มีท่อนำคลื่นสองท่อวางอยู่ใกล้กันมากพอที่ คลื่นจากท่อนำคลื่นท่อหนึ่งจะเคลื่อนที่ข้ามผ่านช่องว่างระหว่างท่อนำคลื่นไปที่ท่อนำคลื่นอีกท่อหนึ่ง (coupling) ในกรณีทั่วไปจะพิจารณาในกรณีอุดมคติ กล่าวคือ วัสดุที่ใช้ทำท่อนำคลื่นเป็นวัสดุ ประเภท Isotropic เป็นเชิงเส้น และไม่มีการสูญเสียในทุกกรณี

แอมพลิจูดของโหมดต่างๆในท่อนำคลื่นประเภทคู่ (Couple Waveguide) จะประพฤติตัว ตามสมการ Couple mode equation และผลเฉลยของสมการจะอธิบายการเคลื่อนที่ของคลื่น และ การเกิด Coupling

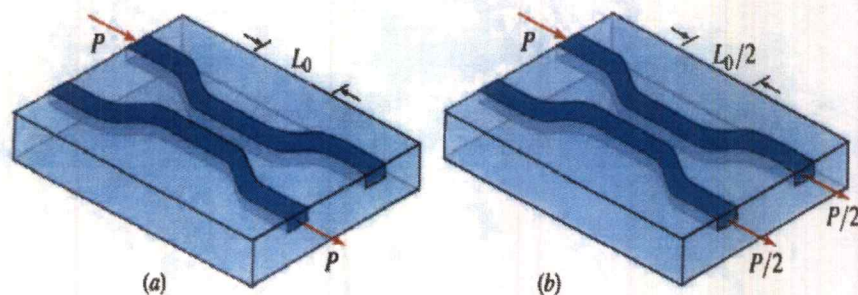
พิจารณาท่อนำคลื่นเดี่ยวในระบบท่อนำคลื่นคู่ที่วางขนานกัน แสดงดังรูปที่ 4 (Couple Waveguide)

$$\frac{da_1}{dt} = -j\beta_1 a_1 \quad (56.1)$$

$$\frac{da_2}{dt} = -j\beta_2 a_2 \quad (56.2)$$

a_1 และ a_2 คือ แอมพลิจูด

β_1 และ β_2 คือ propagation constant



(ที่มา: Fundamental of Photonics, B.E.A. Saleh, M.C. Teich, second edition)

รูปที่ 2.4 แสดง Coupler Waveguide

จากภาพจะเห็นว่าเมื่อนำท่อนำคลื่น 2 ท่อมาวางไว้ใกล้กันมากพอ (ระดับนาโนเมตรถึง ไมโครเมตร) คลื่นในท่อหนึ่งจะสามารถเกิดการเคลื่อนที่ข้ามไปที่อีกท่อหนึ่งได้ โดยความเข้มแสงของ แสงที่ออกขึ้นอยู่กับระยะห่างของท่อนำคลื่นทั้งสอง ซึ่งระยะห่างนั้นเรียกว่า Coupling Length L_C

$$\frac{da_1}{dt} = -j(\beta_1 + \kappa_{11})a_1 - j\kappa_{12}a_2 \quad (57.1)$$

$$\frac{da_2}{dt} = -j(\beta_2 + \kappa_{22})a_2 - j\kappa_{21}a_1 \quad (57.2)$$

$\kappa_{11}, \kappa_{12}, \kappa_{21}, \kappa_{22}$ คือ สัมประสิทธิ์การเข้าคู่ (Coupling Coefficient) ผลรวมกำลังภายในท่อนำคลื่น คือ

$$P(z) = |a_1|^2 + |a_2|^2 \quad (58)$$

ภายในท่อนำคลื่นต้องเกิดการอนุรักษ์พลังงาน ดังนั้น

$$\frac{dP(z)}{dz} = 0 \quad (59)$$

$$\kappa_{12} = \kappa_{21} = \kappa \quad (60)$$

โดย propagation constant และ coupling coefficient ไม่ขึ้นกับฟังก์ชันของตำแหน่ง ดังนั้นสมการที่ 26.1 และ 26.2 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$a_1 = \hat{a}_1 \exp \left[-jz \frac{\beta_1 + \kappa_{11} + \beta_2 + \kappa_{22}}{2} \right] \quad (61)$$

$$\delta = \frac{\beta_1 + \kappa_{11} - \beta_2 + \kappa_{22}}{2} \quad (62)$$

จากสมการข้างต้นสามารถเขียนสมการที่ 56.1 และ 56.2 ได้ใหม่ดังนี้

$$\frac{da_1}{dt} = -j\delta \hat{a}_1 - j\kappa \hat{a}_2 \quad (63.1)$$

$$\frac{da_2}{dt} = j\delta \hat{a}_2 - j\kappa \hat{a}_1 \quad (63.2)$$

δ คือ Phase Mismatch Factor

จากสมการที่ 63 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\frac{dA}{dz} = -j\bar{H}A \quad (64)$$

$$A = \begin{bmatrix} \hat{a}_1 \\ \hat{a}_2 \end{bmatrix} \quad (65)$$

$$H = \begin{bmatrix} \delta & \kappa \\ \kappa & -\delta \end{bmatrix} \quad (66)$$

\bar{H} คือ Hermitian Matrix

สามารถทำให้เป็นเมทริกซ์แยงมุม (Diagonalized Matrix) ได้ดังนี้

$$O^t \bar{H} O = B \quad (67)$$

$$B = \begin{bmatrix} \beta_s & 0 \\ 0 & \beta_a \end{bmatrix} \quad (68)$$

$$O = \begin{bmatrix} \cos \eta/2 & -\sin \eta/2 \\ \sin \eta/2 & \cos \eta/2 \end{bmatrix} \quad (69)$$

η สามารถหาค่าได้จาก

$$\arctan\left(\frac{\kappa}{\delta}\right) = \eta \quad (70)$$

เมทริกซ์ A สามารถสร้างเมทริกซ์เปลี่ยนรูปได้ดังนี้ (Transformation Matrix)

$$A = OW \quad (71)$$

เปรียบเทียบกับสมการที่ 59 จะได้

$$\frac{dW}{dz} = -jBW \quad (72)$$

W คือ แอมพลิจูดของเมทริกซ์สำหรับโหมดปกติ (Normal mode) ของท่อนำคลื่นแบบขนาน และมี propagation constant β_s และ β_a และแสดงเมทริกซ์การส่งผ่านได้ดังนี้

$$A(z) = T(z)A(0) \quad (73)$$

$$T = O \begin{bmatrix} \exp(-j\beta_s z) & 0 \\ 0 & \exp(-j\beta_a z) \end{bmatrix} O^{-1} \quad (74)$$

สำหรับส่วนประกอบของเมทริกซ์แต่ละส่วนนั้น สามารถแสดงอย่างชัดเจน ได้ดังต่อไปนี้

$$t_{11} = t_{22}^* = \cos(Sz) - j\cos(\eta)\sin(Sz) \quad (75)$$

$$t_{12} = t_{21} = -j\sin(\eta)\sin(Sz) \quad (76)$$

$$S = \sqrt{\delta^2 + \kappa^2}, \beta_s = \beta_0 + S, \beta_a = \beta_0 - S$$

$$\beta_0 = \frac{\beta_1 + \kappa_{11} + \beta_2 + \kappa_{22}}{2}$$

กำลังของแสงภายในท่อนำคลื่นนิยามได้ดังนี้

$$P_1(z) = \cos^2(Sz) + \cos^2(\eta)\sin^2(Sz) \quad (77)$$

$$P_2(z) = \sin^2(\eta)\sin^2(Sz) \quad (78)$$

กำลังสองแสงจะส่งผ่านได้มากที่สุด ที่ระยะ coupling Length

$$L_c = \frac{\pi}{2S} \quad (79)$$

2.2.3 วัสดุสำหรับสร้างอุปกรณ์ท่อนำคลื่น (Waveguide Material)

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางสุญญากาศ จะได้สมการความเร็วของคลื่นดังนี้

$$v = fv = c_0 \quad (80)$$

เมื่อคลื่นนั้นเป็นแสง ความเร็ว v มีค่าเท่ากับ c_0

เมื่อคลื่นแสงเคลื่อนที่เข้าตัวกลางใดๆ ความเร็วของคลื่นแสงจะลดลง ซึ่งความสัมพันธ์นั้นเป็นไปตามสมการ

$$c_0 = \frac{c_0}{n} \quad (81)$$

จากสมการที่ (80) และ (81) จะได้

$$n = \frac{c_0}{c} = \frac{f\lambda_0}{f\lambda} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad (82)$$

ดังนั้นจากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (44) สามารถสรุปได้ว่า ดัชนีหักเหของวัสดุเป็นฟังก์ชันกับค่าความยาวคลื่นของแสงที่เลือก ซึ่งรายงานพิเศษฉบับนี้เลือกค่าดัชนีหักเหที่ค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 1.55 ไมโครเมตร (เนื่องจากเป็นความยาวคลื่นของแสงที่นิยมใช้ในย่านการสื่อสาร)

2.2.3.1 ซิลิกอน (Silicon)

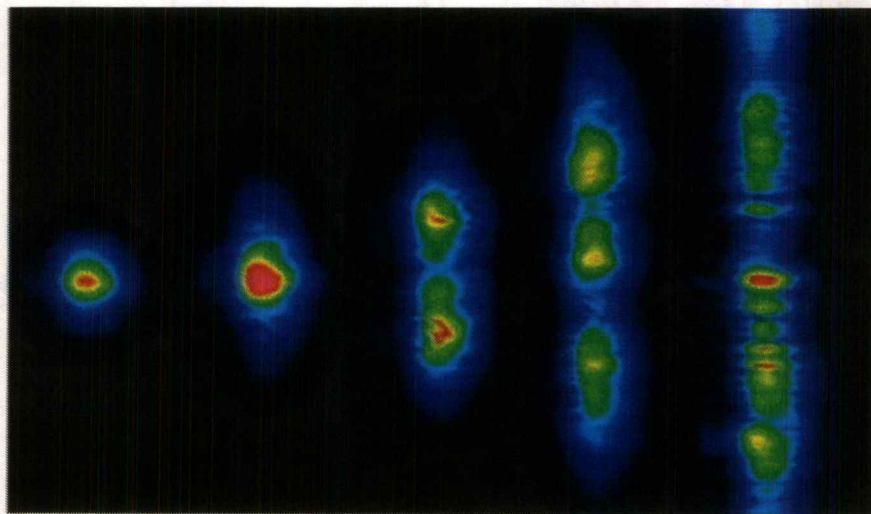
ธาตุซิลิกอนเป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางในฐานะธาตุพื้นฐานสำหรับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน นอกจากนี้ยังมีการใช้ซิลิกอนเพื่อนำไปสร้างอุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์อีกหลากหลายรูปแบบ เช่น ท่อนำคลื่น หรืออุปกรณ์มอดดูเลท (Modulator) อีกด้วย

ซิลิกอนมีการตอบสนองต่อแสงในย่านอินฟราเรดได้เป็นอย่างดี ซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 1.3 – 1.55 ไมโครเมตร โดยแสงช่วงความยาวคลื่น 1.55 ไมโครเมตร เป็นช่วงความยาวคลื่นที่ถูกนำมาใช้ในย่านของการสื่อสารเชิงแสง และยังเป็นช่วงความยาวคลื่นที่รายงานพิเศษฉบับนี้เลือกที่จะพิจารณา ซึ่งธาตุซิลิกอนที่มีความยาวคลื่น 1.55 ไมโครเมตรนี้มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 3.4778

2.2.3.2 ลิเทียมไนโอเบต (Lithium Niobate)

เป็นสารประกอบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานทางด้านโฟโตนิกส์ (Photonics) การสื่อสารเชิงแสง อุปกรณ์มอดดูเลท (Modulator) เซนเซอร์และทรานส์ดิวเซอร์ชนิดต่างๆ (Piezoelectric Transducer) แม้กระทั่งการสร้างวงจรรวมเชิงทัศนศาสตร์ (Integrated Optics) เนื่องจากลิเทียม ไนโอเบตมีคุณสมบัติที่ดียเยี่ยมสำหรับการนำไปสร้างอุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์ เพราะวลิเทียม ไนโอเบตสามารถแสดงพฤติกรรมต่าง ๆ ที่สำคัญได้หลากหลายปรากฏการณ์ ได้แก่ Acousto-Optics Effect, Electro-Optics Effect, Piezoelectric Effect, Nonlinear Optics Effect, Photorefractive Effect นอกจากนี้ลิเทียม ไนโอเบตยังมีโครงสร้างแบบโครงผลึก (Crystalline Structure)

แต่การนำลิเทียม ไนโอเบตไปใช้มีข้อควรระวังคือ ลิเทียม ไนโอเบตมักแสดงพฤติกรรม Optical Damage ในขณะที่แสงเคลื่อนที่ผ่านลิเทียม ไนโอเบต ซึ่งแสงจะมีลักษณะที่ผิดรูปไปจากเดิม ดังภาพที่ 2.5



(ที่มา: <https://www.hayadan.org.il/at-the-limits-of-the-photoelectric-effect-0205092>)

รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของลำแสงในขณะที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างโคตรผลึก และเกิดพฤติกรรม
Optical Damage อันเนื่องมาจากปรากฏการณ์ Photorefractive

จากภาพที่ 2.5 จะเห็นว่าแสงจะค่อย ๆ เปลี่ยนรูปร่างไปเมื่อเคลื่อนที่ผ่านลิเทียม ไนโอเบต จนกระทั่งเกิดการบิดเบี้ยว (distort) อย่างสมบูรณ์ โดยการเสียรูปของแสงนี้เมื่อเคลื่อนผ่านลิเทียม ไนโอเบตออกมาแล้ว เกิดจากปรากฏการณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือ Photorefractive Effect

Photorefractive Effect เป็นปรากฏการณ์ที่แสงที่มีพลังงานสูงมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) เคลื่อนที่เข้าไปภายในโคตรผลึก อะตอมจะดูดกลืนพลังงานจากแสงและจะเกิดกระบวนการ Ionization ทำให้อิเล็กตรอนอิสระ (Valence Electron) ที่ระดับพลังงานวงนอกสุด (Outermost Orbital) ของอะตอมของโคตรผลึกหลุดออกมาเคลื่อนที่ไปรอบ ๆ โคตรผลึก ด้วยวิธีการใดวิธีการหนึ่ง เช่น Diffusion, Drift หรือแม้กระทั่ง Photovoltaic เมื่อแสงเคลื่อนที่ไปสู่ส่วนอื่นของโคตรผลึก จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนอิสระหลุดออกมาจากระดับชั้นพลังงานวงนอกสุดไปเรื่อยๆ และเมื่ออิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่ไปรอบ ๆ โคตรผลึกเป็นจำนวนมาก จะเกิดสนามไฟฟ้าภายในโคตรผลึกขึ้น และสนามไฟฟ้านี้จะกระตุ้นให้เกิดปรากฏการณ์ Electro-Optics Effect (ดัชนีหักเหของวัสดุจะเปลี่ยนไปเมื่อได้รับพลังงานไฟฟ้า ในที่นี้คือสนามไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ) ทำให้อินเดกซ์หักเหของลิเทียม ไนโอเบตเปลี่ยนแปลงไป และดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลงไปนี้จะคงอยู่ชั่วระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งการที่ดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลงไปนี้จะคงอยู่ชั่วระยะเวลาหนึ่งนี้ เป็นสิ่งที่ทำให้ทราบได้ว่า ปรากฏการณ์นี้เป็นปรากฏการณ์ Photorefractive Effect ไม่ใช่

Nonlinear Optic Effect แต่ดัชนีหักเหจะไม่คงที่ตลอดโครงสร้างผลึก (Nonuniform refractive indices) (เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ)

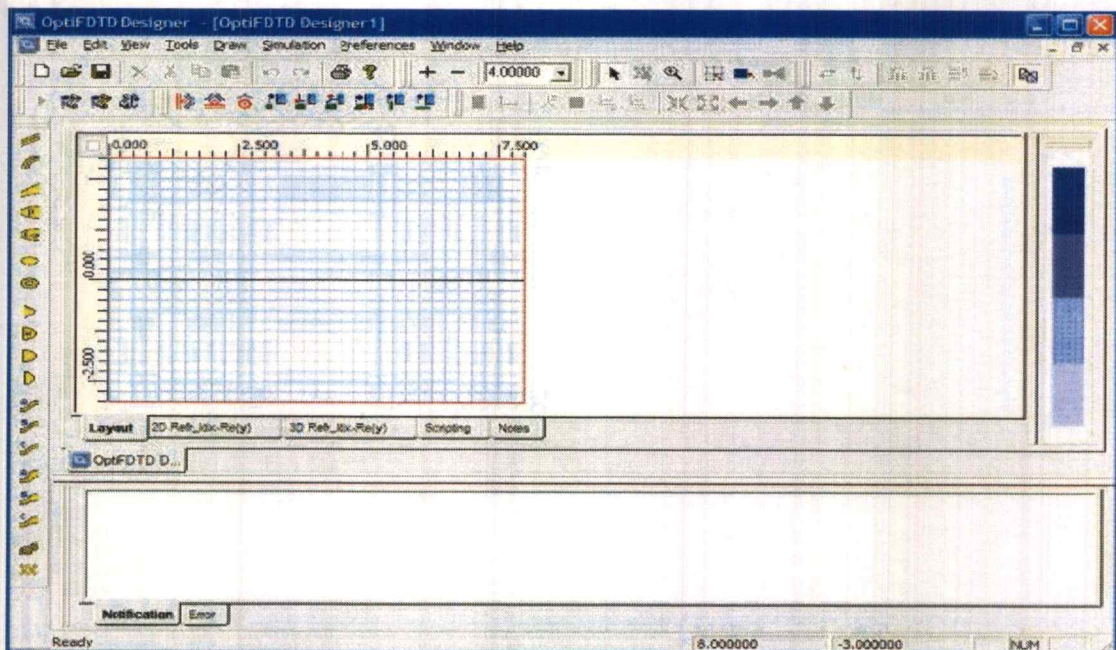
ปรากฏการณ์ Photorefractive Effect นี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการเจือธาตุแมกนีเซียม (Magnesium, Mg) เข้าไปภายในโครงสร้างผลึก เนื่องจากธาตุแมกนีเซียมนี้จะลด Optical Damage ของลิเทียม ไนโอเบต โดยจะทำการเจือ MgO ด้วยระดับความเข้มข้น 5% mol. หรือสูงกว่า ซึ่งจะลด Optical Damage ได้สูงถึงสิบเท่า หรือมากกว่า ซึ่งการเจือ MgO กับลิเทียม ไนโอเบต นั้นจะลดค่าดัชนีหักเหของลิเทียม ไนโอเบตลงมาด้วย ซึ่งในรายงานพิเศษฉบับนี้มีการเจือ MgO 5% mol. และมีดัชนีหักเหทั่วไป (ordinary Refractive Index, O-Ray) ที่ 1.55 ไมโครเมตรเท่ากับ 2.2111

บทที่ 3

ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

3.1 โปรแกรม OptiFDTD

โปรแกรมสำหรับออกแบบ สร้างแบบจำลอง และจำลองการทำงานของอุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์ ตั้งแต่อุปกรณ์ระดับพื้นฐาน ตลอดจนอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนเชิงโครงสร้าง เช่น วงจรรวมทางแสง (*Optical Integrated Circuit*) โดยตัวโปรแกรมมีหน้าต่าง *Layout* สำหรับออกแบบการอุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์ดังภาพ



(ที่มา: <https://optiwave.com/optifdtd-manuals/fdtd-layout-designer/>)

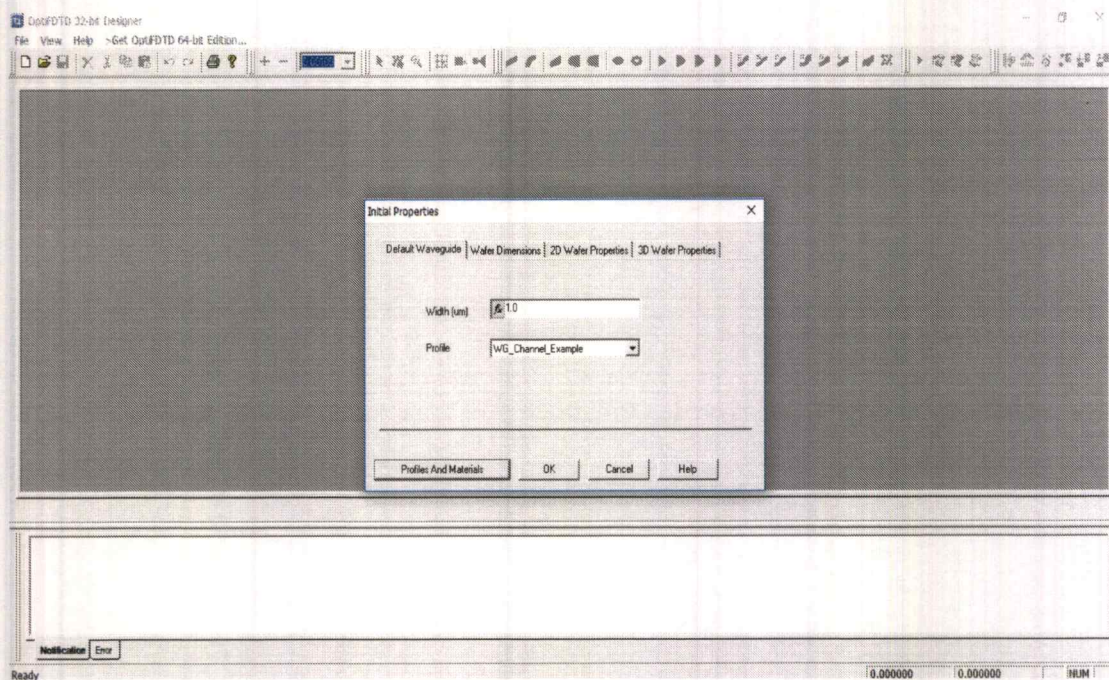
รูปที่ 3.1 โปรแกรม OptiFDTD

3.2 การตั้งค่าโปรแกรม OptiFDTD สำหรับการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 เปิดโปรแกรม OptiFDTD 32 bit

