

การศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการรจัดด้วยเส้นใยแก้วนำแสง

FEASIBILITY STUDY FOR FIBER OPTIC

DISPLACEMENT MEASUREMENT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตศึกษาดุษฎี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

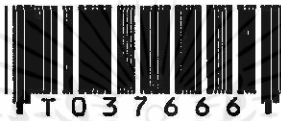
พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-920-6

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วยเส้นใยแก้วนำแสง

FEASIBILITY STUDY FOR FIBER OPTIC
DISPLACEMENT MEASUREMENT



ศมน เพียงบางยาง

SAMANA PHENGBANGYANG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

ISBN 974 - 622 - 920 - 6

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...37666
วัน, เดือน, ปี... 19 ก.ย. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องสมุดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
การตีพิมพ์ซ้ำ หรือการนำข้อมูลไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**FEASIBILITY STUDY FOR FIBER OPTIC
DISPLACEMENT MEASUREMENT**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2000

ISBN 974 - 622 - 920 - 6



COPYRIGHT 2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วยเส้นใยแก้วนำแสง
 FEASIBILITY STUDY FOR FIBER OPTIC DISPLACEMENT
 MEASUREMENT

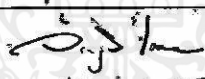


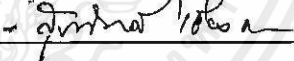
ชื่อนักศึกษา นายสมน เพียงบางยาง

รหัสประจำตัว 40065003.

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ปรีชา ยุพาพิน

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.วราวุฒิ เกตุศักดิ์	
รศ.ดร.ปรีชา ยุพาพิน	
รศ.สุวรรณ กุศลาราม	
ดร.สุรศักดิ์ เชียงกา	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 26 กรกฎาคม 2543 เวลา 10.00 น. เป็นต้นไป
 สถานที่สอบ ณ ห้อง 605 อาคารจุฬารามณ์วิทยาลัย 1

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว



วันที่... ๒๗... เดือน... กรกฎาคม... พ.ศ. ๒๕๔๓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วย
เส้นใยแก้วนำแสง

นักศึกษา

นายสมน เพ็ญบางยาง

รหัสประจำตัว

40065003

ปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

พ.ศ.

2543

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ. ดร. ปรีชา อุพาพิน

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสง หลักการคือ แสงอาพันธ์สูงจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนชนิดโทมดเดี่ยวความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ถูกป้อนเข้าไปในใยแก้วนำแสงจะเกิดเป็นโทมดแสงต่างๆ ภายในใยแก้วนำแสงขึ้น โทมดแสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสงเหล่านี้ถูกทำให้มีการเปลี่ยนแปลงเส้นทางเดินด้วยการปรับระยะขจัดของเซนซิงยูนิตที่ส่งผ่านไปยังใยแก้วนำแสง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถตรวจพบได้โดยแสงที่ผ่านไปยังเกรตติงชนิดส่งผ่านเพื่อทำการแยกโทมดแสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสง จึงทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่าง การเปลี่ยนแปลงของทางเดินโทมดแสงกับการเปลี่ยนแปลงของการขจัดที่เกิดขึ้นจากเซนซิงยูนิตได้ ผลการศึกษาพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำมาวัดการขจัดโดยมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับการเปลี่ยนแปลงของโทมดแสงและมีกำลังแยก ± 10 ไมโครเมตรซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับทฤษฎี โดยระบบนี้มีเสถียรภาพที่จะใช้งานได้ นอกจากนั้นผลที่ได้จากการวัดการขจัดยังนำมาศึกษาเซ็นเซอร์ของแรงที่กระทำต่อเซนซิงยูนิตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Feasibility Study For Fiber Optic Displacement Measurement
Student	Mr. Samana Phengbangyang
Student ID.	40065003
Degree	Master of Science
Programme	Applied Physics
Year	2000
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Preecha Yupapin