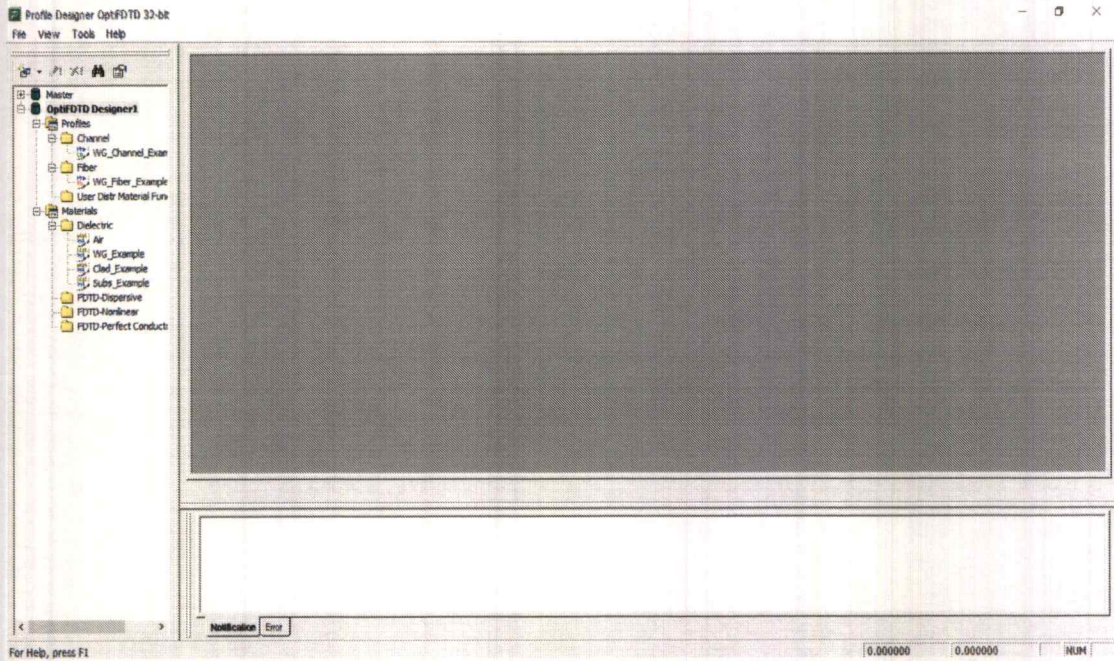
3.2.2 เลือก File จากแถบเมนูด้านบน จากนั้นเลือก New

3.2.3 โปรแกรมจะเปิดหน้าต่าง Initial Properties ขึ้นมา ดังภาพที่ 3.2



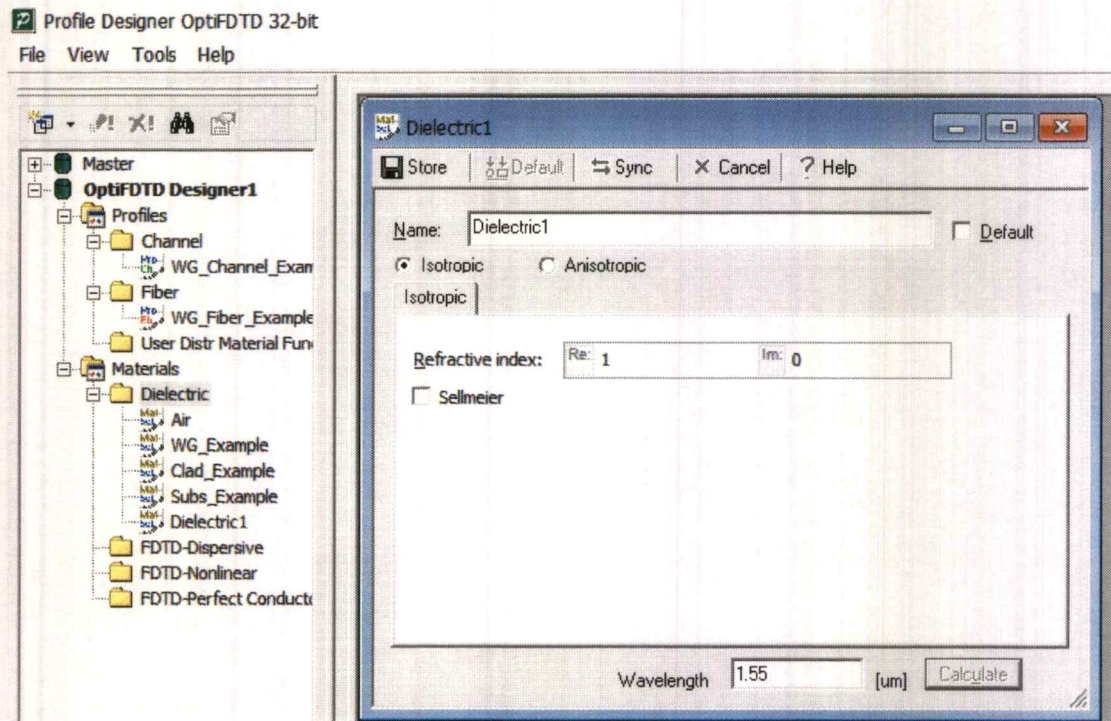
รูปที่ 3.2 แสดงหน้าต่าง Initial Properties

3.2.4 คลิกเลือก Profiles and Materials จากนั้นโปรแกรมจะเปิดหน้าต่าง Profile designer
OptiFDTD 32 Bit ขึ้นมาดังภาพที่ 3.3



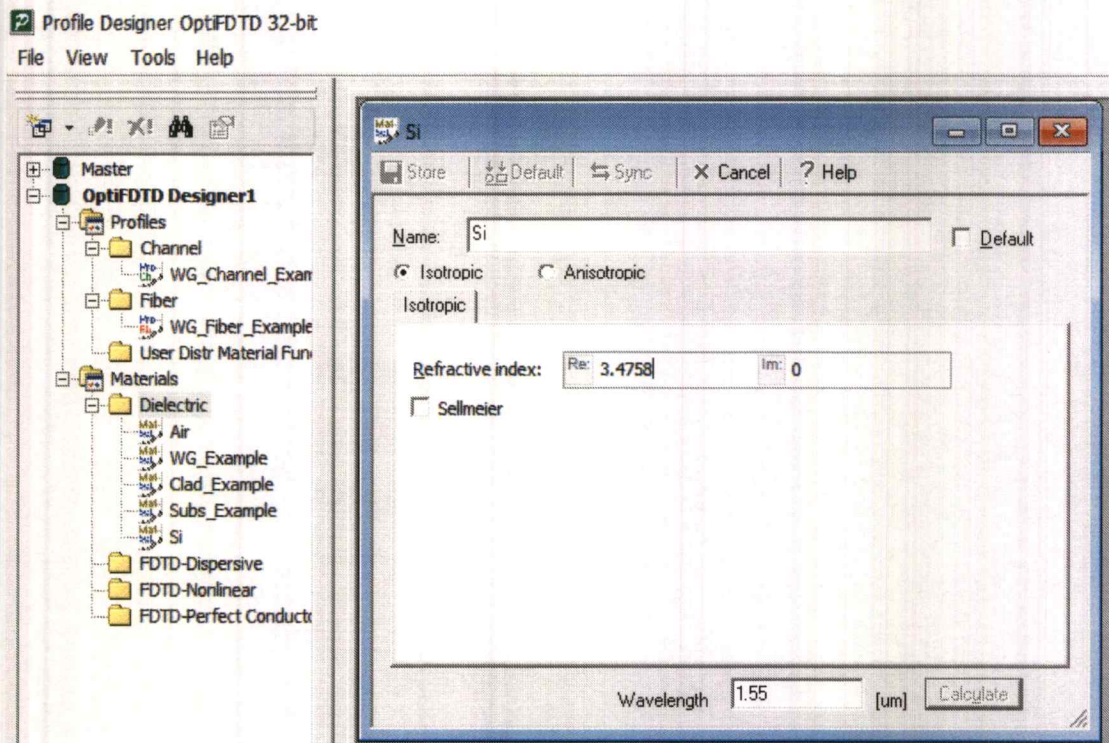
รูปที่ 3.3 แสดงหน้าต่าง Profile Designer OptiFDTD 32 Bit

3.2.5 คลิกขวาที่ Folder Dielectric จากนั้นคลิก New โปรแกรมจะเปิดหน้าต่างขึ้นมาดังภาพ
ที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงหน้าต่างซึ่งใช้สำหรับกำหนดคุณสมบัติวัสดุ

3.2.6 หัวข้อ Name: Si/LN, Refractive Index: 3.4758/2.2111, คลิก store จากนั้นจะเกิด profile ใหม่ขึ้นมาภายใต้หัวข้อ Dielectric



รูปที่ 3.5 แสดงหน้าต่างซึ่งกำหนดคุณสมบัติวัสดุแล้ว ข้อมูลจะถูกบันทึกไว้ที่ folder Dielectric ชื่อ Si

3.2.7 คลิกขวา และคลิก New ที่ Folder Channel

3.2.7.1 Profile Name: Core

3.2.7.2 2D Profile Definition – Material: Si

3.2.7.3 3D Profiles Definition

3.2.7.3.1 Layer Name: Core

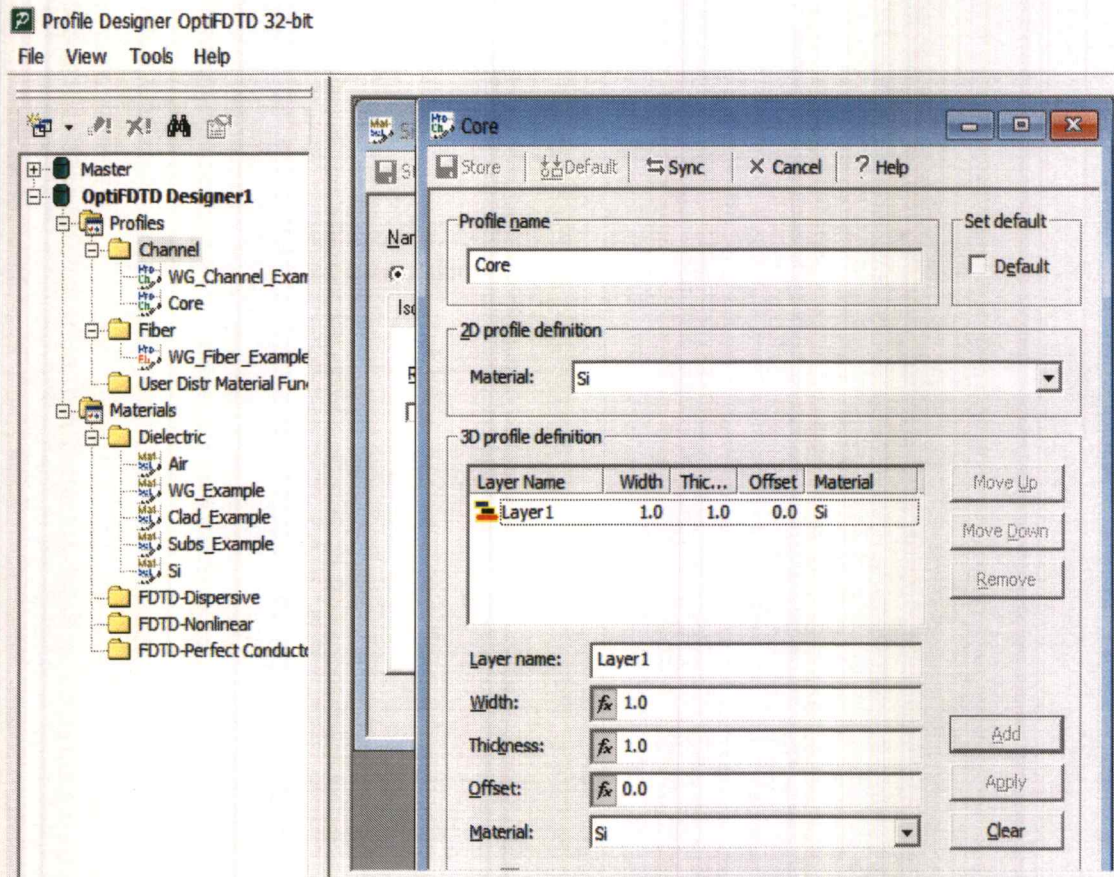
3.2.7.3.2 Width: 1.0, Thickness: 1.0, Offset: 1.0

3.2.7.3.3 Material: Si

3.2.7.3.4 Click Add

3.2.7.4 Click Store

3.2.7.5 เกิด Profiles ใหม่ชื่อ Core ภายใต้ Folder Channel



รูปที่ 3.6 แสดงหน้าต่างซึ่งกำหนดคุณสมบัติของ waveguide จากนั้นจะเกิด profile ใหม่ภายใต้ Folder Channel

3.2.8 กลับไปที่หน้าต่าง Initial Properties

3.2.8.1 Default

3.2.8.1.1 Width: 1.0

3.2.8.1.2 Profiles: Core

3.2.8.2 Wafer Dimension

3.2.8.2.1 Length: 45

3.2.8.2.2 Width: 30

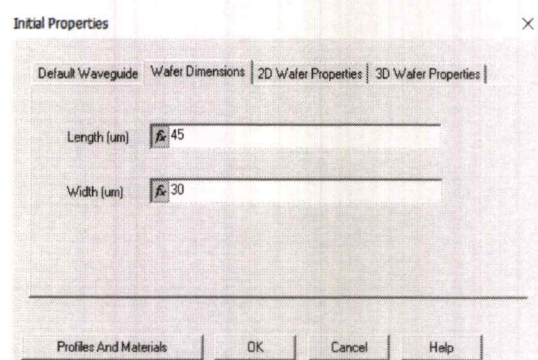
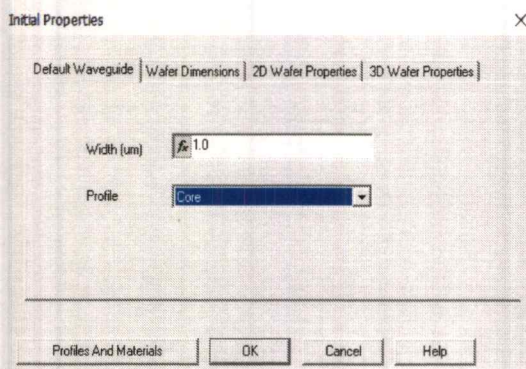
3.2.8.3 2D Wafer Properties

3.2.8.3.1 Material: Air

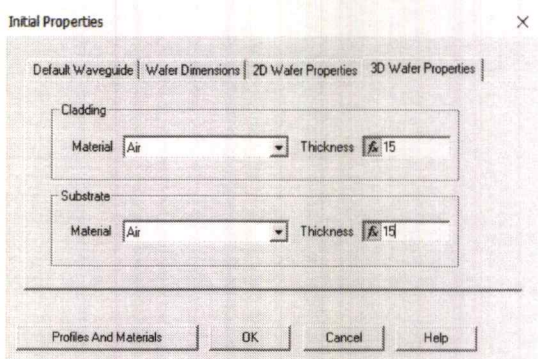
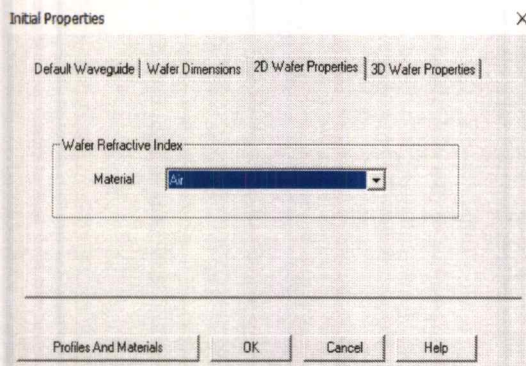
3.2.8.4 3D Wafer Properties

3.2.8.4.1 Cladding-Material: Air, Thickness: 15

3.2.8.4.2 Substrate-Material: Air, Thickness: 15

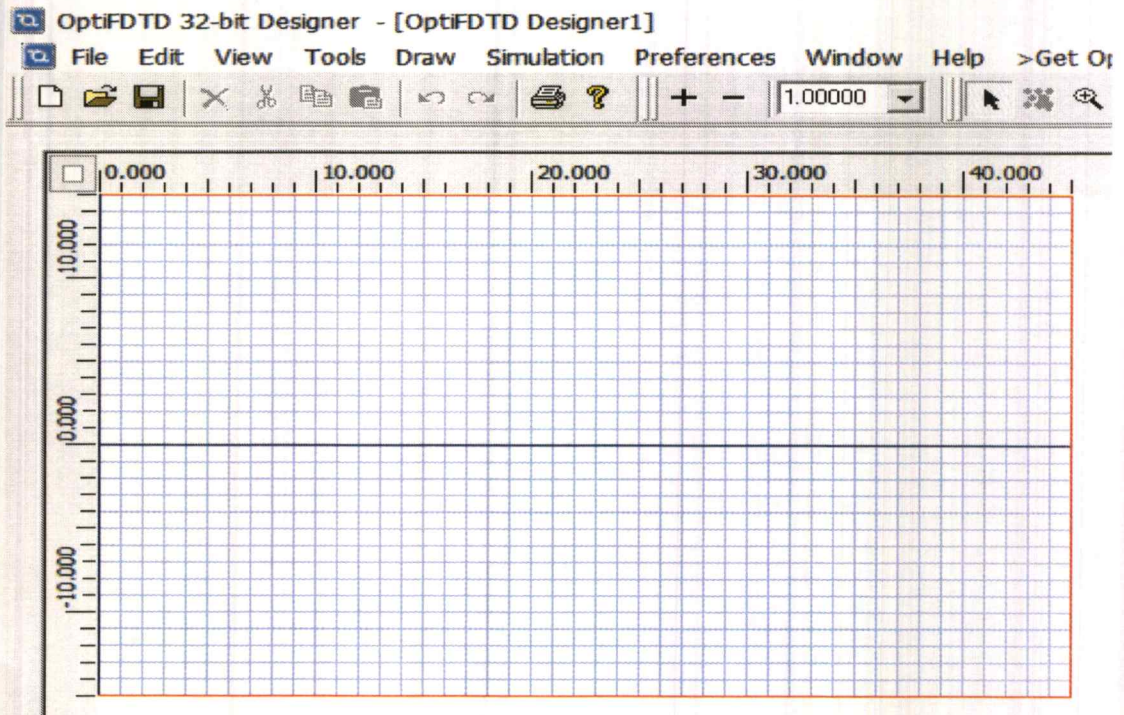


รูปที่ 3.7(a) แสดงการตั้งค่าหน้าต่าง Initial Properties – Default Waveguide รูปที่ 3.7(b) แสดงการตั้งค่าหน้าต่าง Initial Properties – Wafer Dimension



รูปที่ 3.7(c) แสดงการตั้งค่าหน้าต่าง Initial Properties – 2D Wafer Properties รูปที่ 3.7(d) แสดงการตั้งค่าหน้าต่าง Initial Properties – 3D Wafer Properties

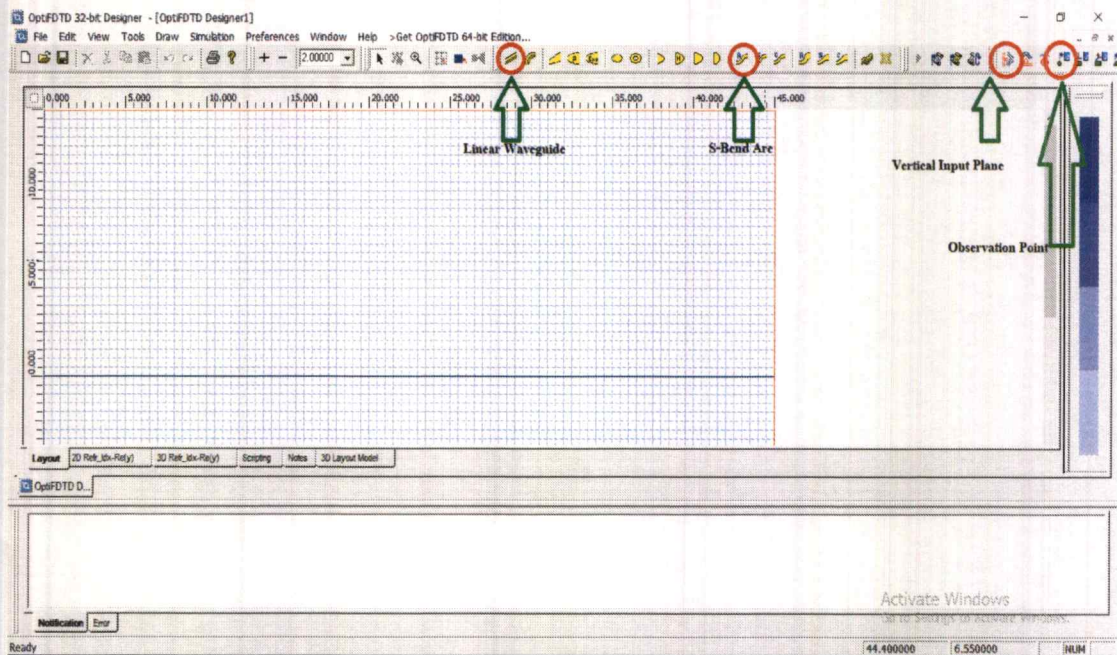
3.2.9 จากนั้นคลิก ok หน้าต่าง lay out จะปรากฏขึ้นดังภาพ



รูปที่ 3.8 แสดงหน้าต่าง OptiFDTD Designer

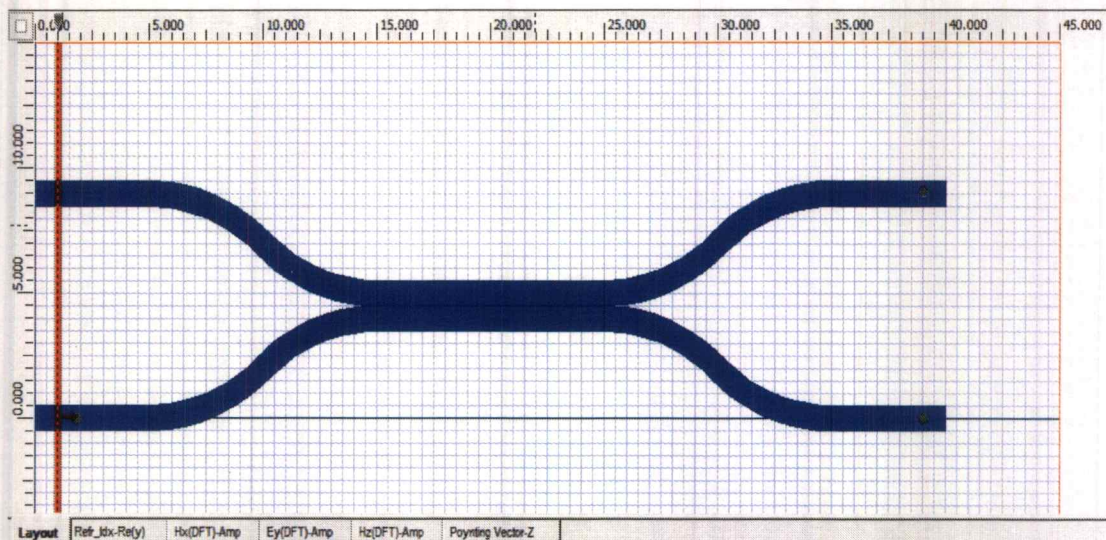
3.3 การออกแบบท่อนำคลื่นแบบ Optical Directional Coupler Waveguide

3.3.1 วาดท่อนำคลื่นดังภาพโดยการเลือกใช้ อุปกรณ์ดังต่อไปนี้ Linear Waveguide, S-Bend Arc, Vertical Input Plane, Observation Point ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพ



รูปที่ 3.9 แสดงอุปกรณ์ที่แถบเครื่องมือ สำหรับใช้ในการวาดท่อนำคลื่นแบบ Optical Directional Coupler Waveguide

3.3.2 วาดท่อนำคลื่นดังภาพ โดยความยาวของท่อนำคลื่นแต่ละส่วน แสดงให้เห็นได้ดังไม้บรรทัดด้านบนสุดของ Lay out โดยกำหนดรัศมีความโค้งของ S-Bend Arc เท่ากับ 7.25