ABSTRACT

This work is the feasibility study for fiber optic displacement measurement. The principle of the system is that a highly coherent light from a single mode HeNe laser with wavelength of 632.8 nm is launched into a length of a single mode fiber, few modes of light occur and propagate through the optical fiber. The optical path difference of each modes are changed by the applied sensing unit displacement. The mode displacement are measured using bulky grating and scanning detection unit, then the relationship between mode separation and sensing unit displacement are recorded. Results obtained have shown that linear proportion/relationship between sensing unit displacement and mode separation were measured, with resolution of ± 10 micron. Temperature stability for the use in laboratory environment was satisfied to the preliminary theoretical prediction. Furthermore, the displacement measurement system have shown the feasibility of using for fiber optic displacement measurement.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดี จากคณาจารย์ภายในภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รศ.ดร. ปรีชา ยุพาพิน ผศ.ดร. วราวุฒิ เถาถัดดา รศ. สุวรรณ คูสำราญ และ ดร. รัชภักย์ จิตต์อารี ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำเนื้อหาทางด้านหลักการและทฤษฎีทางแสงด้วยดีเสมอมา ตลอดจนคอยดูแลในเรื่องการเขียนวิทยานิพนธ์ การใช้ภาษา โดยได้รับความเอาใจใส่ตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร.สุรศักดิ์ เชียงกา คุณพรอนันต์ มีศรี คุณณัฐพร พิพิธธีรบุญการ คุณพรเพ็ญ รัชชังเจริญ และเพื่อนๆ นักศึกษาทุกคน ที่กรุณาให้คำแนะนำและชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดจนให้ความช่วยเหลือและยังให้กำลังใจต่อผู้วิจัยอย่างใกล้ชิดตลอดมา จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน

สมน เพียงบางยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 การดำเนินงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้นของแสง และใยแก้วนำแสง.....	5
2.1 ความรู้ทางแสงเบื้องต้น.....	5
2.1.1 การหักเหและการสะท้อน.....	5
2.1.2 การแทรกสอด.....	8
2.1.3 การเลี้ยวเบน.....	11
2.1.4 เกรตติงเลี้ยวเบน.....	15
2.1.5 โพลาริเซชันเชิงเส้น.....	20
2.2 ใยแก้วนำแสง.....	23
2.2.1 ประวัติความเป็นมา.....	24
2.2.2 โครงสร้างของใยแก้วนำแสง.....	25
2.2.3 ชนิดของใยแก้วนำแสง.....	26
2.2.4 พารามิเตอร์ของใยแก้วนำแสง.....	26
2.3 สรุป.....	31
บทที่ 3 การเคลื่อนที่ของคลื่นในใยแก้วนำแสง.....	32
3.1 การเคลื่อนที่ของคลื่นในท่อนำคลื่นแบบระนาบ.....	32
3.1.1 สนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นแบบระนาบ.....	34

สารบัญ (ต่อ)

3.1.2	คลื่นตามขวางที่มีความสมมาตรและไม่สามารถภายในท่อนำคลื่นแบบ ระนาบ.....	36
3.1.3	โหมดของคลื่นตามขวาง.....	38
3.1.4	ค่าคงที่การเคลื่อนที่ของคลื่น.....	40
3.2	การเคลื่อนที่ของคลื่นในใยแก้วนำแสง.....	41
3.2.1	คลื่นที่ไม่มีการลดทอนภายในใยแก้วนำแสง.....	44
3.2.2	คลื่นตามขวาง คลื่นผสม และโหมด.....	48
3.2.3	โหมดโพลาริเซชันเชิงเส้น.....	58
3.3	สรุป.....	65
บทที่ 4	การตรวจวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสง.....	66
4.1	ทฤษฎีเกี่ยวกับการโค้งงอของใยแก้วนำแสง.....	66
4.2	เสถียรภาพการวัดการขจัดเนื่องจากความร้อน.....	69
4.3	อุปกรณ์ทางแสงและอิเล็กทรอนิกส์.....	70
4.3.1	เลเซอร์ฮีเลียมนีออน.....	70
4.3.2	เกรตติง.....	74
4.3.3	พินโฟโตไดโอด.....	76
4.4	สรุป.....	82
บทที่ 5	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	83
5.1	การออกแบบระบบทางแสง.....	83
5.1.1	ส่วนอินพุต.....	84
5.1.2	ส่วนเซนซิงยูนิตและใยแก้วนำแสง.....	84
5.1.3	ส่วนรับแสง.....	85
5.2	การศึกษาการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสง.....	87
5.2.1	การศึกษาการแยกโหมดแสงด้วยเกรตติงชนิดส่งผ่าน.....	87
5.2.2	การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง.....	87
5.2.3	การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการขจัดกับการเปลี่ยนแปลงของ โหมดแสง.....	89
5.2.4	การศึกษาเสถียรภาพในการวัดการขจัดเนื่องจากความร้อน.....	90
5.2.5	การศึกษาคุณสมบัติการมีอิสระเชิงทิศทางของระบบการทดลอง.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำและต้องแจ้งชื่อผู้จัดทำเอกสารนี้ไว้ที่ต้นฉบับ

สารบัญ (ต่อ)

5.2 สรุป.....	92
บทที่ 6 ผลของงานวิจัย.....	93
6.1 การออกแบบระบบทางแสง.....	93
6.1.1 ส่วนอินพุต.....	93
6.1.2 ส่วนเซนซิงยูนิทและใยแก้วนำแสง.....	93
6.1.3 ส่วนรับแสง.....	94
6.2 ผลการศึกษาการแยกโหมดของแสงด้วยเกรตติงชนิดส่งผ่าน.....	95
6.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง.....	96
6.3.1 วิธีการหาการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง.....	96
6.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการจัดกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง.....	101
6.5 ผลการศึกษาเสถียรภาพในการวัดการจัดเนื่องจากความร้อน.....	103
6.6 ผลการศึกษาคุณสมบัติการมีฮิสเตอร์ซิซของระบบการทดลอง.....	104
6.7 สรุป.....	111
บทที่ 7 บทสรุปและแนวทางการพัฒนาต่อไป.....	112
7.1 บทสรุป.....	112
7.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น.....	114
7.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป.....	114
เอกสารอ้างอิง.....	118
ภาคผนวก ก. แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออน.....	120
ภาคผนวก ข. อุปกรณ์รับแสงพินโฟโตไดโอด.....	122
ภาคผนวก ค. วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	124
ภาคผนวก ง. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	126
ประวัติผู้เขียน.....	128