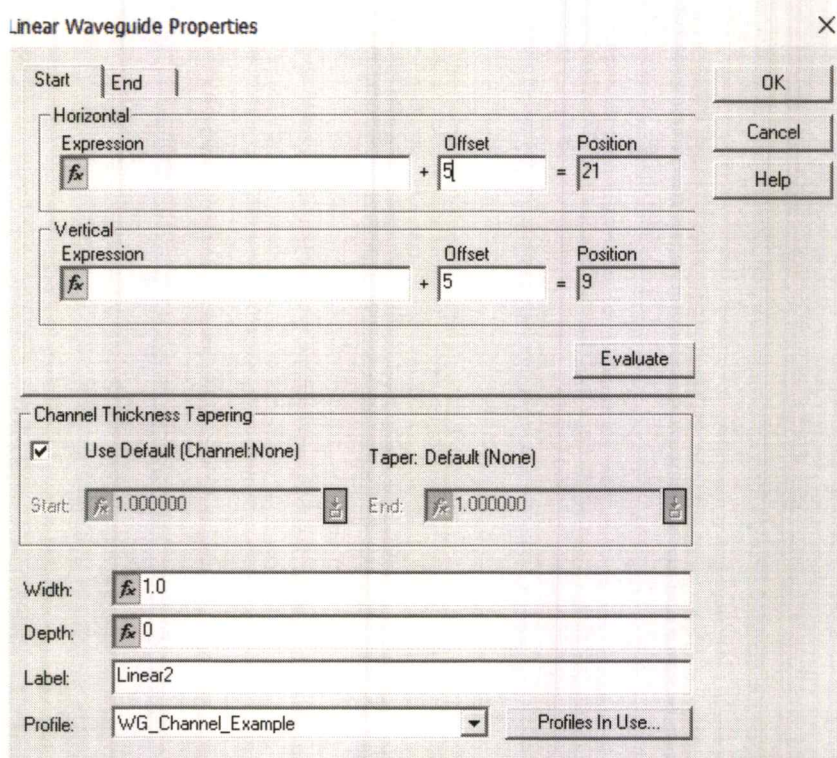


รูปที่ 3.10 แสดงการออกแบบท่อนำคลื่นที่ใช้ในโครงงานพิเศษ (Directional Coupler)

ในการวาดท่อนำคลื่นให้ได้ดังภาพนั้นจะต้องทำการกำหนดตำแหน่งของท่อนำคลื่น ซึ่งสามารถกำหนดได้โดยการคลิกขวาที่ท่อนำคลื่นส่วนที่ต้องการ จากนั้นเลือก Properties หน้าต่างแสดง Waveguide Properties จะปรากฏขึ้นมาดังภาพ จากนั้นให้ทำการปรับตำแหน่งของท่อนำคลื่นที่ต้องการ โดยการเลือกปรับค่าตัวเลขที่ช่อง Offset ของส่วน Vertical และ Horizontal ดังนี้

3.3.2.1 Vertical Offset ใช้ในการเลื่อนตำแหน่งของท่อนำคลื่นส่วนที่ต้องการตามแนวตั้ง ซึ่งแสดงได้ดังสเกลไม้บรรทัดด้านซ้ายมือ โดย Vertical Offset จะเป็นการปรับตำแหน่งที่จุดกึ่งกลางของท่อนำคลื่น เช่น กำหนด Vertical Offset = 5 จุดกึ่งกลางของท่อนำคลื่นจะอยู่ที่ตำแหน่งตามแนวตั้งเท่ากับ 5 โดยการปรับ Vertical Offset จะต้องปรับทั้ง Start และ End เนื่องจากส่วน Start จะเป็นการกำหนดตำแหน่งที่จุดกึ่งกลางทางปลายด้านซ้าย ในขณะที่ส่วน End จะเป็นตัวกำหนดจุดกึ่งกลางทางปลายด้านขวาของท่อนำคลื่น

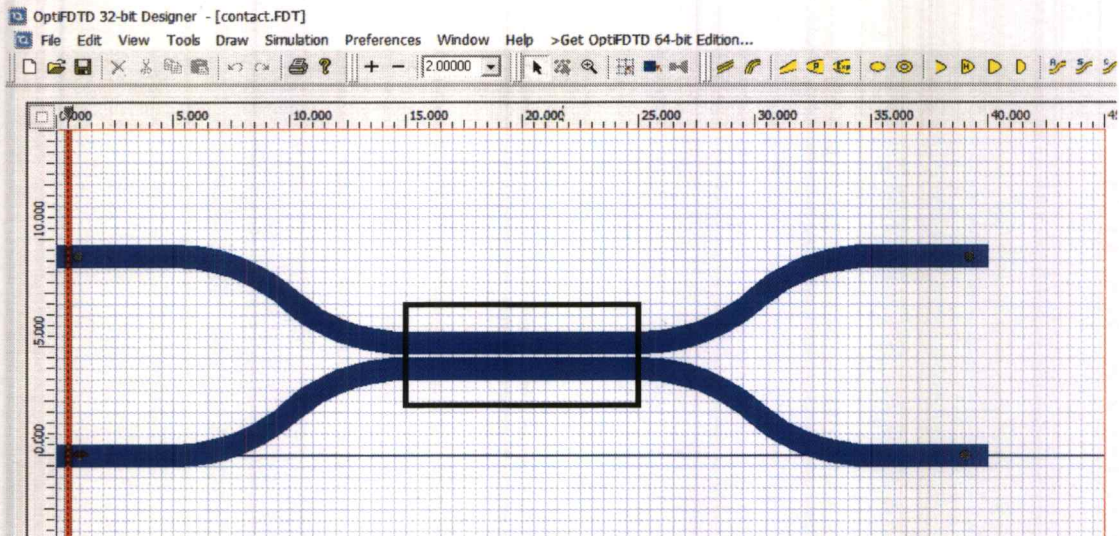
3.3.2.2 Horizontal Offset ใช้ในการเลื่อนตำแหน่งของท่อนำคลื่นส่วนที่ต้องการตามแนวนอน ซึ่งแสดงได้ดังสเกลไม้บรรทัดด้านบน โดย Horizontal Offset จะเป็นการปรับตำแหน่งที่ส่วนขอบของท่อนำคลื่น โดยการปรับ Horizontal Offset จะต้องทำการปรับทั้งส่วน Start และ End เนื่องจากทั้งสองส่วนนี้จะเป็นส่วนที่ใช้ในการกำหนดความยาวของท่อนำคลื่น เช่น ปรับ Start Horizontal Offset = 5 ขอบของท่อนำคลื่นทางด้านซ้ายจะอยู่ที่ตำแหน่งเท่ากับ 5 ตามแนวนอน ปรับ End Horizontal Offset = 10 ขอบของท่อนำคลื่นทางด้านขวาจะอยู่ที่ตำแหน่งเท่ากับ 10 ตามแนวนอน กล่าวคือ ท่อนำคลื่นจะมีความยาวเท่ากับ 5



รูปที่ 3.11 แสดงหน้าต่าง Waveguide Properties

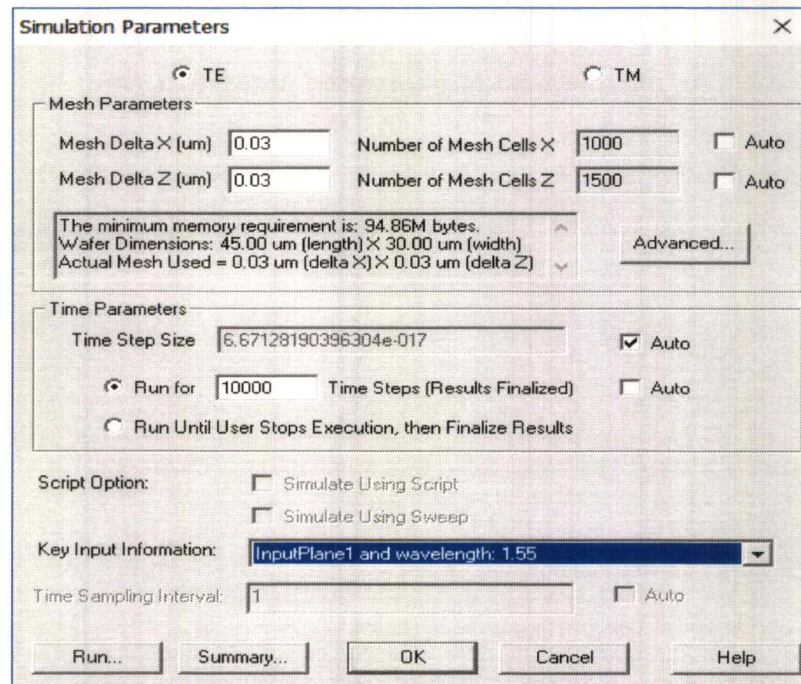
3.3.3 คลิกขวาที่ Vertical Input Plane เลือก Properties จากนั้นตั้งค่า Input Field Transverse: Gaussian, Wavelength(um): 1.55

3.3.4 เริ่มแรกให้ปรับตำแหน่งของท่อนำคลื่นส่วนบนให้วางชิดกันกับท่อนำคลื่นส่วนล่าง จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์ (Simulation) และทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของท่อนำคลื่นส่วนบนทั้งหมดให้ออกห่างจากตำแหน่งเดิมครั้งละ 10 นาโนเมตร จนกระทั่งท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 200 นาโนเมตร



รูปที่ 3.12 บริเวณรอบสี่เหลี่ยมสีดำแสดงบริเวณที่เกิดปรากฏการณ์เข้าคู่ (Coupling effect) และระยะห่างระหว่างท่อนำคลื่นทั้งสอง คือ ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องทำการเปลี่ยนแปลง

3.3.5 ขั้นตอนในการจำลองสถานการณ์สามารถทำได้โดยคลิกที่แถบเมนูเลือก Simulation จากนั้นเลือก 2D 32Bit Simulation Parameters จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมาดังภาพ จากนั้นคลิกเลือก ลูกศรถูกที่ช่อง Auto ในส่วนของ Mesh Parameters ออก เพื่อจะได้สามารถตั้งค่า Mesh ได้ จากนั้น ตั้งค่า Mesh Delta X (um) และ Mesh Delta Z (um) เท่ากับ 0.03 จากนั้นที่ช่อง Time Parameter คลิกเลือกลูกศรถูกที่ช่อง auto ในช่อง Run For ออก เพื่อทำการกำหนดค่า Simulation Time Step โดยกำหนดค่าเท่ากับ 10,000



รูปที่ 3.13 แสดงการตั้งค่าหน้าต่าง Simulation

3.3.6 สรุปผลการทดลอง

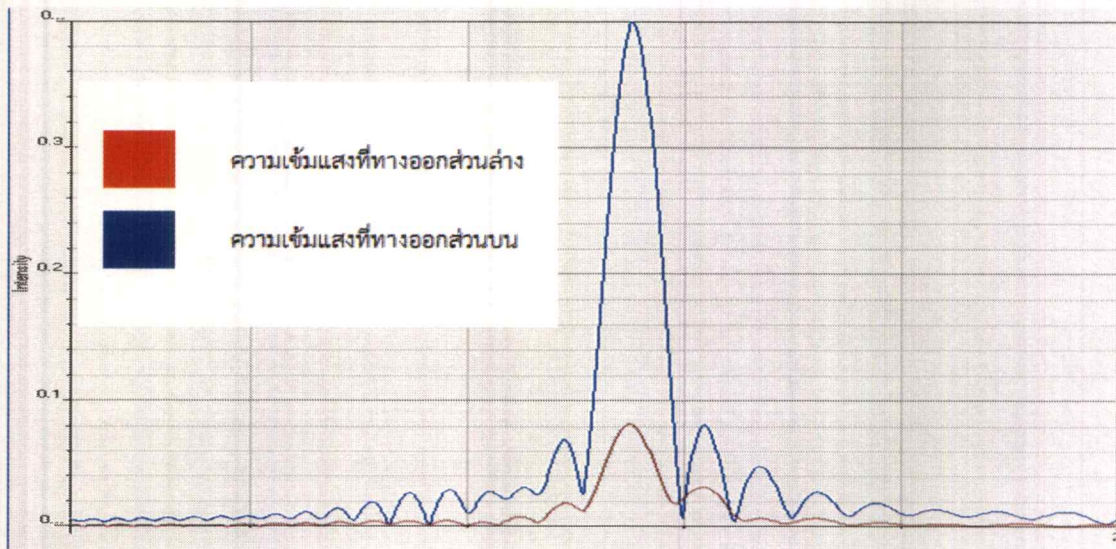
บทที่ 4

สรุปผลการวิจัยและการอภิปรายผล

เนื่องจากการจำลองการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นนั้น ลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่น และการเกิดการเข้าคู่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Coupling) เกี่ยวข้องกับดัชนีหักเหของวัสดุที่นำมาใช้สร้างเป็นท่อนำคลื่น ดังนั้นผลการทดลองจะแบ่งออกเป็นสองส่วน ตามแต่ชนิดของวัสดุที่ใช้ในการสร้างท่อนำคลื่น นอกจากนี้ยังได้ทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างท่อนำคลื่น เพื่อสังเกตการเกิดปรากฏการณ์เข้าคู่ (Coupling effect) ระหว่างท่อนำคลื่นทั้งสอง

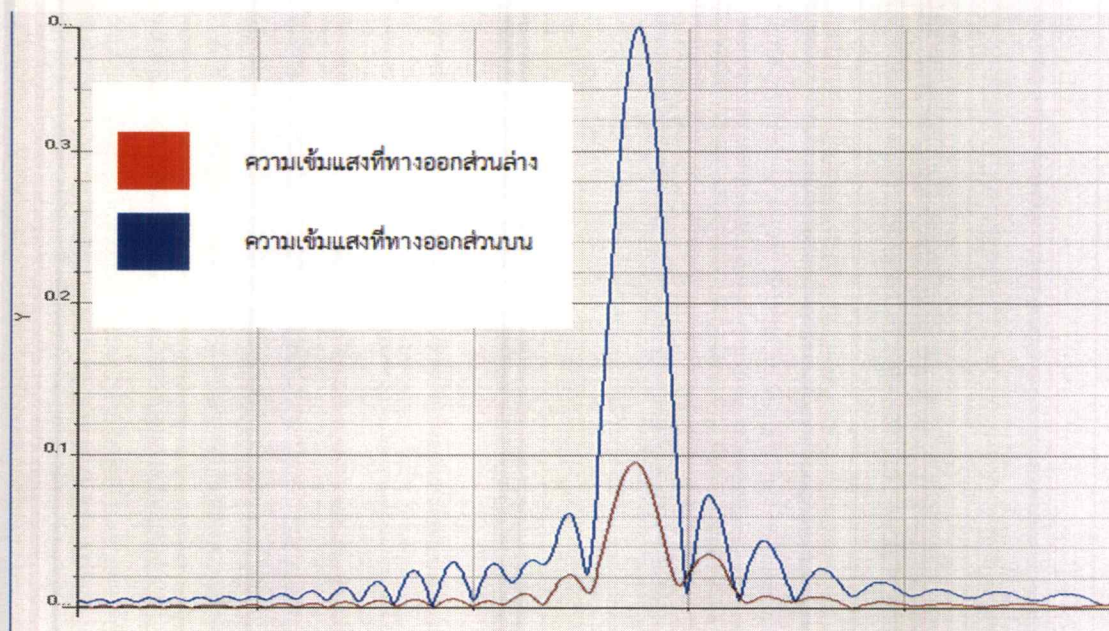
4.1 ท่อนำคลื่นจากวัสดุซิลิกอน ($n = 3.4778$, wavelength = 1.55 μm .)

4.1.1 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางชิดติดกัน (0 นาโนเมตร)



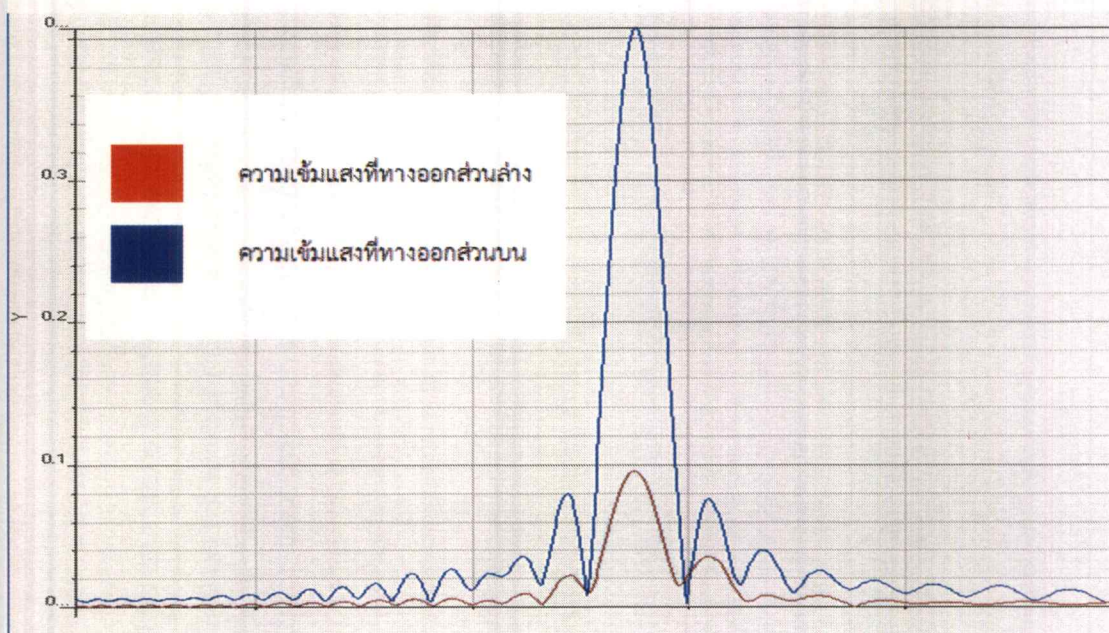
รูปที่ 4.1 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 0 nm

4.1.2 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 10 นาโนเมตร



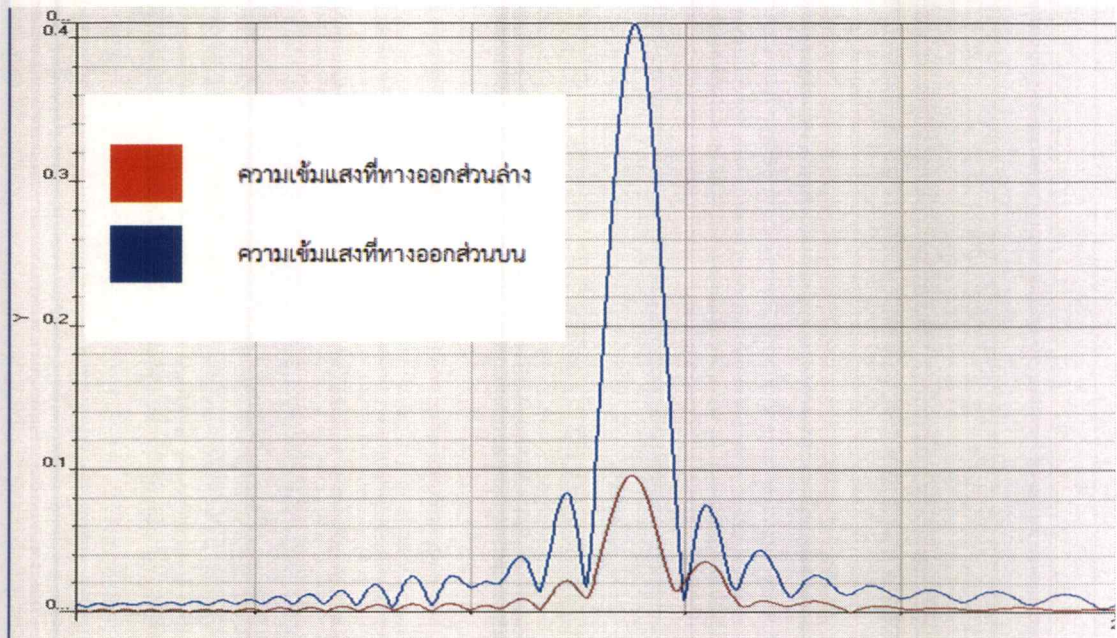
รูปที่ 4.2 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 10 nm

4.1.3 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 20 นาโนเมตร



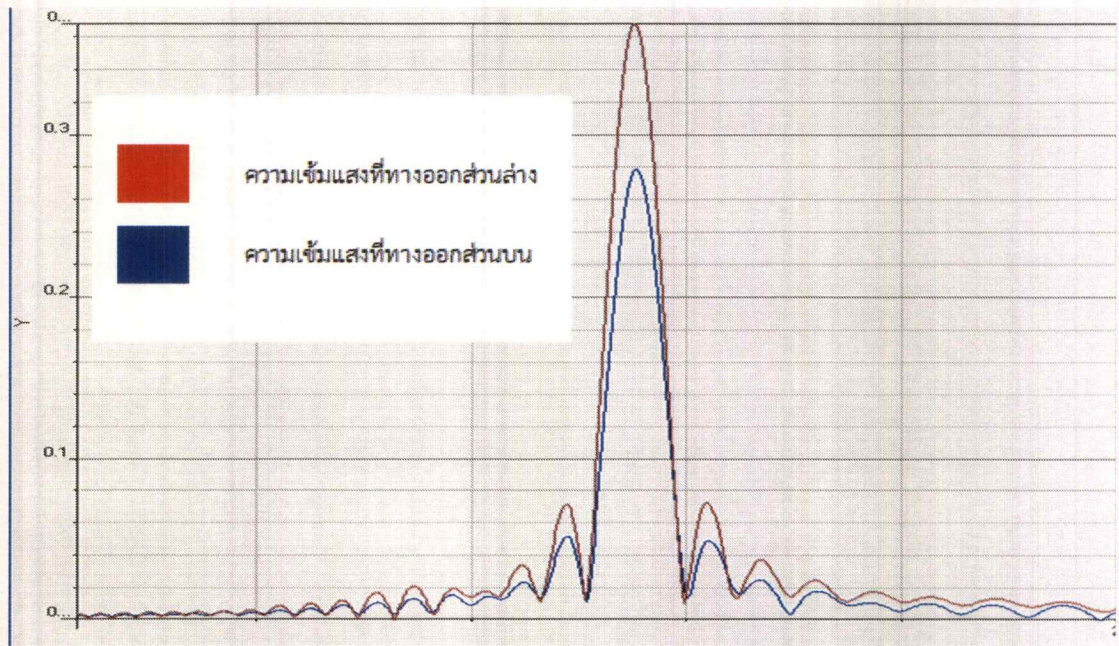
รูปที่ 4.3 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 20 nm

4.1.4 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 30 นาโนเมตร



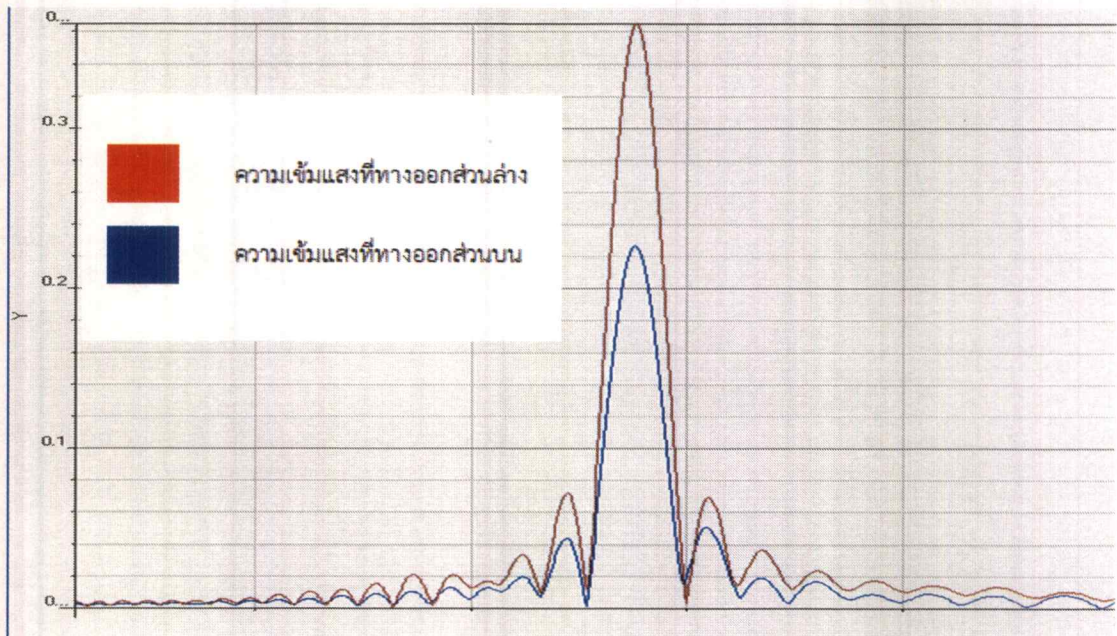
รูปที่ 4.4 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 30 nm

4.1.5 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 40 นาโนเมตร



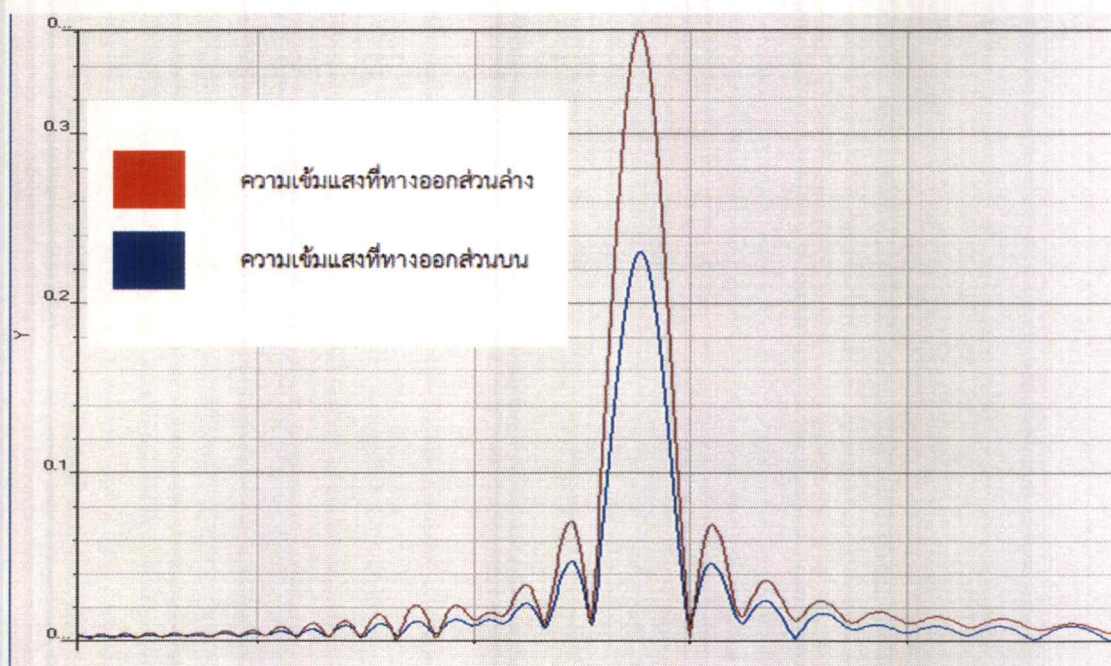
รูปที่ 4.5 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 40 nm

4.1.6 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 50 นาโนเมตร



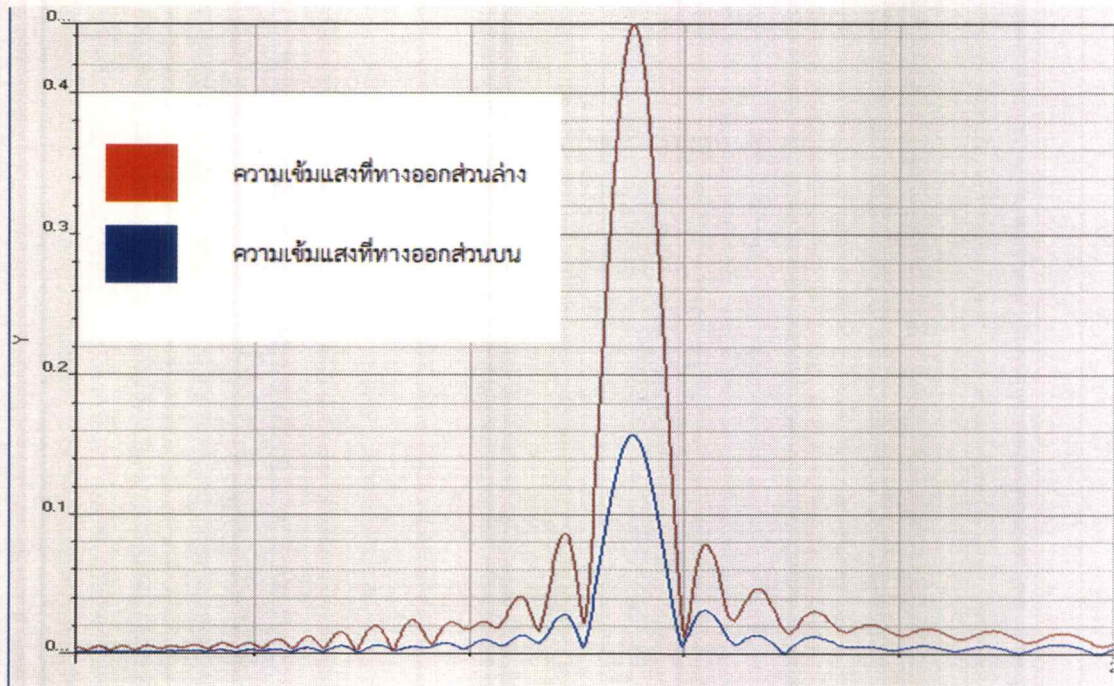
รูปที่ 4.6 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 50 nm

4.1.7 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 60 นาโนเมตร



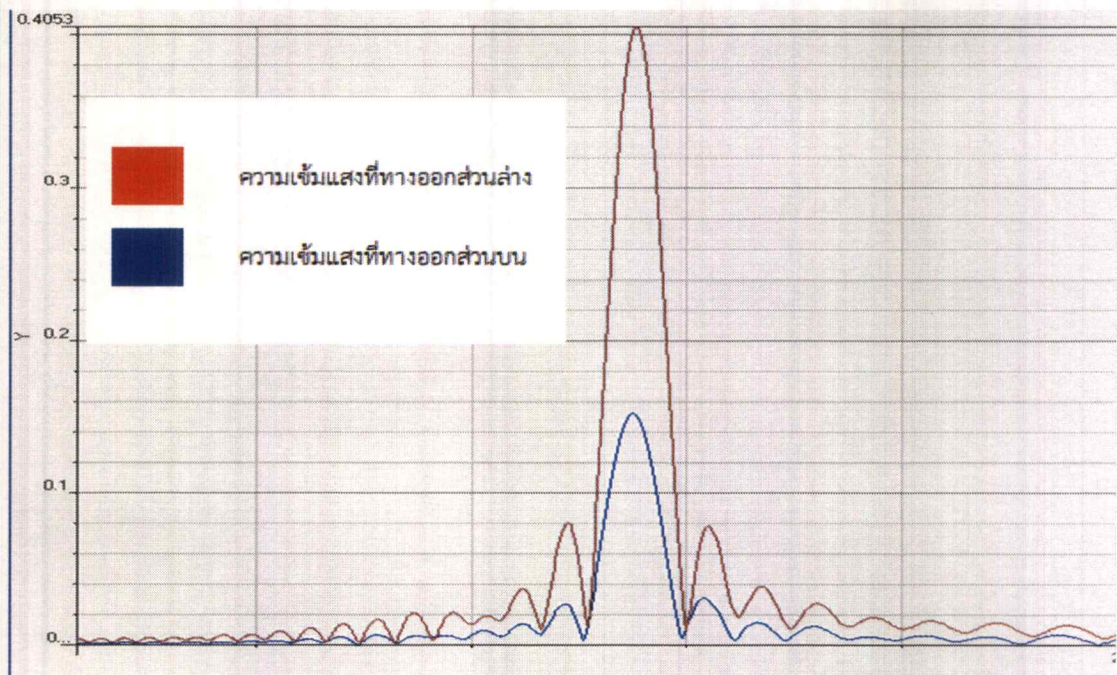
รูปที่ 4.7 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 60 nm

4.1.8 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 70 นาโนเมตร



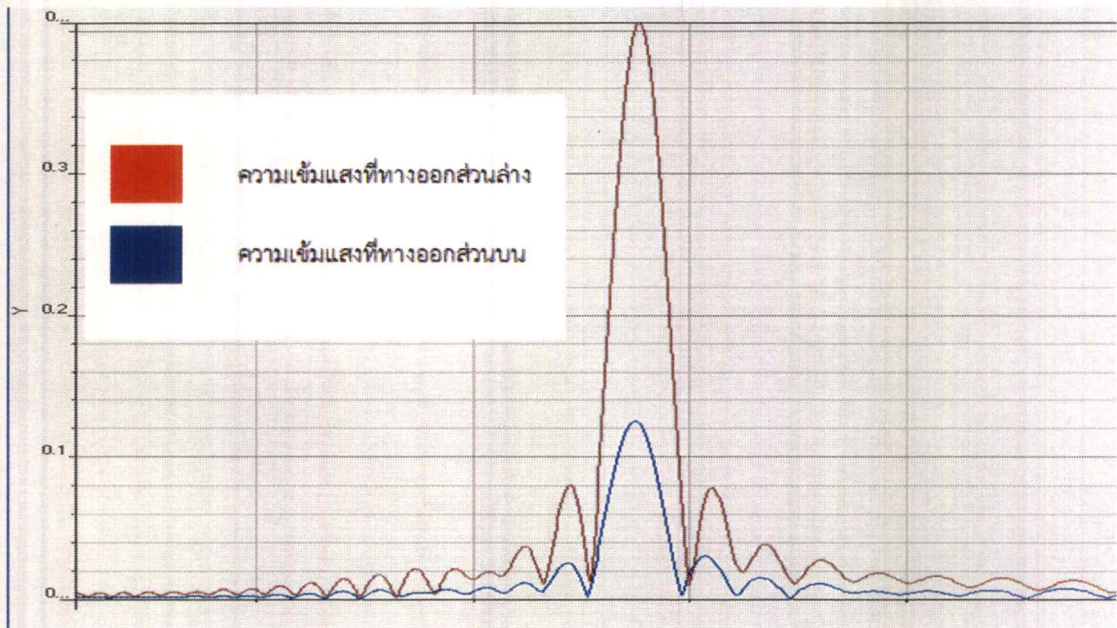
รูปที่ 4.8 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 70 nm

4.1.9 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 80 นาโนเมตร



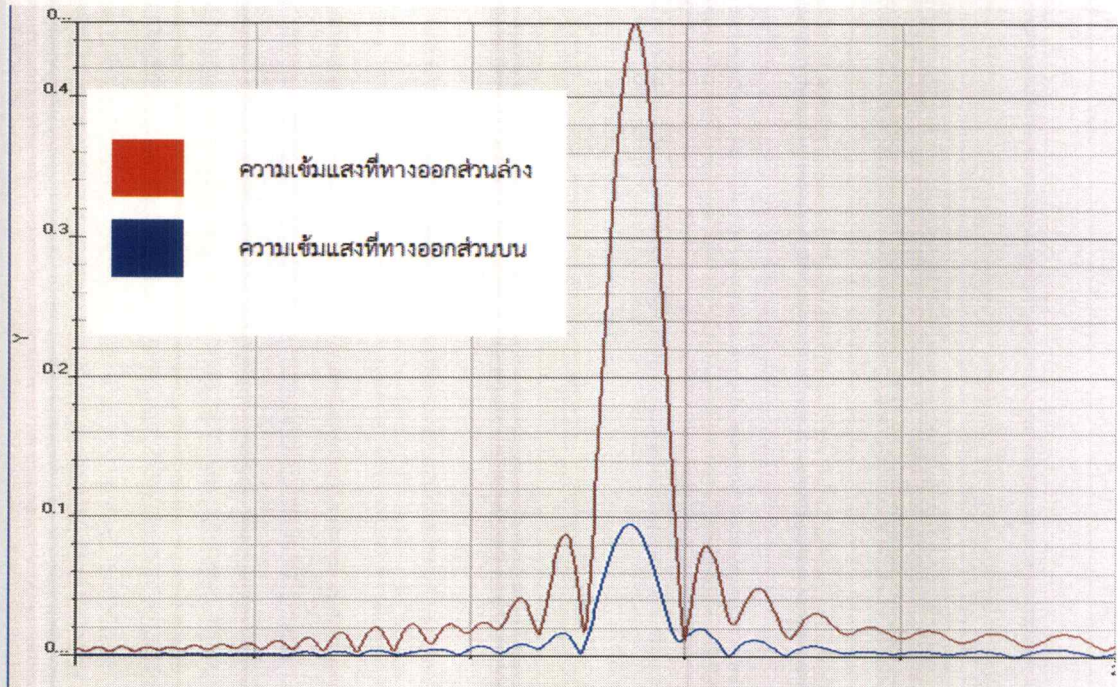
รูปที่ 4.9 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 80 nm

4.1.10 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 90 นาโนเมตร



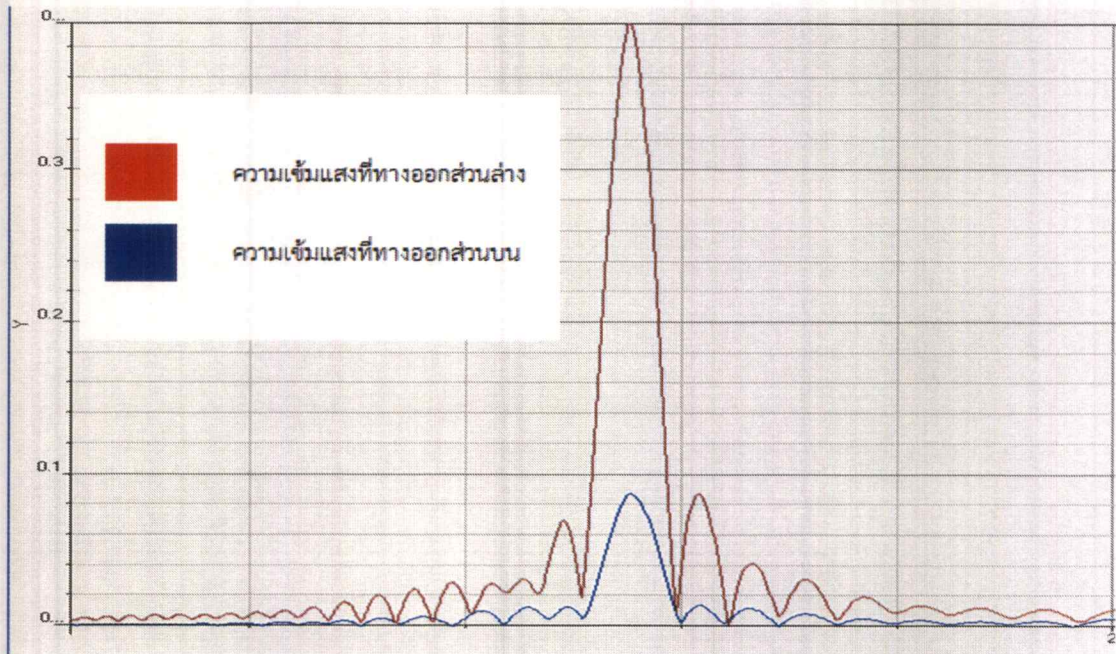
รูปที่ 4.10 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 90 nm

4.1.11 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 100 นาโนเมตร



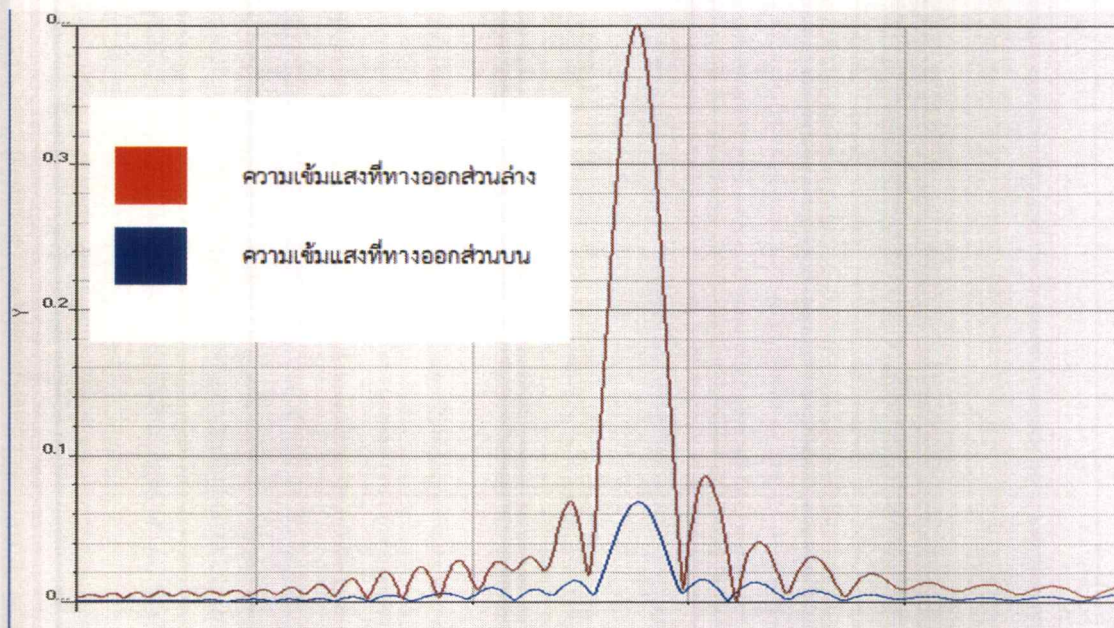
รูปที่ 4.11 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 100 nm

4.1.12 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 110 นาโนเมตร



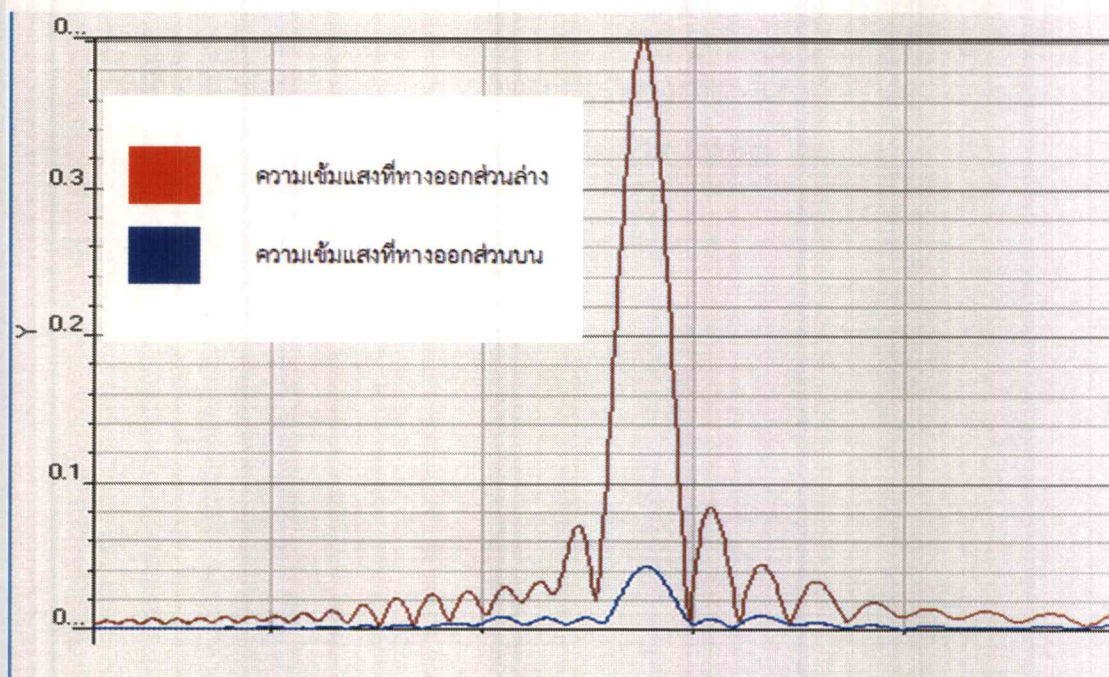
รูปที่ 4.12 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 110 nm

4.1.13 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 120 นาโนเมตร



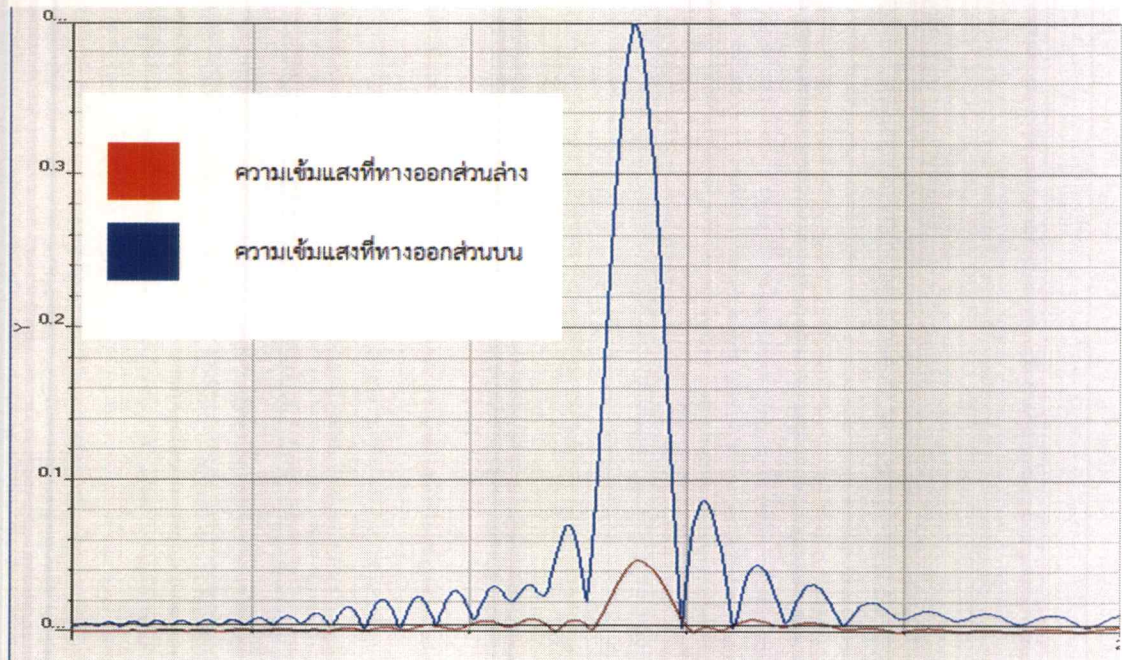
รูปที่ 4.13 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 120 nm