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
6.1 แสดงผลการศึกษความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง โดยเปรียบเทียบระหว่างใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวและหลายโหมด.....	98
6.2 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิตกับการขจัด.....	101
6.3 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างการขจัดของเซนซิงยูนิตกับการการเปลี่ยนแปลง ของโหมดแสง โดยใช้ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวและหลายโหมด.....	103
6.4 แสดงผลการทดลองเสถียรภาพของระบบการทดลองเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความร้อน โดยใช้ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวและหลายโหมด.....	104
6.5 แสดงผลการทดลองศึกษาคุณสมบัติการมีฮิสเตอร์ซิสในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสง ชนิดโหมดเดี่ยว.....	105
6.6 แสดงผลการทดลองศึกษาคุณสมบัติการมีฮิสเตอร์ซิสใการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสง ชนิดหลายโหมด.....	106
6.7 แสดงผลการทดลองศึกษาคุณสมบัติการมีฮิสเตอร์ซิสของแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิต ด้วยใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว.....	107
6.8 แสดงผลการทดลองศึกษาคุณสมบัติการมีฮิสเตอร์ซิสของแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิต ด้วยใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด.....	108
6.9 แสดงผลการทดลองศึกษาคุณสมบัติการมีฮิสเตอร์ซิสของความร้อนด้วยใยแก้วนำแสง ชนิดโหมดเดี่ยว.....	109
6.10 แสดงผลการทดลองศึกษาคุณสมบัติการมีฮิสเตอร์ซิสของความร้อนด้วยใยแก้วนำแสง ชนิดโหมดเดี่ยว.....	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการสะท้อนและการหักเหของแสง.....	6
2.2 แสดงการหักเหของแสงเมื่อดัชนีหักเหแสงในแต่ละตัวกลางแตกต่างกัน.....	7
2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมวิกฤต และการสะท้อนกลับหมดที่รอยต่อของสองตัวกลาง.....	7
2.4 แสดงการแทรกสอดแบบหักล้างและเสริมกันของคลื่นสองขบวน.....	8
2.5 แสดงการทดลองการแทรกสอดของโทมัสยัง.....	9
2.6 แสดงการแทรกสอดของแสงเมื่อคลื่นที่จากแหล่งกำเนิดมาพบกันบนฉาก.....	9
2.7 แสดงโครงสร้างทางเรขาคณิตเพื่ออธิบายการทดลองของโทมัสยัง.....	10
2.8 แสดงการกระจายความเข้มของแสงจากการแทรกสอด.....	11
2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของแสงเมื่อมีวัตถุมาขวางการเคลื่อนที่.....	12
2.10 แสดงภาพการหาการกระจายความเข้มแสงจากการเลี้ยวเบนแบบเฟราน์โฮเฟอร์.....	12
2.11 แสดงการกระจายความเข้มของแสงจากการเลี้ยวเบนที่ช่องแคบเดี่ยว.....	14
2.12 แสดงการเลี้ยวเบนของแสงผ่านช่องแคบจำนวนมาก.....	15
2.13 แสดงการกระจายความเข้มของแสงจากการเลี้ยวเบนผ่านเกรตติง.....	17
2.14 แสดงอันดับการเลี้ยวเบนต่างๆ ของแสงหลังจากผ่านเกรตติง.....	19
2.15 แสดงระนาบคลื่นโพลาไรเซชัน.....	20
2.16 แสดงโพลาไรเซชันของสองคลื่นที่มีเฟสตรงกัน.....	22
2.17 แสดงการเคลื่อนที่ของแสงผ่านแผ่นโพลาไรซ์.....	23
2.18 แสดงลักษณะโครงสร้างของใยแก้วนำแสง.....	24
2.19 แสดงโครงสร้างของใยแก้วนำแสงชนิดต่างๆ.....	25
2.20 แสดงภาพการหาค่าโมดัลแอมพลิจูดของใย.....	27
2.21 แสดงภาพความสัมพันธ์ระหว่างความถี่โหมดลไกซ์กับการคงที่การเคลื่อนที่.....	30
2.22 แสดงภาพการกระจายความเข้มของแสงในโหมดต่างๆ ของใยแก้วนำแสง.....	30
3.1 แสดงลักษณะของท่อนำคลื่นแบบระนาบ.....	32
3.2 แสดงการหาค่าคutoffของสมการลักษณะเฉพาะสำหรับท่อนำคลื่นแบบระนาบ.....	39
3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การเคลื่อนที่กับความถี่ของโหมดต่างๆ.....	41
3.4 แสดงภาคตัดขวางและดัชนีหักเหของใยแก้วนำแสงชนิดสเต็ปอินเด็กซ์.....	41
3.5 แสดงเบสเซลฟังก์ชันอันดับที่ n ชนิดที่หนึ่งและสอง.....	45
3.6 แสดงเบสเซลฟังก์ชันที่ถูกเปลี่ยนแปลงอันดับที่ n ชนิดที่หนึ่งและสอง.....	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 แสดงลักษณะของกราฟ $J_0(u)$ และ $J'_0(u)$	51
3.8 แสดงลักษณะของกราฟทางด้านซ้ายของสมการ (3.79).....	52
3.9 แสดงลักษณะของกราฟ $K_0(w)$ และ $K'_0(w)$	52
3.10 แสดงลักษณะของกราฟทางด้านขวาของสมการ (3.79).....	52