4.1.14 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 130 นาโนเมตร



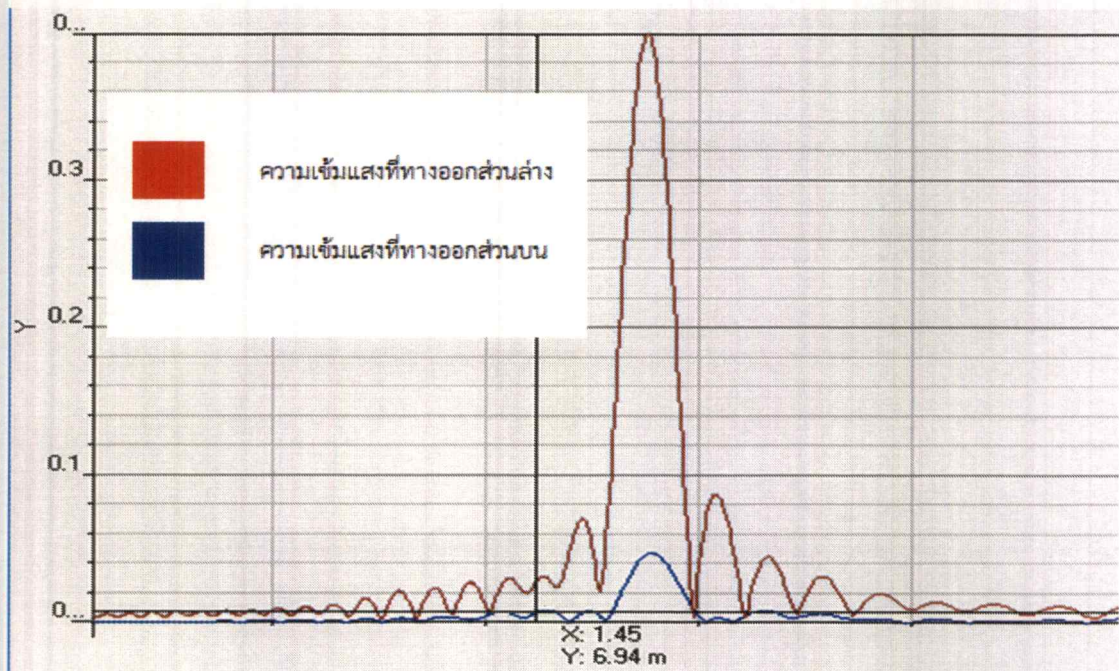
รูปที่ 4.14 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 130 nm

4.1.15 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 140 นาโนเมตร



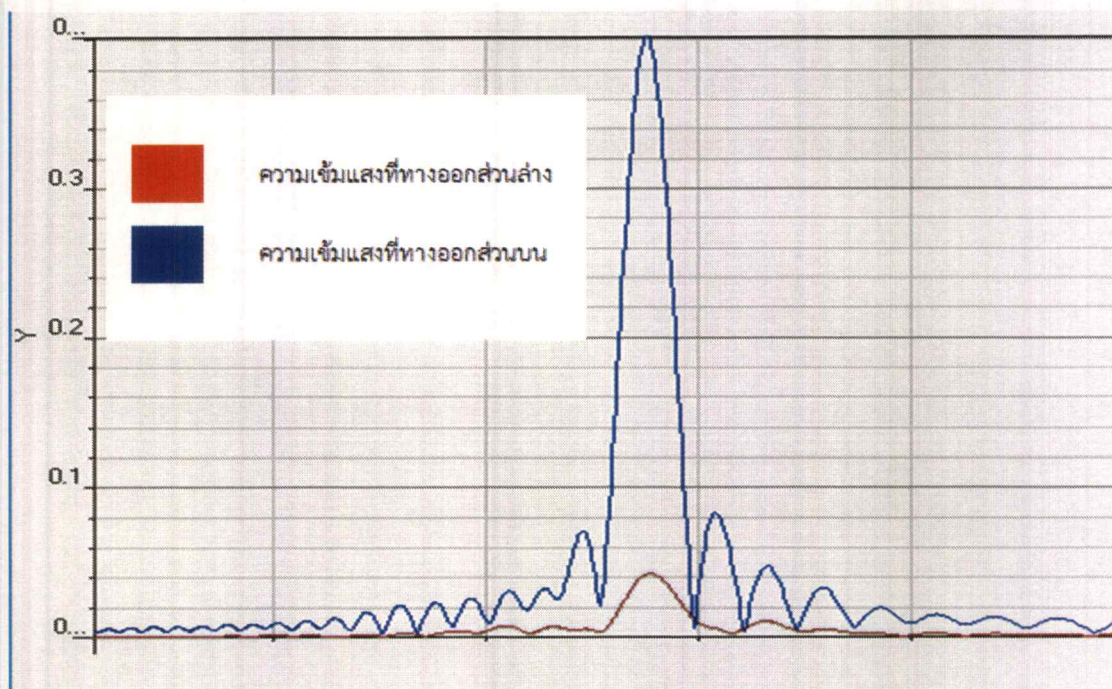
รูปที่ 4.15 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 140 nm

4.1.16 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 150 นาโนเมตร



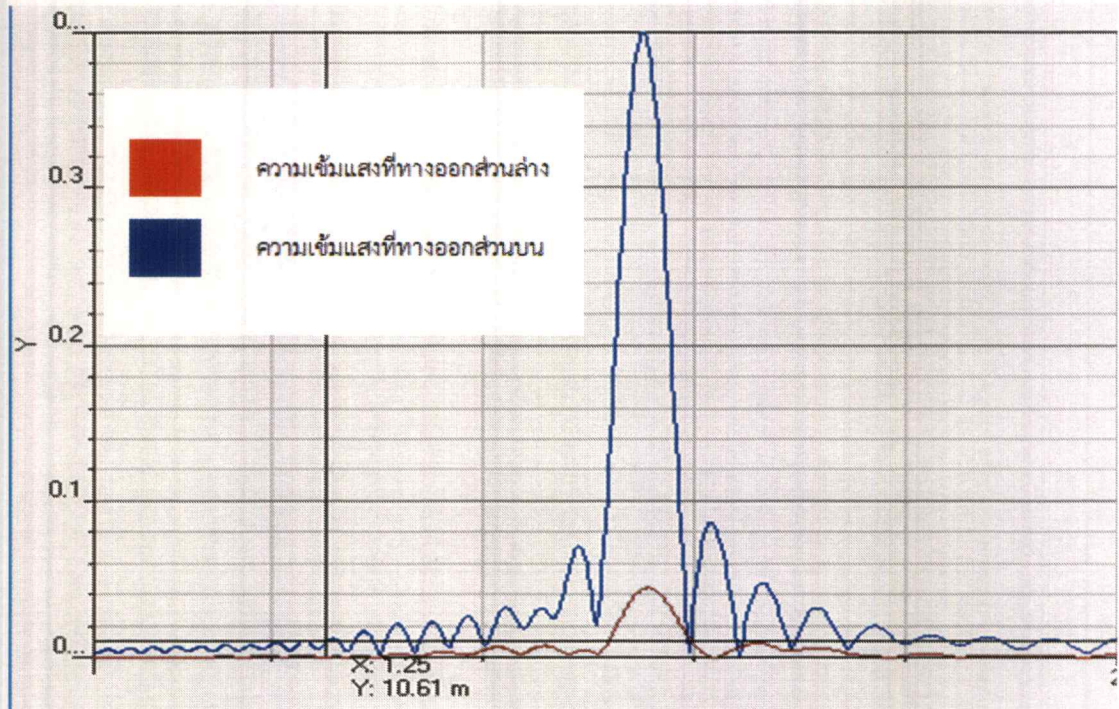
รูปที่ 4.16 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 150 nm

4.1.17 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 160 นาโนเมตร



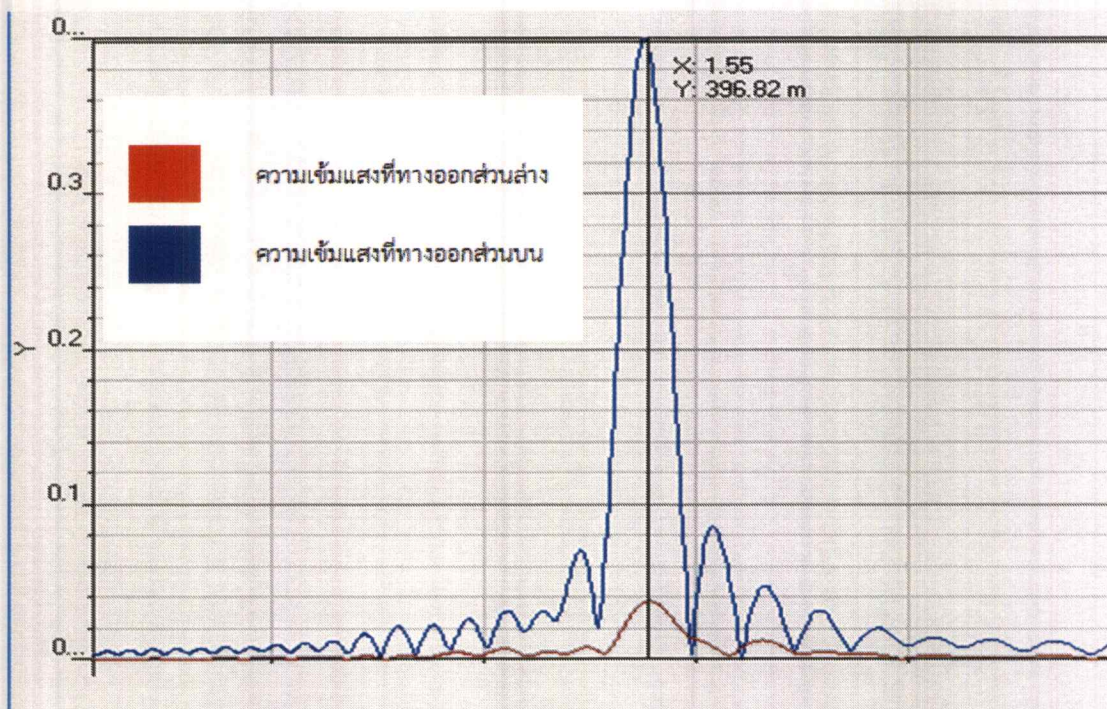
รูปที่ 4.17 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 160 nm

4.1.18 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 170 นาโนเมตร



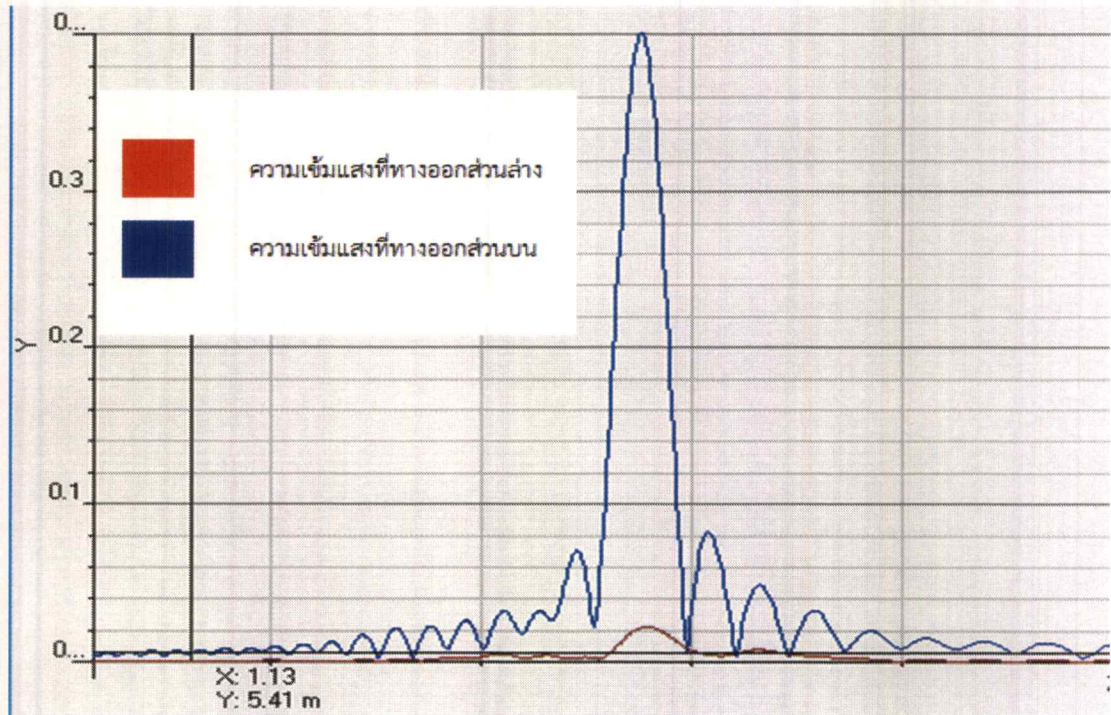
รูปที่ 4.18 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 170 nm

4.1.19 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 180 นาโนเมตร



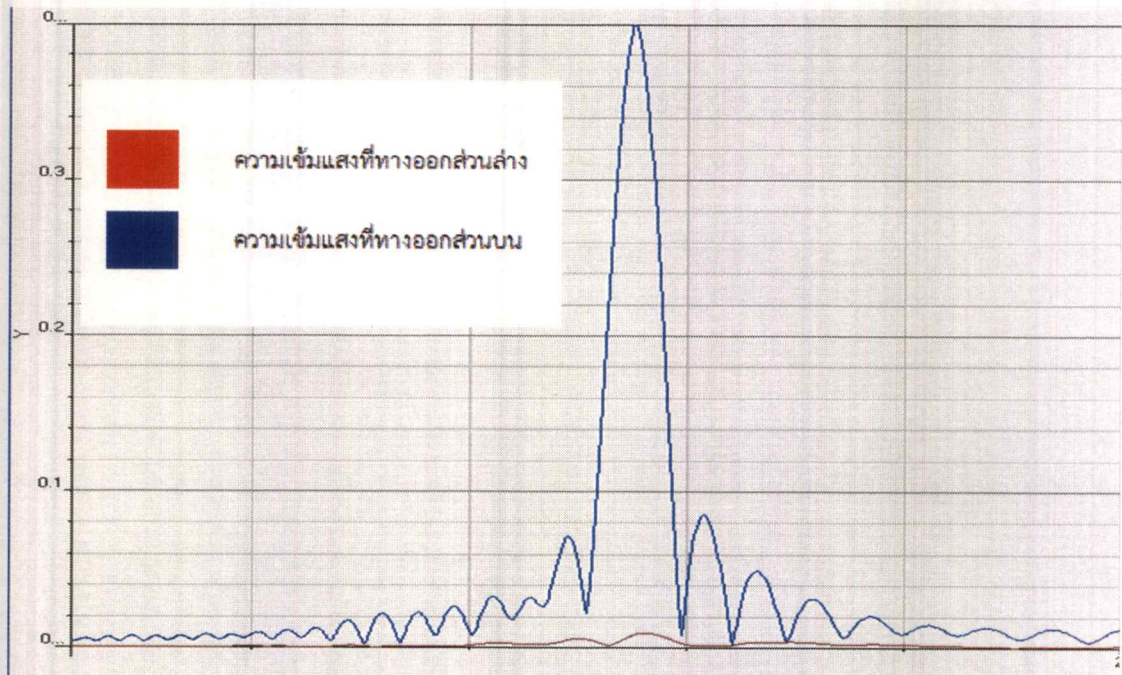
รูปที่ 4.19 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 180 nm

4.1.20 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 190 นาโนเมตร



รูปที่ 4.20 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 18x90 nm

4.1.21 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 200 นาโนเมตร

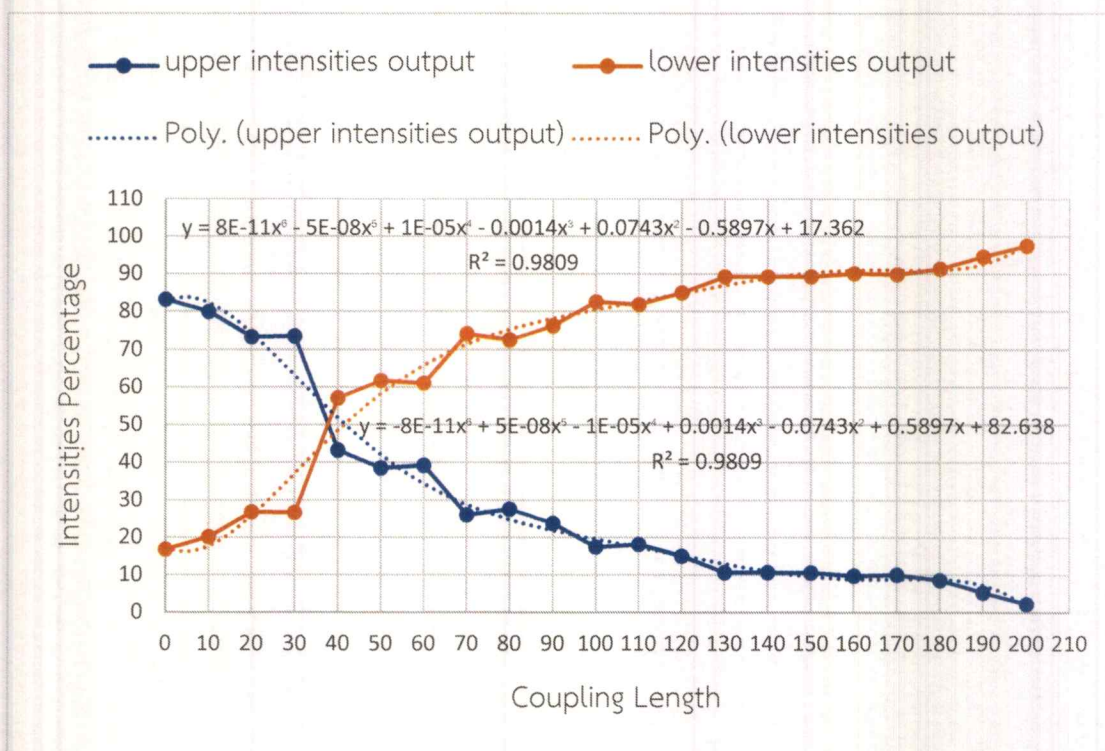


รูปที่ 4.21 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 200 nm

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการจำลองสถานการณ์ (Simulation) ของท่อนำคลื่นที่สร้างจากวัสดุประเภท ซิลิกอน

ระยะห่างระหว่าง ท่อนำคลื่น	ความเข้มแสงที่ ทางออกส่วนบน	ความเข้มแสงที่ ทางออกส่วนล่าง	ความเข้มแสงที่ ทางออกส่วนบน โดยร้อยละ	ความเข้มแสงที่ ทางออก ส่วนล่างโดย ร้อยละ
0	0.400	0.080	83.33	16.67
10	0.380	0.095	80	20
20	0.407	0.148	73.33	26.67
30	0.410	0.148	73.48	26.52
40	0.278	0.368	43.03	56.97
50	0.227	0.365	38.34	61.66
60	0.231	0.361	39.02	60.98
70	0.157	0.449	25.91	74.09
80	0.153	0.405	27.42	72.58
90	0.126	0.406	23.68	76.32
100	0.095	0.453	17.34	82.66
110	0.087	0.395	18.05	81.95
120	0.069	0.395	14.87	85.13
130	0.047	0.398	10.56	89.44
140	0.047	0.398	10.56	89.44
150	0.047	0.398	10.51	89.49
160	0.043	0.401	9.68	90.32
170	0.044	0.399	9.93	90.07
180	0.037	0.399	8.49	91.51
190	0.022	0.400	5.21	94.79
200	0.009	0.399	2.21	97.79

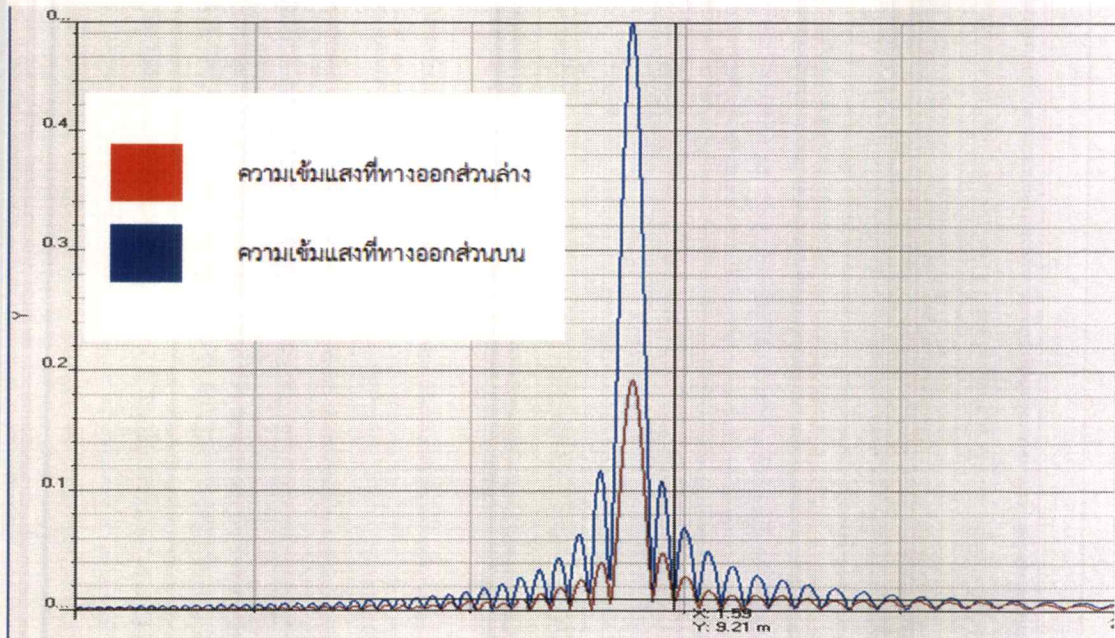
หมายเหตุ ร้อยละของความเข้มแสงที่ทางออกทั้งสองทางรวมกันได้ 100 (100%) ดังนั้นแม้ค่าความเข้มแสงรวมของทางออกทั้งสองทางจะมีค่าไม่เท่ากัน แต่แนวโน้มของความเข้มแสงโดยร้อยละที่ทางออกทั้งสองทางมีค่าลดลงเป็นลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีโหมดเข้าคู่ (couple mode theory) ว่า ถ้าหากท่อนำคลื่นทั้งสองท่อนาวางใกล้กันมากพอจะเกิดการเข้าคู่ (coupling) ของแสง



รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Coupling Length และ Intensity Percentages ของท่อนำคลื่นที่สร้างจากวัสดุประเภทซิลิกอน

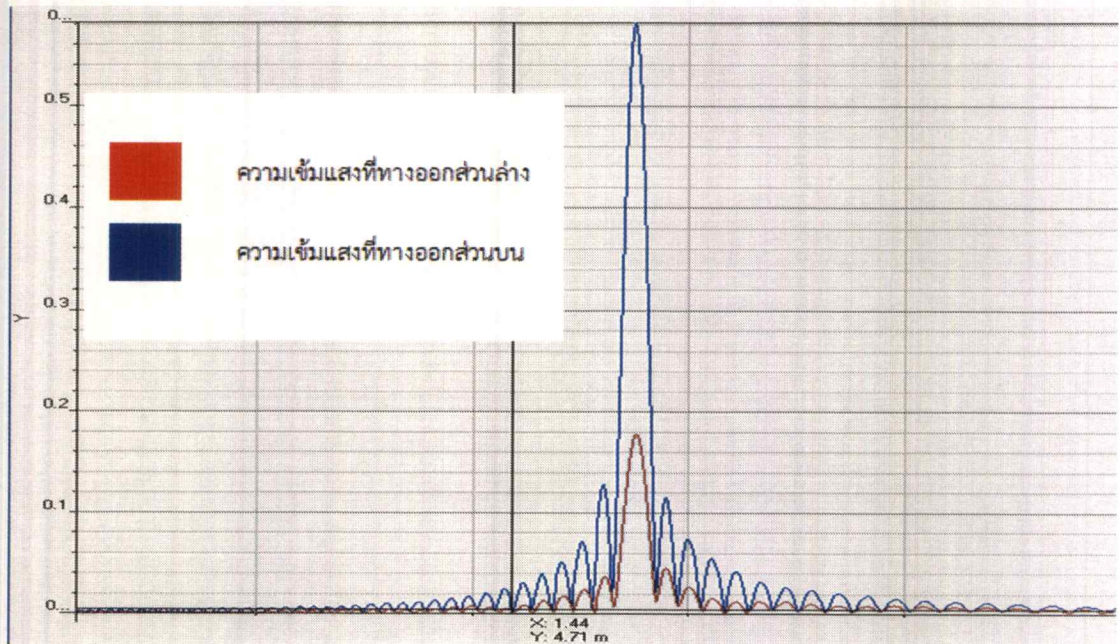
4.2 ท่อนำคลื่นจากวัสดุทีเอ็มไอโอเบต ($n = 2.2111$, wavelength = 1.55 μm .)