3.11 แสดงลักษณะกราฟสมการลักษณะเฉพาะของสมการ (3.79).....	53
3.12 แสดงลักษณะของกราฟคำตอบของสมการกำลังสอง (3.110).....	57
3.13 แสดงลักษณะของโหมด LP_{11}	63
3.14 แสดงลักษณะของโหมด LP_{12}	63
3.15 แสดงลักษณะของโหมด LP_{21}	64
3.16 แสดงลักษณะของโหมด LP_{22}	64
4.1 แสดงลักษณะการโค้งงอที่มีรัศมีความโค้งมาก และรัศมีความโค้งน้อย.....	66
4.2 แสดงลักษณะของเซนซิงยูนิต.....	68
4.3 แสดงแผนภาพระดับพลังงานของเลเซอร์ฮีเลียมนีออน.....	71
4.4 แสดงโครงสร้างภายในของเลเซอร์ฮีเลียมนีออน.....	72
4.5 แสดงมุมบริวสเตอร์เพื่อทำให้แสงเลเซอร์เป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น.....	72
4.6 แสดงลักษณะของโหมดตามขวาง TEM_{00} TEM_{01} TEM_{10} และ TEM_{11}	74
4.7 แสดงรูปแบบโครงสร้างของพินโฟโตไดโอดและการไบแอสให้พินโฟโตไดโอด.....	76
4.8 แสดงการไหลของอิเล็กตรอนในรอยต่อของพินโฟโตไดโอด.....	77
4.9 แสดงรูปแบบการใช้งานของพินโฟโตไดโอดและวงจรสมมูล.....	79
5.1 แสดงระบบและเครื่องมือทดลองในการศึกษาความเป็นไปได้ของการวัดการขจัดด้วย ใยแก้วนำแสง.....	83
5.2 แสดงส่วนอินพุตในการป้อนแสงจากเลเซอร์ฮีเลียมนีออนเข้าสู่ใยแก้วนำแสง.....	84
5.3 แสดงส่วนเซนซิงยูนิตและใยแก้วนำแสงพร้อมทั้งชุดไมโครมิเตอร์ใช้สำหรับวัดการขจัด ของเซนซิงยูนิต.....	85
5.4 แสดงส่วนรับแสงและเครื่องมือของระบบการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัด ด้วยใยแก้วนำแสง.....	86
5.5 แสดงการจัดอุปกรณ์การทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิต กับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง.....	89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6 แสดงใยแก้วนำแสงถูกแรงกระทำบนเส้นเชิงยูนิต.....	89
5.7 แสดงการจัดอุปกรณ์การทดลองศึกษาเสถียรภาพของระบบการวัดการขจัด เนื่องจากความร้อน.....	91
6.1 แสดงลักษณะของเซนเชิงยูนิตที่ใช้ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัด.....	94
6.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำบนเซนเชิงยูนิตกับการเปลี่ยนแปลง ของโหมดแสง โดยเปรียบเทียบระหว่างใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวและหลายโหมด.....	97
6.3 แสดงระยะห่างระหว่างโหมดแสงเมื่อใช้ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว เมื่อยังไม่มีแรงกระทำบนเซนเชิงยูนิต.....	98
6.4 แสดงระยะห่างระหว่างโหมดแสงเมื่อใช้ใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด เมื่อยังไม่มีแรงกระทำบนเซนเชิงยูนิต.....	99
6.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงเมื่อมีแรงกระทำบนเซนเชิงยูนิต โดยใช้ใยแก้วนำแสง ชนิดโหมดเดี่ยว.....	99
6.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงเมื่อมีแรงกระทำบนเซนเชิงยูนิต โดยใช้ใยแก้วนำแสง ชนิดหลายโหมด.....	100
6.7 แสดงวิธีการหาการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง.....	100
6.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขจัดของเซนเชิงยูนิตกับแรงกระทำบนเซนเชิงยูนิต.....	102
6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขจัดของเซนเชิงยูนิตกับการเปลี่ยนแปลง ของโหมดแสง โดยเปรียบเทียบระหว่างใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวและหลายโหมด.....	102
6.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง โดยเปรียบเทียบระหว่างใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวและหลายโหมด.....	104
6.11 แสดงคุณสมบัติการมีอิสระทิศในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว.....	106
6.12 แสดงคุณสมบัติการมีอิสระทิศในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด.....	107
6.13 แสดงคุณสมบัติการมีอิสระทิศในการวัดแรงที่กระทำบนเซนเชิงยูนิตด้วย ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว.....	108
6.14 แสดงคุณสมบัติการมีอิสระทิศในการวัดแรงที่กระทำบนเซนเชิงยูนิตด้วย ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว.....	109
6.15 แสดงคุณสมบัติการมีอิสระทิศของอุณหภูมิด้วยใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว.....	110
6.16 แสดงคุณสมบัติการมีอิสระทิศของอุณหภูมิด้วยใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด.....	111