4.2.1 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางชิดติดกัน (0 นาโนเมตร)



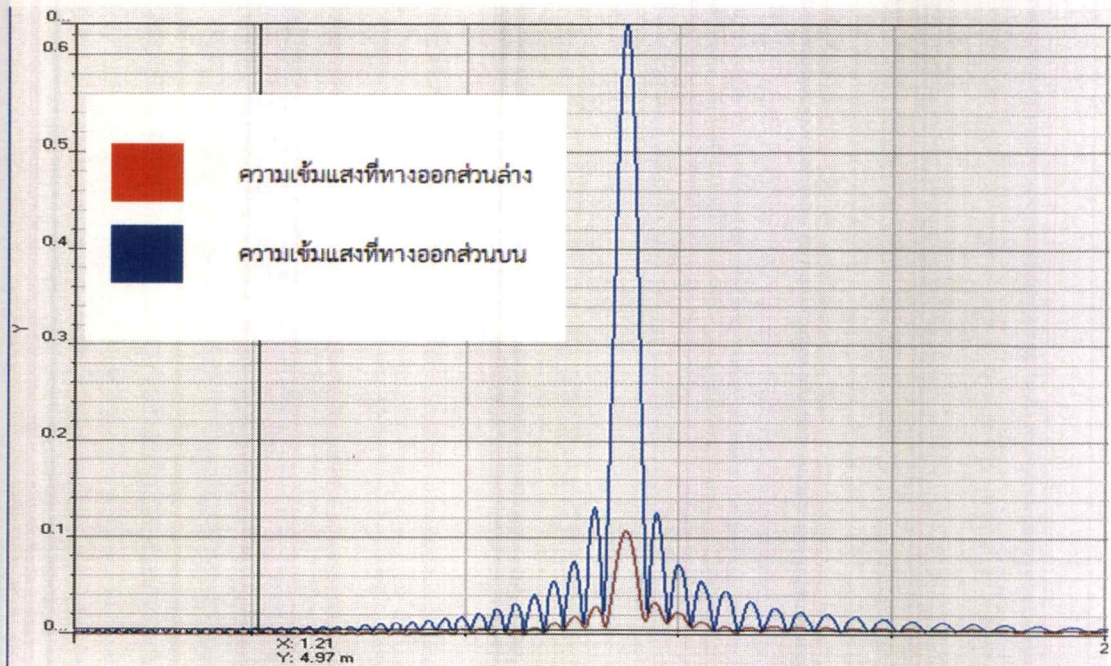
รูปที่ 4.23 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 0 nm

4.2.2 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 10 นาโนเมตร



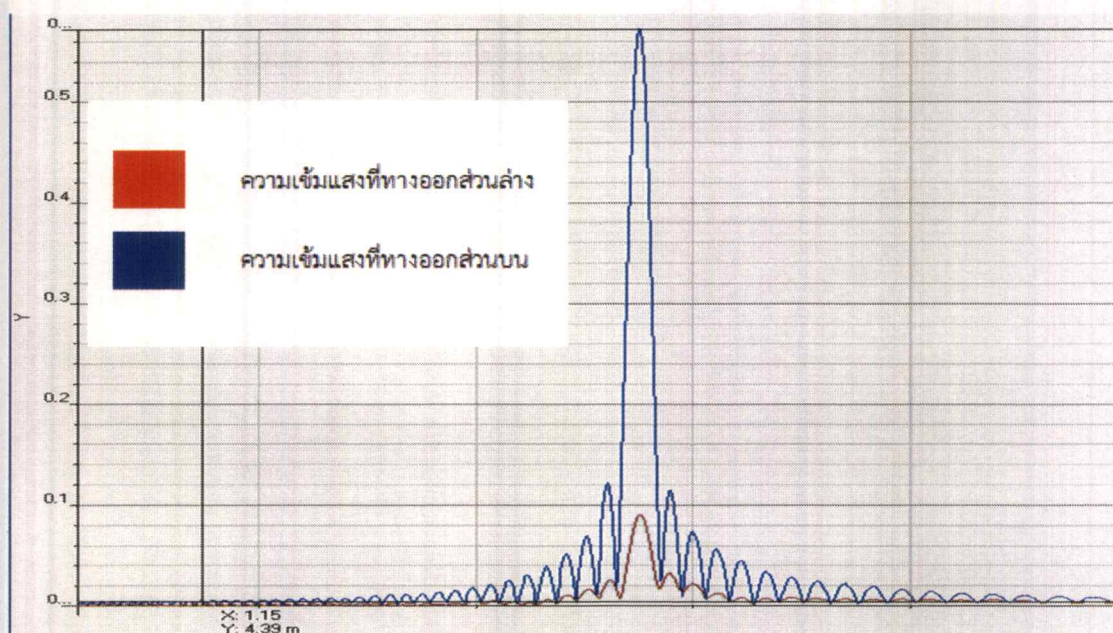
รูปที่ 4.24 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 10 nm

4.2.3 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 20 นาโนเมตร



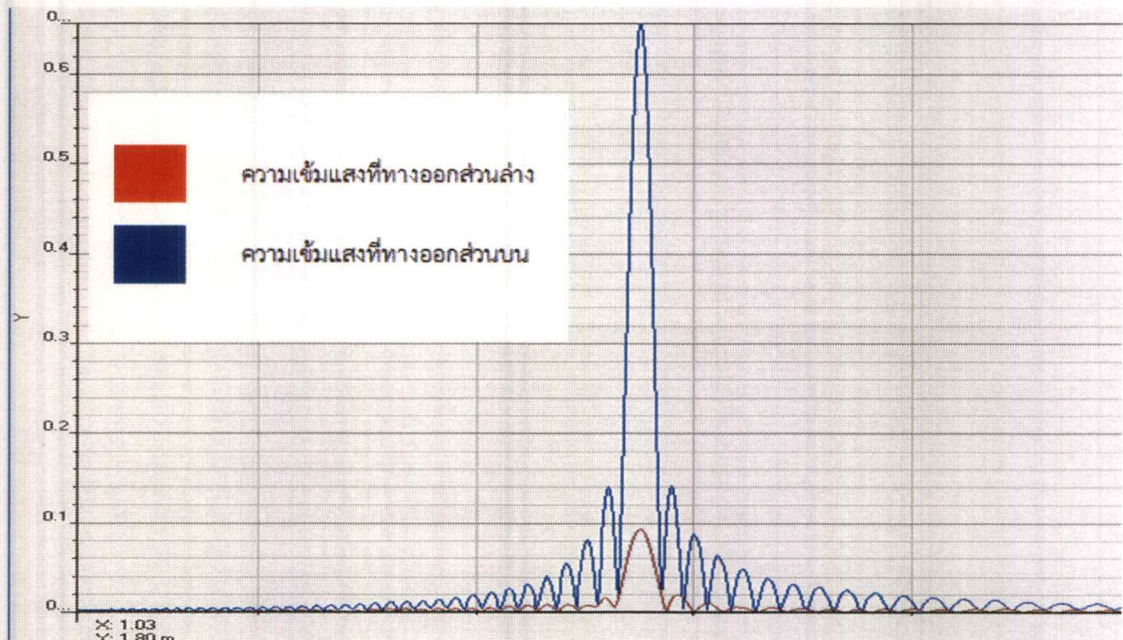
รูปที่ 4.25 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 20 nm

4.2.4 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 30 นาโนเมตร



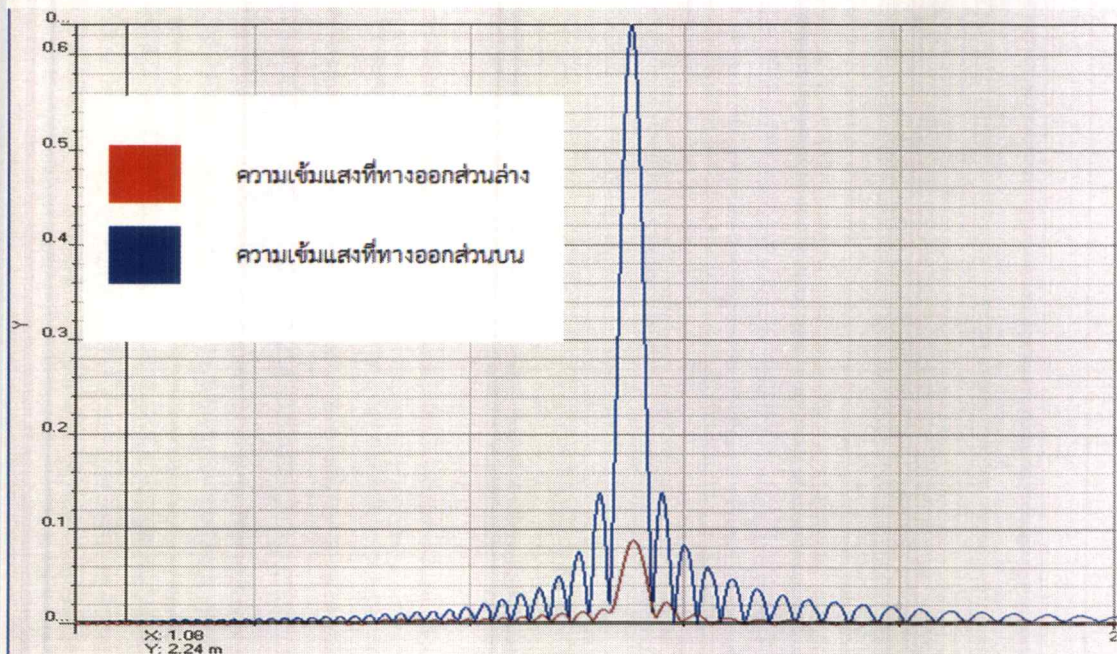
รูปที่ 4.26 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 30 nm

4.2.5 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 40 นาโนเมตร



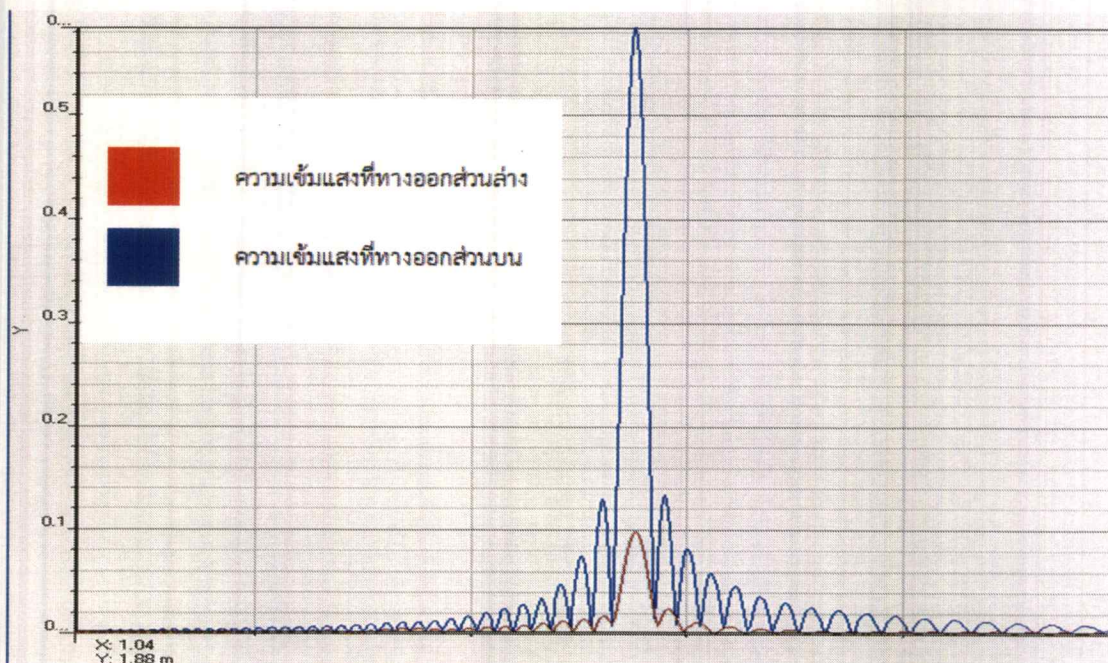
รูปที่ 4.27 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 40 nm

4.2.6 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 50 นาโนเมตร



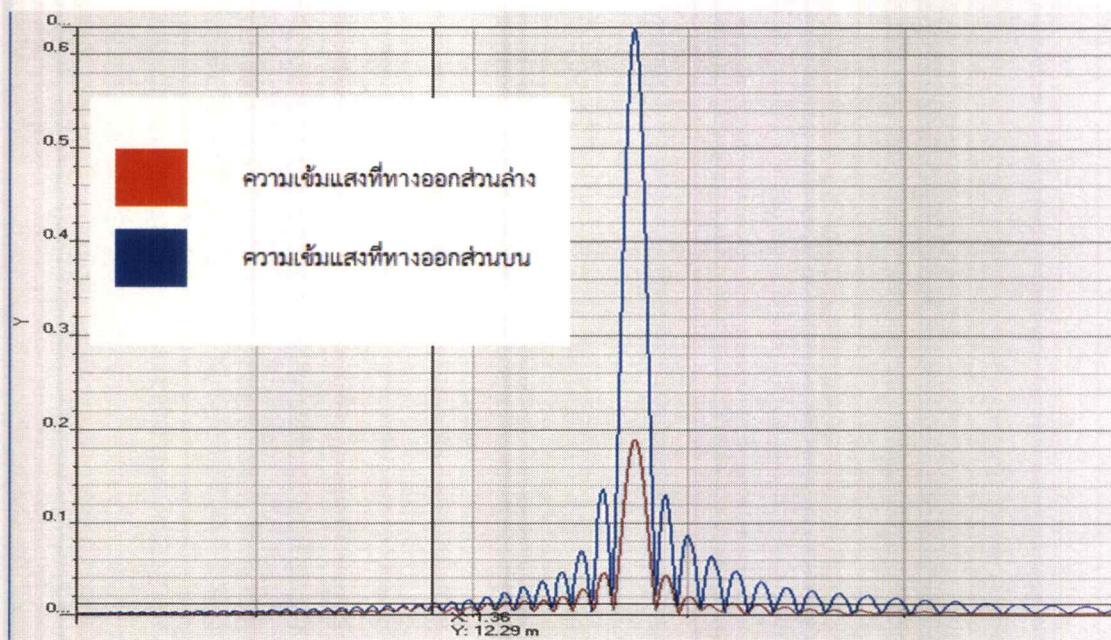
รูปที่ 4.28 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 50 nm

4.2.7 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 60 นาโนเมตร



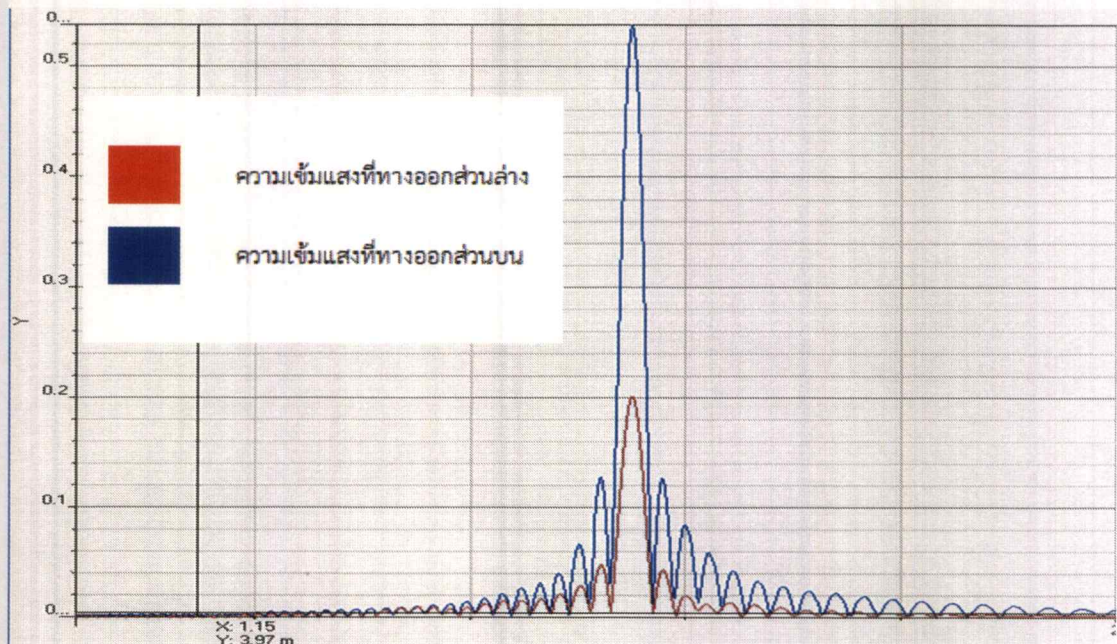
รูปที่ 4.29 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 60 nm

4.2.9 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 80 นาโนเมตร



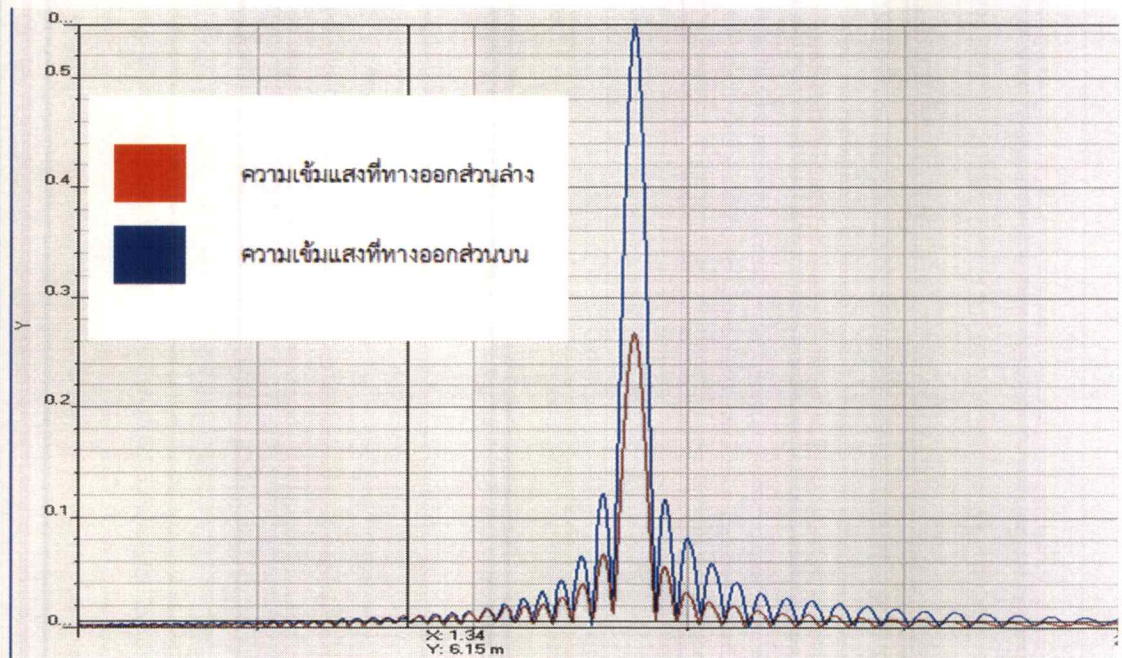
รูปที่ 4.31 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 80 nm

4.2.10 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 90 นาโนเมตร



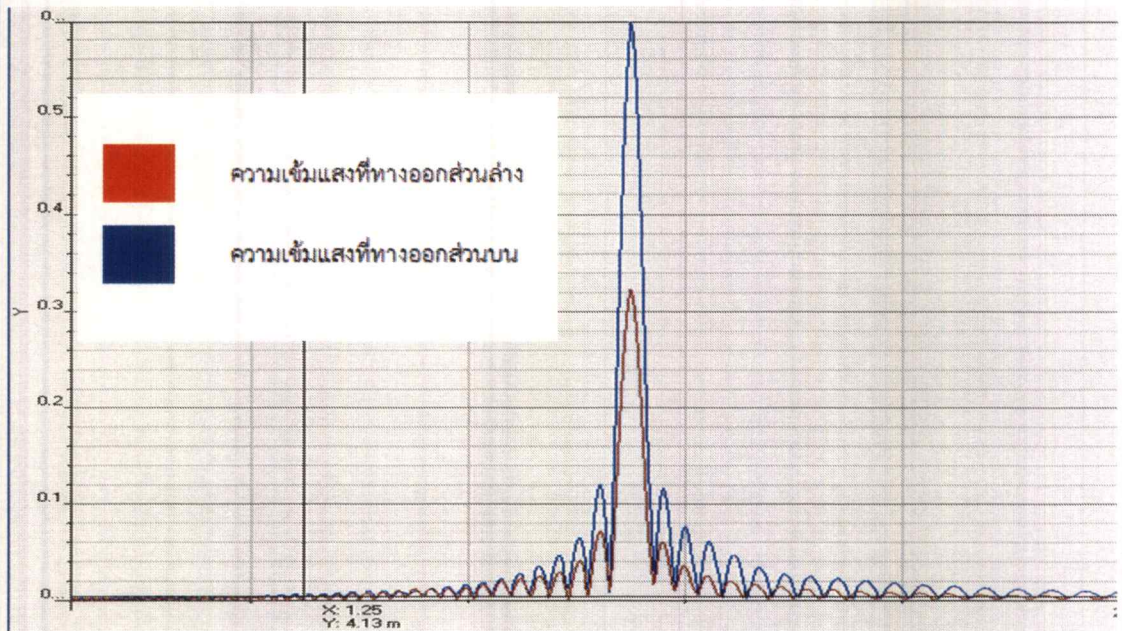
รูปที่ 4.32 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 90 nm

4.2.11 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 100 นาโนเมตร



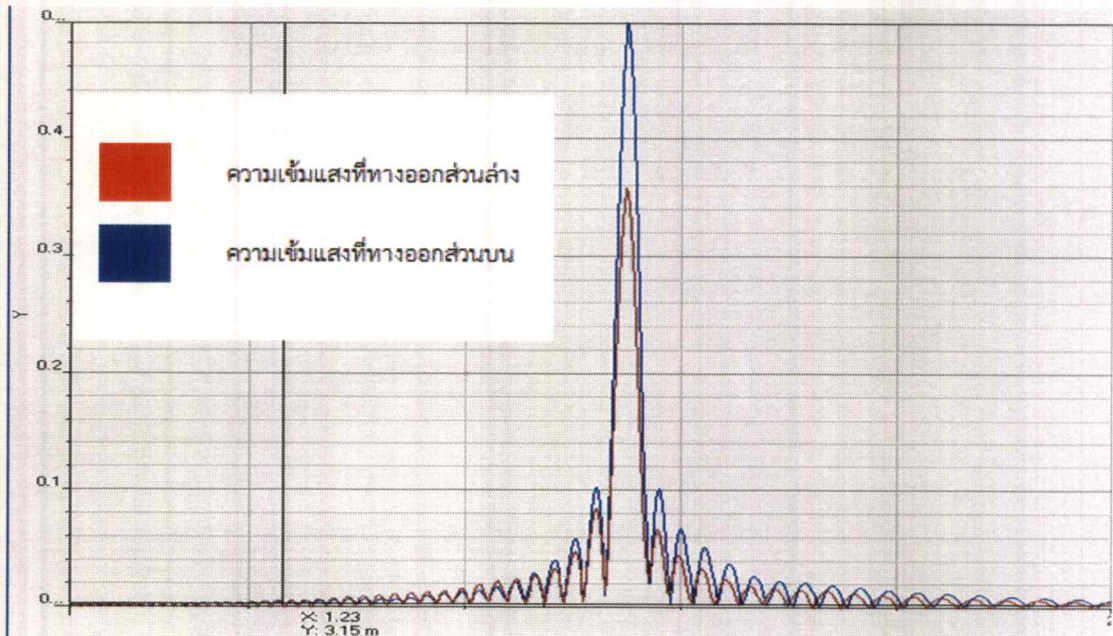
รูปที่ 4.33 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 100 nm

4.2.12 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 110 นาโนเมตร



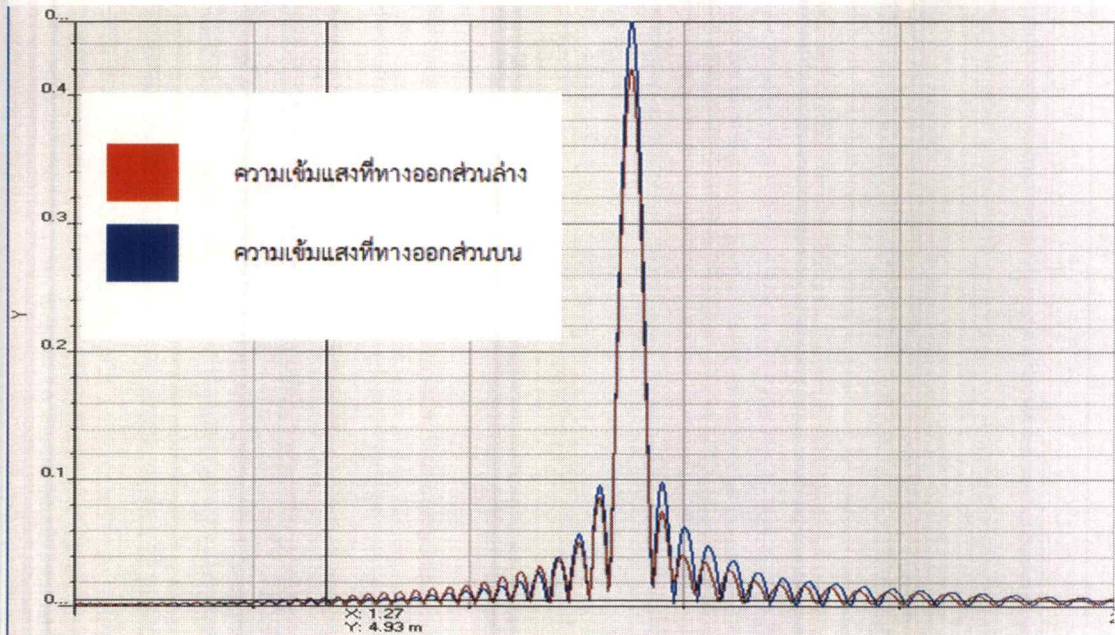
รูปที่ 4.34 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 110 nm

4.2.14 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 130 นาโนเมตร



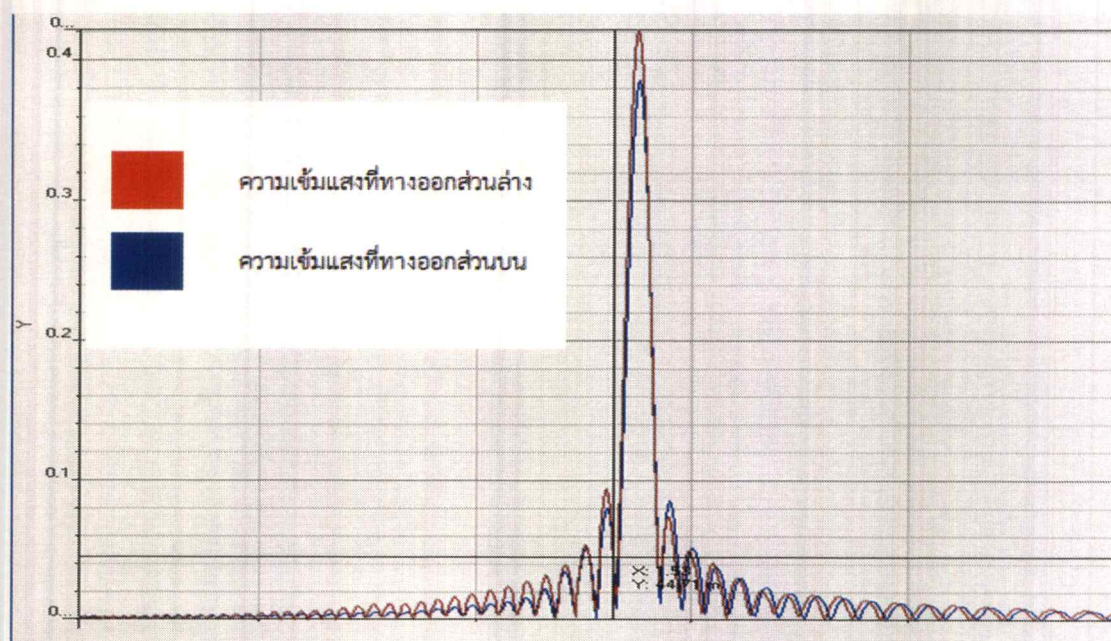
รูปที่ 4.36 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 130 nm

4.2.16 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 150 นาโนเมตร



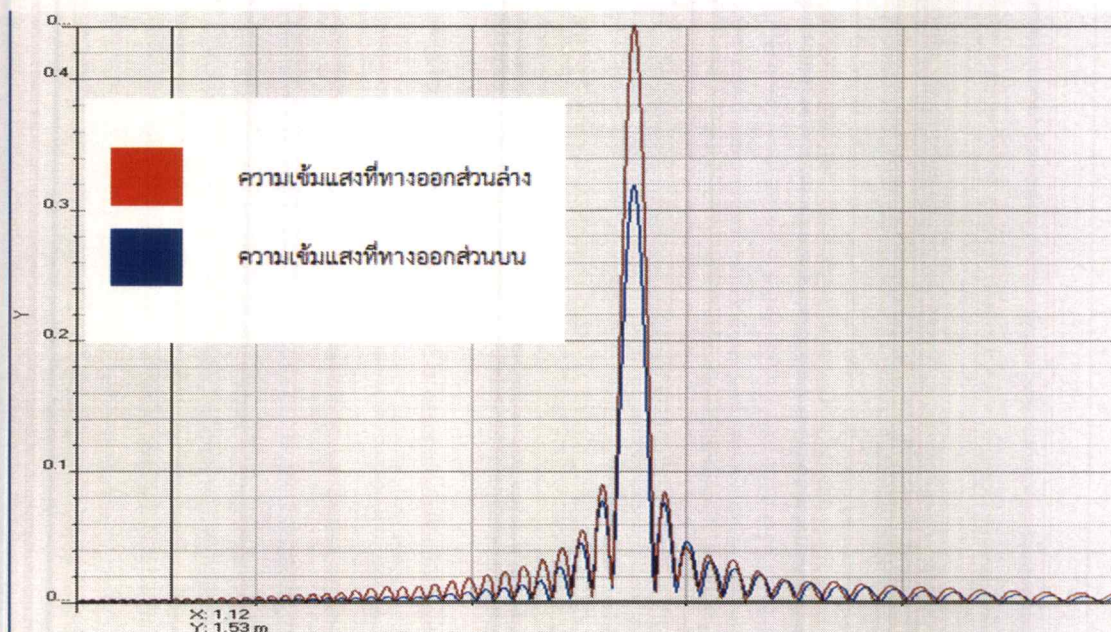
รูปที่ 4.38 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 150 nm

4.2.17 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 160 นาโนเมตร



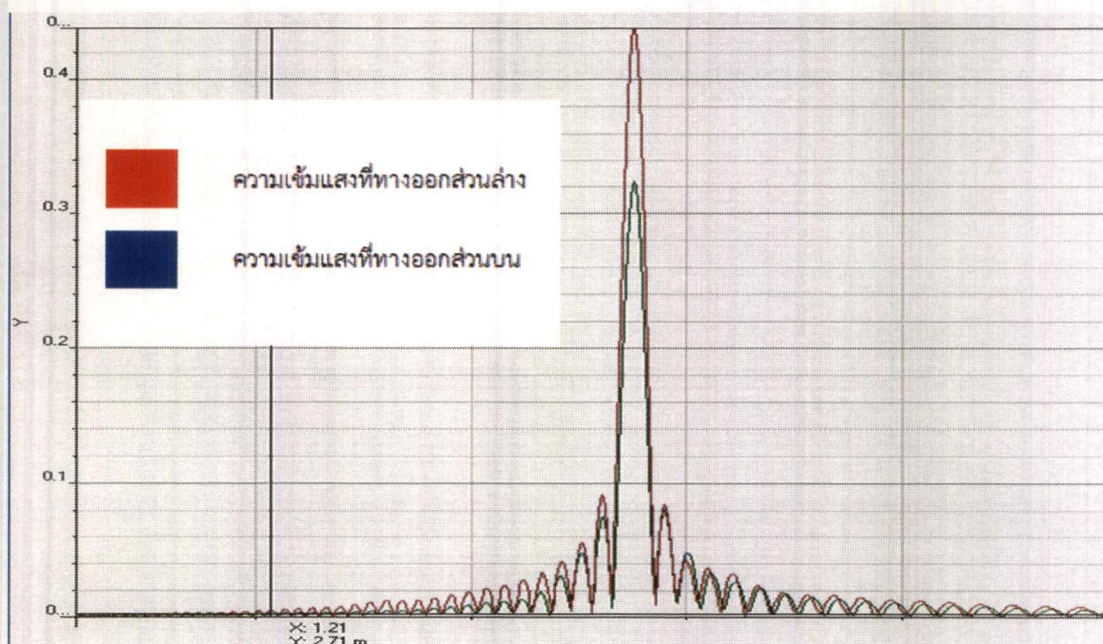
รูปที่ 4.39 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 160 nm

4.2.18 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 170 นาโนเมตร



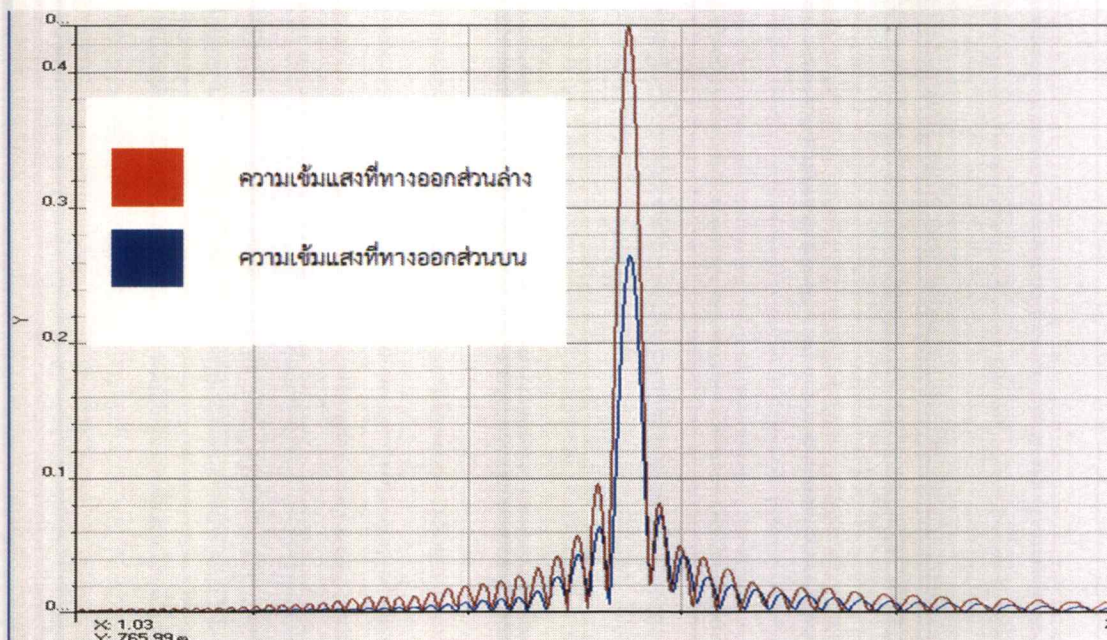
รูปที่ 4.40 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 170 nm

4.2.19 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 180 นาโนเมตร



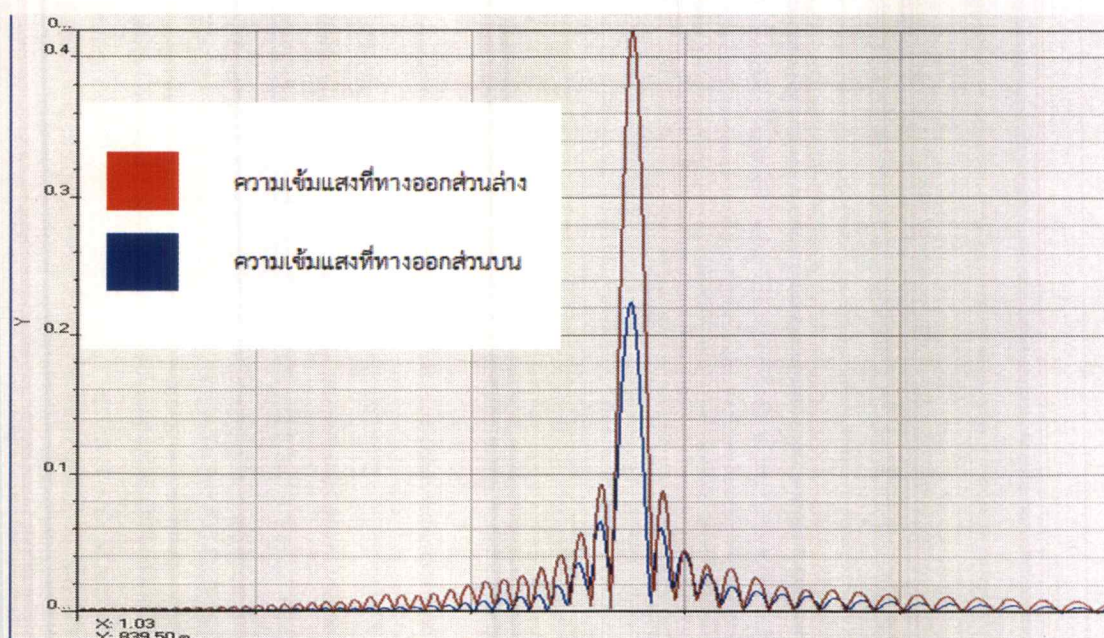
รูปที่ 4.41 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 180 nm

4.2.20 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 190 นาโนเมตร



รูปที่ 4.42 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 190 nm

4.2.21 ท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนวางห่างกัน 200 นาโนเมตร

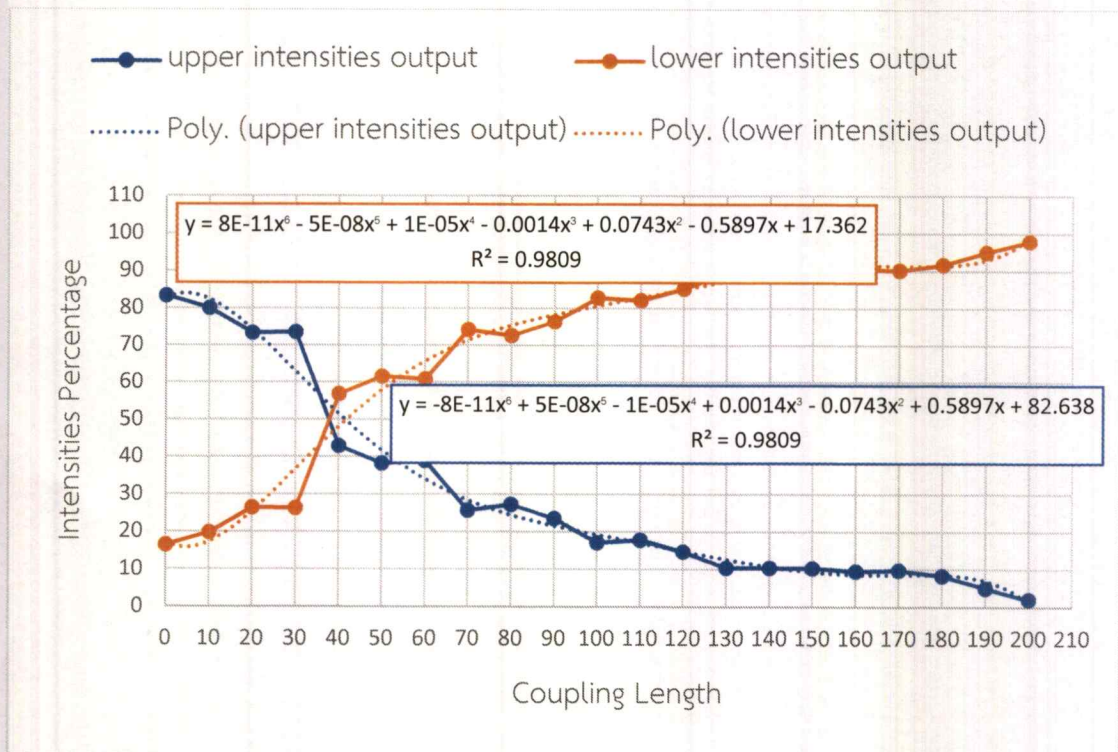


รูปที่ 4.43 แสดง spectrum ของแสงภายในท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupling Waveguide) ที่ระยะระหว่างท่อนำคลื่นเท่ากับ 200 nm

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการจำลองสถานการณ์ (Simulation) ของท่อนำคลื่นที่สร้างจากวัสดุประเภท ลิเทียม ไนโอเบต (Lithium Niobate)

ระยะห่างระหว่าง ท่อนำคลื่น	ความเข้มแสงที่ ทางออกส่วนบน	ความเข้มแสงที่ ทางออกส่วนล่าง	ความเข้มแสงที่ ทางออกส่วนบน โดยร้อยละ	ความเข้มแสงที่ ทางออก ส่วนล่างโดย ร้อยละ
0	0.489	0.192	71.81	28.19
10	0.582	0.176	76.78	23.22
20	0.631	0.108	85.39	14.61
30	0.562	0.091	86.06	13.94
40	0.656	0.093	87.58	12.42
50	0.631	0.089	87.64	12.36
60	0.582	0.099	85.46	14.54
70	0.577	0.205	73.79	26.21
80	0.628	0.189	76.87	23.13
90	0.537	0.201	72.76	27.24
100	0.548	0.268	67.16	32.84
110	0.597	0.323	64.89	35.11
120	0.539	0.332	61.88	38.12
130	0.496	0.358	58.08	41.92
140	0.463	0.419	52.49	47.51
150	0.456	0.420	52.05	47.95
160	0.384	0.421	47.70	52.30
170	0.319	0.438	42.14	57.86
180	0.321	0.437	42.35	57.65
190	0.263	0.434	37.73	62.27
200	0.224	0.418	34.89	65.11

หมายเหตุ ร้อยละของความเข้มแสงที่ทางออกทั้งสองทางรวมกันได้ 100 (100%) ดังนั้นแม้ค่าความเข้มแสงรวมของทางออกทั้งสองทางจะมีค่าไม่เท่ากัน แต่แนวโน้มของความเข้มแสงโดยร้อยละที่ทางออกทั้งสองทางมีค่าลดลงเป็นลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีโหมดเข้าคู่ (couple mode theory) ว่า ถ้าหากท่อนำคลื่นทั้งสองท่อนาวางใกล้กันมากพอจะเกิดการเข้าคู่ (coupling) ของแสง



รูปที่ 4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Coupling Length และ Intensity Percentages ซึ่งเป็นผลการทดลองจากวัสดุประเภทลิเทียม ไนโอเบต

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากข้อมูลผลการทดลองทั้งสองตอน ซึ่งแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของความเข้มแสง ต่อระยะห่างระหว่างท่อนำคลื่นของทั้งท่อนำคลื่นแบบซิลิกอน และท่อนำคลื่นแบบลิเทียม ไนโอเบตนั้น สามารถสรุปได้ว่า ค่าความเข้มแสงที่ทางออกของท่อนำคลื่นทั้งสองแบบนี้ ที่ท่อนำคลื่นส่วนล่างมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะห่างระหว่างท่อนำคลื่น เนื่องจากเมื่อนำท่อนำคลื่นทั้งสองออกจากกัน ระยะการซ้อนทับกันของ evanescent field จะถูกนำห่างออกจากกัน ทำให้ไม่เกิดการปรากฏการณ์เข้าคู่ (Coupling Effect) ระหว่างท่อนำคลื่น ซึ่งผลการทดลองนี้ได้สอดคล้องกับทฤษฎีโหมดเข้าคู่ (Couple Mode Theory) กล่าวคือ เมื่อนำท่อนำคลื่นสองท่อนมาวางไว้ใกล้กันมากพอ ท่อนำคลื่นทั้งสองนั้นจะเกิดปรากฏการณ์การเข้าคู่ของท่อนำคลื่น จึงเป็นคำอธิบายว่า เพราะเหตุใดเมื่อนำท่อนำคลื่นออกจากกันอย่างช้า ๆ จะมีท่อนำคลื่นส่วนหนึ่งที่มีความเข้มแสงที่ทางออกค่อย ๆ ลดน้อยลงไปเรื่อย ๆ โดยในกรณีนี้ท่อนำคลื่นส่วนที่มีความเข้มแสงที่ทางออกลดลงเรื่อย ๆ ก็คือท่อนำคลื่นส่วนบน เนื่องจากในการทดลองนี้ผู้ทดลองได้ทำการส่งแสงเข้าสู่ท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ (Coupler Waveguide) ที่ท่อนำคลื่นส่วนล่าง

เมื่อพิจารณาที่ท่อนำคลื่นส่วนล่าง จะได้ผลการทดลองที่ตรงกันข้ามกับผลการทดลองที่ได้จากท่อนำคลื่นส่วนบน กล่าวคือ เปอร์เซ็นต์ของความเข้มแสงที่ทางออกจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อท่อนำคลื่นทั้งสองวางชิดกัน หรือห่างกันเป็นระยะที่น้อยมาก เนื่องจากแสงที่ถูกส่งเข้าไปภายในท่อนำคลื่นส่วนล่างนี้ เกิดการเข้าคู่ (Coupling) ไปที่ท่อนำคลื่นส่วนบน แต่เมื่อค่อย ๆ นำท่อนำคลื่นออกห่างจากกัน เปอร์เซ็นต์ความเข้มแสงที่ทางออกของท่อนำคลื่นส่วนล่างจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆเป็นลำดับ จนกระทั่งท่อนำคลื่นทั้งสองอยู่ห่างจากกันมากพอที่จะไม่เกิดการเข้าคู่ (Coupling) อีกต่อไป

จากการทดลองนี้ค่าดัชนีหักเหที่ใช้ในการทำการทดลองมีค่า 3.4758 สำหรับซิลิกอน และ 2.111 สำหรับลิเทียม ไนโอเบต ที่ค่าความยาวคลื่น 1.55 ไมโครเมตร ซึ่งค่าดัชนีหักเหนี้ถือว่าเป็นสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุในการตอบสนองต่อแสงที่ค่าความยาวคลื่นแตกต่างกัน ดังนั้นการทดลองนี้สามารถใช้เป็นแนวทางอ้างอิงได้เฉพาะที่ค่าความยาวคลื่น 1.55 ไมโครเมตรเท่านั้น หากต้องการทำการทดลองที่ค่าความยาวคลื่นอื่น ๆ เช่น 1350, 1450, 1550 ไมโครเมตร เป็นต้น จำเป็นต้องเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหของวัสดุที่ใช้ในการทำการทดลอง

ในการเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของวัสดุทั้งสอง ซึ่งได้แก่ ซิลิกอน และลิเทียม ไนโอเบตนั้น สามารถสรุปได้ว่าลิเทียม ไนโอเบตมีประสิทธิภาพที่สูงกว่า โดยสามารถแยกออกเป็นประเด็นหลัก ๆ ได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ลิเทียม ไนโอเบต มี “ปริมาณ” ความเข้มแสงรวมที่ทางออกสูงกว่าลิเทียม ไนโอเบต ดังนั้นในการนำไปใช้ในการสื่อสาร เช่น การสร้างเส้นใยแก้วนำแสง การสร้างวงจรรวมเชิงทัศนศาสตร์ (Optical Integrated Circuit) จะมีประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลระยะไกลได้ดีกว่าอุปกรณ์ที่สร้างจากซิลิกอน เนื่องจากการสูญเสียของข้อมูลเชิงแสงน้อยกว่ามาก

5.1.2 จากข้อที่ 1 เมื่ออุปกรณ์ที่สร้างจากลิเทียม ไนโอเบตมีการสูญเสียของแสงน้อย จะทำให้ในการนำไปใช้งานในด้านการสื่อสารจะประหยัดต้นทุนในการสร้างตัวกระตุ้นสัญญาณ เพื่อกระตุ้นแสงที่สูญเสียไประหว่างเคลื่อนที่ภายในท่อนำคลื่นให้มีความเข้มที่สูงมากขึ้นจนเพื่อให้แสงมีความเข้มมากพอจะส่งผ่านข้อมูลไปถึงผู้รับ (Destination) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการกระตุ้นสัญญาณซึ่งถูกใช้อย่างแพร่หลาย ได้แก่ Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA) ซึ่งข้อได้เปรียบของลิเทียม ไนโอเบตนี้จะลดจำนวนของ EDFA ซึ่งจะถูกติดตั้งอยู่ตามจุดต่าง ๆ ของระบบการสื่อสารข้อมูลเชิงแสง ทำให้สามารถลดต้นทุนในการสื่อสารเชิงแสงได้

5.1.3 ความยาวคลื่นที่ทางออกของท่อนำคลื่นที่สร้างจากลิเทียม ไนโอเบตมี Full Width at Half Maximum (FWHM) แคบมากจนเกือบจะมีความยาวคลื่นเดียว เมื่อเปรียบเทียบกับท่อนำคลื่นที่สร้างจากซิลิกอนแล้วนั้น ท่อนำคลื่นที่สร้างจากซิลิกอนมี FWHM กว้างมากกว่า

5.1.4 อุปกรณ์ท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่หนึ่ง ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางในฐานะอุปกรณ์ที่เรียกว่า ตัวแยกลำแสง (Beam Splitter, BS) ซึ่งถ้าหากมีจัดท่อนำคลื่นทั้งสองให้มีระยะห่างที่เหมาะสม จะสามารถสร้าง 50:50 Beam Splitter ได้ แต่การจัดระยะห่างของท่อนำคลื่นทั้งสองนั้นค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากระยะห่างที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์การเข้าคู่กันนั้นอยู่ในพิสัยของนาโนเมตร โดยเฉพาะท่อนำคลื่นแบบซิลิกอนระยะห่างที่ทำให้เกิดการเข้าคู่กันนั้นอยู่ในพิสัยเพียงแค่มิกโรลิบนาโนเมตร แต่ในขณะที่ท่อนำคลื่นแบบลิเทียม ไนโอเบตนั้นระยะห่างที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดการเข้าคู่กันนั้นอยู่ในพิสัยร้อยนาโนเมตร ซึ่งจะทำให้การจัดอุปกรณ์ของท่อนำคลื่นแบบลิเทียม ไนโอเบตทำได้ง่ายด้ายกว่า

ซึ่งจากข้อได้เปรียบทั้งสี่นี้ สามารถสรุปได้ว่าลิเทียม ไนโอเบตมีประสิทธิภาพในการนำมาสร้างอุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์ เช่น ท่อนำคลื่น มากกว่าซิลิกอน แต่อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องดูความเหมาะสมและลักษณะการใช้งานประกอบด้วยเช่นกัน เนื่องจากลิเทียม ไนโอเบตมีราคาแพงมากกว่าซิลิกอน นอกจากนี้หากมีการออกแบบท่อนำคลื่นแบบซิลิกอนในเงื่อนไขที่เหมาะสม เช่น การสร้างโครงสร้าง

ท่อนำคลื่นแบบซิลิกอนด้วยรูปแบบ Silicon on insulator waveguide (SOI) จะสามารถปรับปรุงคุณภาพของท่อนำคลื่นแบบซิลิกอนได้

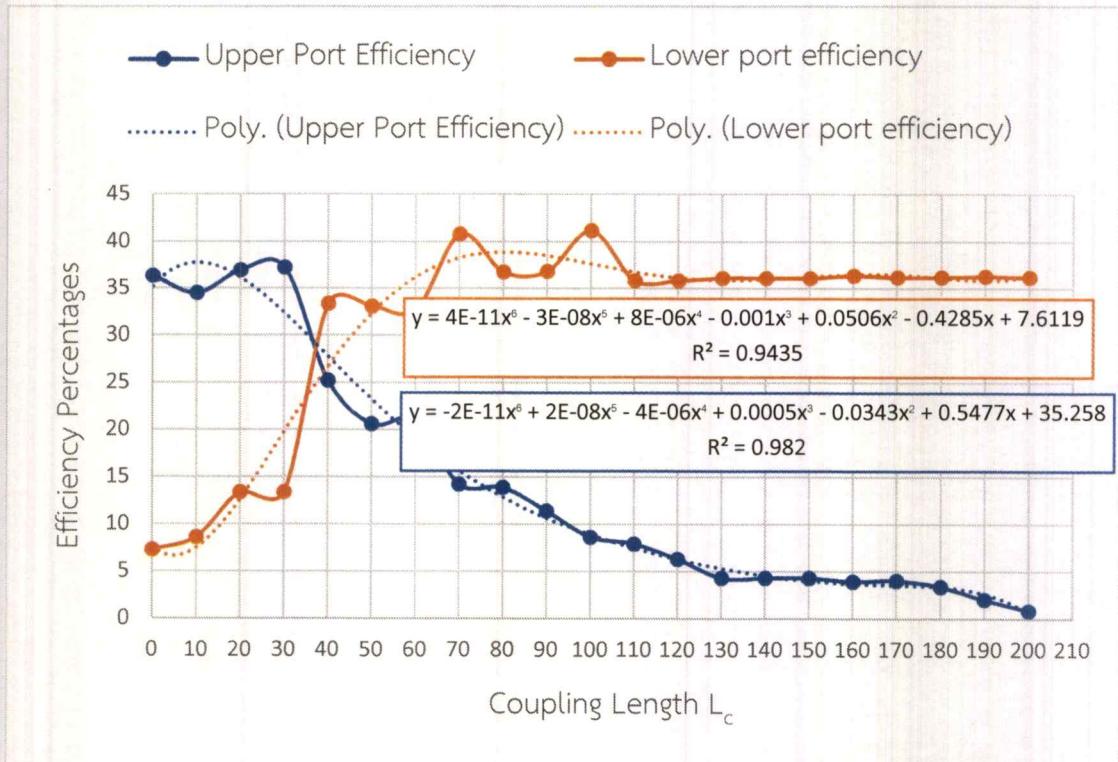
จากข้อสรุปข้างต้นสามารถคำนวณประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงาน (Energy Transfer Efficiency) เพื่อสนับสนุนข้อสรุปที่ว่าท่อนำคลื่นที่สร้างวัสดุประเภทลิเทียม ไนโอเบตมีประสิทธิภาพสูงกว่าท่อนำคลื่นที่สร้างจากวัสดุประเภทซิลิกอน ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \%Efficiency \\ = \frac{Output\ at\ upper/Lower}{Input} \times 100 \end{aligned} \quad (83)$$

จากสมการที่ (83) สามารถคำนวณหาประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานของท่อนำคลื่น ซึ่งค่าประสิทธิภาพนี้จะสามารถบอกได้ว่า ท่อนำคลื่นที่ใช้ี่สามารถนำส่งคลื่นขาเข้าไปที่ทางออกของท่อนำคลื่นได้ทั้งหมดกี่เปอร์เซ็นต์ โดยเมื่อนำค่าเหล่านั้นมาเปรียบเทียบกับระหว่างสองวัสดุที่ใช้สร้างท่อนำคลื่น จะสามารถบอกได้ว่า วัสดุแบบใดมีประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานจากขาเข้าไปที่ขาออกได้ดีกว่ากัน นอกจากนั้นค่าประสิทธิภาพนี้ยังแสดงว่า วัสดุแบบใดมีความสามารถในการรักษาพลังงานของคลื่นแสงขาเข้าไว้ภายในระบบท่อนำคลื่นได้ดีกว่ากัน ซึ่งนั่นหมายความว่า ท่อนำคลื่นที่มีความสามารถในการรักษาพลังงานได้มากกว่าจะมีการสูญเสียพลังงานอันเกิดจากตัวระบบของท่อนำคลื่นเอง เช่น การสูญเสียพลังงานจากการโค้งงอของท่อนำคลื่น การสูญเสียพลังงานอันเนื่องมาจากระยะห่างระหว่างท่อนำคลื่น เป็นต้น ได้ดีมากกว่ากัน

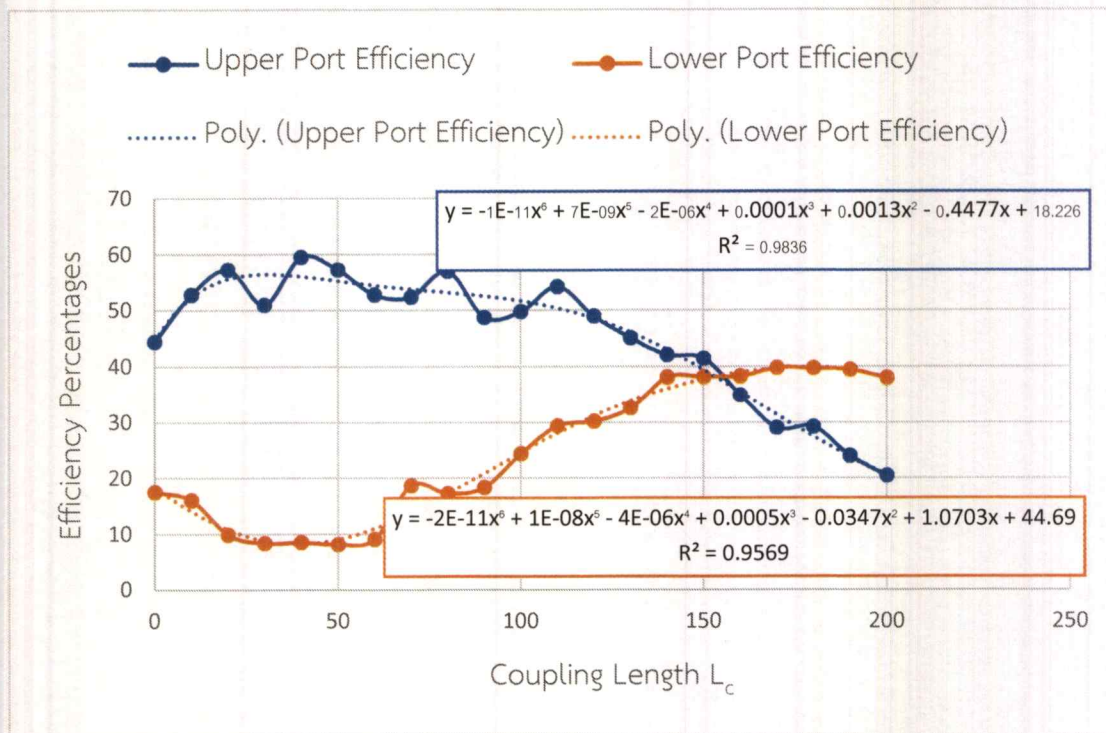
ตารางที่ 5.1 แสดงค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานของท่อนำคลื่นทั้งสองชนิด

ระยะ	ท่อนำคลื่นจากวัสดุ Silicon		ท่อนำคลื่นจากวัสดุ Lithium Niobate	
	ทางออกส่วนบน	ทางออกส่วนล่าง	ทางออกส่วนบน	ทางออกส่วนล่าง
0	36.3634	7.2727	44.4546	17.4546
10	34.5455	8.6364	52.9091	16.0000
20	37.0000	13.4546	57.3636	9.8182
30	37.2727	13.4546	51.0909	2.2727
40	25.2727	33.4546	59.6364	8.4545
50	20.6363	33.1818	57.3636	8.0909
60	21.0000	32.8181	52.9091	9.0000
70	14.2727	40.8182	52.4546	18.6364
80	13.9091	36.8182	57.0909	17.1818
90	11.4546	36.9091	48.8182	18.2727
100	8.6364	41.1818	49.8182	24.3636
110	7.9091	35.9091	54.2727	29.3636
120	6.2727	35.9091	49.0000	30.1818
130	4.2727	36.1818	45.0909	32.5455
140	4.2727	36.1818	42.0909	38.0909
150	4.2727	36.1818	41.4546	38.1818
160	3.9091	36.4546	34.9091	38.2727
170	4.0000	36.2727	29.0000	37.8182
180	3.3636	36.2727	29.1818	39.7273
190	2.0000	36.3636	23.9091	39.4545
200	0.8182	36.2727	20.3636	38.0000



รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency Percentages และ Coupling Length ของท่อนำคลื่นที่สร้างจากวัสดุประเภทซิลิกอน

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของท่อนำคลื่นทั้งสอง (Coupling Length) และ ร้อยละของประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานของท่อนำคลื่นที่สร้างจากวัสดุประเภทซิลิกอน ซึ่งจาก กราฟได้แสดงว่าประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานของท่อนำคลื่นทั้งสองส่วน แปรผันกับระยะห่าง ระหว่างท่อนำคลื่น แต่ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าที่ระยะห่างระหว่างท่อนำคลื่นเท่าใด จะมีประสิทธิภาพ การส่งผ่านพลังงานสูงที่สุด เนื่องจากผลรวมของความเข้มแสงที่ทางออกของท่อนำคลื่นทั้งสองส่วนที่ ระยะห่างระหว่างท่อนำคลื่นต่าง ๆ กันมีค่าไม่เท่ากัน



รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency Percentages และ Coupling Length ของท่อนำคลื่นที่สร้างจากวัสดุประเภทลิเทียม ไนโอเบต

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของท่อนำคลื่นทั้งสอง (Coupling Length) และ ร้อยละของประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานของท่อนำคลื่นที่สร้างจากวัสดุประเภทลิเทียม ไนโอเบต ซึ่งจากกราฟได้แสดงว่าประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานของท่อนำคลื่นทั้งสองส่วน แปรผันกับ ระยะห่างระหว่างท่อนำคลื่น แต่ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าที่ระยะห่างระหว่างท่อนำคลื่นเท่าใด จะมี ประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานสูงที่สุด เนื่องจากผลรวมของความเข้มแสงที่ทางออกของท่อนำคลื่น ทั้งสองส่วนที่ระยะห่างระหว่างท่อนำคลื่นต่าง ๆ กันมีค่าไม่เท่ากัน

แม้ว่าประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานจะไม่สามารถสรุปได้ว่าที่ระยะห่างระหว่างท่อนำคลื่น เท่าใด ท่อนำคลื่นจะมีประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานสูงที่สุด แต่จากตารางข้างต้นยังคงสามารถหา ข้อสรุปได้ว่า ท่อนำคลื่นประเภทลิเทียม ไนโอเบตมีการสูญเสียของแสงน้อยกว่าท่อนำคลื่นประเภท ซิลิกอน เนื่องจากค่าแนวโน้มของประสิทธิภาพการส่งผ่านของท่อนำคลื่นแบบลิเทียม ไนโอเบตมีค่าที่ สูงกว่าท่อนำคลื่นแบบซิลิกอนอย่างมีนัยยะสำคัญ ซึ่งการสูญเสียที่กล่าวถึงนี้ยังสามารถกล่าวได้อีกว่า ท่อนำคลื่นจากวัสดุประเภทลิเทียม ไนโอเบต มีความสามารถในการรักษาพลังงานมากกว่าท่อนำคลื่น แบบซิลิกอน

5.2 ข้อเสนอแนะ

การทดลองในเล่มโครงการพิเศษเล่มนี้ สามารถนำไปต่อยอดได้อีกหลายประการ เช่น การนำท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ไปทดลองสร้าง Force Sensor โดยการลดขนาดของท่อนำคลื่นส่วนบนลงเป็นลำดับ จากนั้นวิเคราะห์ผลว่า ขนาดของท่อนำคลื่นจะมีผลต่อความเข้มแสงที่ปลายท่อนำคลื่นอย่างไร โดยข้อสันนิษฐานของผู้จัดทำโครงการนี้ คือ ความเข้มแสงที่ส่วนปลายของท่อนำคลื่นส่วนบนจะค่อย ๆ ลดลงตามลำดับขึ้นอยู่กับขนาดของท่อนำคลื่นส่วนบน ซึ่งถ้าหากความเข้มแสงลดลงอย่างเป็นเชิงเส้น จะสามารถสรุปได้ว่า ท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่สามารถนำไปสร้างเป็น Force Sensor ได้ โดยที่ขนาดของท่อนำคลื่นที่เล็กลง หมายถึง ท่อนำคลื่นนั้นได้รับแรงภายนอกมากกระทำ ทำให้ขนาดของท่อนำคลื่นเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งถ้าหากพฤติกรรมของความเข้มแสงลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นด้วยแล้ว จะสามารถวัดแรงที่กดลงมาบนท่อนำคลื่นได้

ท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่มากกว่า 1 คู่ นำมาต่อกันนั้น สามารถสร้าง Mach-Zehnder Interferometer ได้ โดยมีเงื่อนไขว่า ท่อนำคลื่นแบบเข้าคู่ที่นำมาสร้างนั้นต้องเป็นแบบ 50:50 Beam Splitter เท่านั้น โดยทางออกของท่อนำคลื่นทั้งสองแสดงถึงฉากรับทั้งสองของ Mach-Zehnder Interferometer ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการสาธิตหลักการของโฟตอนเดี่ยวได้ โดยที่ 50:50 BS คือโอกาสความน่าจะเป็นที่โฟตอนจะเคลื่อนที่เข้าไปภายในท่อนำคลื่นนั้น

การออกแบบท่อนำคลื่นแบบ Silicon on insulator waveguide และ Lithium niobate on insulator waveguide จะสามารถปรับปรุงคุณภาพของท่อนำคลื่นทั้งสองแบบได้ ดังนั้น สามารถนำโครงการพิเศษนี้ไปต่อยอดด้วยการสร้างโครงสร้างประเภท Waveguide on insulator

เอกสารอ้างอิง

1. David J. Griffith 2013, Introduction to Electrodynamics 4th edition.
2. Fundamentals of Photonics 2nd edition, B.E.A. Saleh, M.C. Teich
3. Eugene Hecht 2017, Optics 5th edition.
4. Antonine Brimont et al. 2016, Low-loss and compact silicon rib waveguide bends, IEEE Photonics Technology Letters, Vol.28 Issue 3.
5. Wei-Ping Huang 1994, Coupled-mode theory for optical waveguides: an overview, J. Opt. Soc. Am. A, Vol.11, No.3.
6. M.N. Armenise 1988, Fabrication techniques of lithium niobate waveguides, IEE Proceedings, Vol.135, Pt. J, No.2.
7. D.A. Bryan et al. 1985, Magnesium-doped lithium niobate for higher optical power applications, Opt. Eng., Vol.24
8. Marco Bazzan, Cinzia Sada 2015, Optical waveguides in lithium niobate: Recent developments and application, Appl. Phys. Rev. 2, 040603.
9. L. Arizmendi 2004, Phonic applications of lithium niobate crystals, Phys. Stat. Sol. (a) 201, No.253-283.
10. Sai-Tuk Chu, Sujeet K. Chaudhuri 1989, A Finite Difference Time-Domain Method for the Design and Analysis of Guided-Wave Optical Structures, Journal of Lightwave Technology, IEEE, Vol. 7, No. 12.
11. B.M.A. Rahman, D.M.H. Leung, S.S.A. Obayya, K.T.V. Glatton 2008, Numerical analysis of bent waveguides: bending loss, transmission loss, mode coupling and polarization coupling, Applied Optics, Vol. 47, No. 16, P. 2961-2070.
12. Kane S. Yee 1966, Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Waves Equations in Isotropic Media, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 14, Issue 3.