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.1 แสดงลักษณะของโยแก้วนาแสงเกรตติงเมื่อบริเวณแกนถูกสร้างขึ้นให้มีดัชนีหักเหแสงแตกต่างกันเป็นคาบ d	114
7.2 แสดงลักษณะระบบการทดลองเพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาต่อไป.....	115



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสง โดยใช้ใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดี่ยวและหลายโหมค ซึ่งมีรายละเอียดในส่วนของความเป็นมาของงานวิจัย วัตถุประสงค์ และขั้นตอนการดำเนินงาน ตลอดจนประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยดังต่อไปนี้

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ปัจจุบันใยแก้วนำแสงได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการนำไปใช้งานด้านการสื่อสาร และการตรวจวัดเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เพราะใยแก้วนำแสงมีข้อดีอยู่หลายประการเช่น มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ปราศจากการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีการลดทอนของสัญญาณในระดับต่ำมาก และสามารถส่งสัญญาณได้ครั้งละมากๆ อีกทั้งยังเหมาะสำหรับงานด้านการตรวจวัดระยะไกลและเครือข่ายเป็นต้น จากข้อดีที่ได้กล่าวมานี้จึงทำให้เทคโนโลยีใยแก้วนำแสงมีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว และการพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้กับการสื่อสารและการตรวจวัดด้วยใยแก้วนำแสงก็ได้มีการพัฒนาควบคู่กันไปอย่างไม่หยุดยั้ง ดังนั้นการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์การสื่อสารและการตรวจวัดด้วยใยแก้วนำแสงจึงมีแพร่หลายอยู่โดยทั่วไป

ในการศึกษาการตรวจวัดปริมาณต่างๆ ทางฟิสิกส์นั้นถือว่ามีความสำคัญมากในเรื่องของระบบการวัดทางวิทยาศาสตร์ เทคนิคหนึ่งที่ใช้กันมากคือการตรวจวัดด้วยเทคนิคทางแสงและการตรวจวัดด้วยใยแก้วนำแสง ซึ่งมีการใช้กันอย่างแพร่หลายโดยนำมาตรวจวัดและศึกษาปริมาณต่างๆ เช่น การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำและการประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัด [1] อุปกรณ์ตรวจวัดความดันทางแสงโดยการใช้แหล่งกำเนิดแสงความยาวอาพันธ์ต่ำ [2] และการศึกษาคุณสมบัติของไดโอดเลเซอร์สำหรับการวัดด้วยอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน [3] โดยปริมาณหนึ่งที่น่าสนใจคือการวัดการขจัด ซึ่งถือว่ามีความสำคัญมากในเรื่องของการวัดและระบบมาตรวิทยาศาสตร์ ไม่ว่าจะเป็นในระบบขนาดใหญ่เช่น ระยะทางระหว่างดวงดาวไปจนถึงระยะทางระหว่างอะตอมในโมเลกุล จากงานวิจัยในอดีตพบว่าส่วนใหญ่แล้วจะใช้แหล่งกำเนิดแสงความยาวอาพันธ์ต่ำในระบบการตรวจวัด สำหรับการวัดด้วยไดโอดเลเซอร์ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสงบรอดแบนด์กล่าวคือเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ให้แสงหลายความยาวคลื่นในการตรวจวัดอย่างละเอียดก็เป็นอีกวิธีหนึ่งส่วนใหญ่อาศัยหลักการของอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน โดยความสามารถในการวัดได้มีการพัฒนาให้ดีขึ้นได้ด้วยการใช้แหล่งกำเนิดแสง 2 แหล่ง [4] จากงานวิจัยนี้มีข้อดีคือมีความสามารถในการเลือกความละเอียดในการวัดได้ แต่เนื่องจากต้องใช้นแหล่งกำเนิดแสงถึงสองชนิดจึงทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายอีกทั้งไดโอดเลเซอร์มีวงจรขับเคลื่อนที่ทำให้ไดโอดเลเซอร์เสถียร

หายได้ง่ายเนื่องจากการไม่คงที่ของแหล่งจ่ายไฟ สำหรับงานวิจัยในการตรวจวัดตำแหน่งหรือการขจัดนั้นได้มีการพัฒนาโดย P.V.P. Yupapin et. al. [5] ซึ่งใช้ใยแก้วนำแสงชนิดอนุกรมสถานะโพลาไรซ์เป็นตัวกลาง และใช้อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบไมเคลสันในการตรวจวัด งานวิจัยนี้ได้ใช้แหล่งกำเนิดแสงไดโอดเลเซอร์ซึ่งเป็นแสงอาพันธ์ต่ำ ซึ่งมีวงจรถับกระแสที่ทำให้ไดโอดเลเซอร์เสียหายได้ง่ายเนื่องจากการไม่คงที่ของแหล่งจ่ายไฟ อีกทั้งระบบการตรวจวัดมีความซับซ้อน งานวิจัยที่ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับความถูกต้องของการวัดการขจัดอย่างละเอียดด้วยใยแก้วนำแสงอีกงานหนึ่งซึ่งทำการวิจัยโดย K. Weir et. al. [6] ใช้ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวโดยนำมาทำเป็นอุปกรณ์คู่ควบ (Coupler) เพื่อเป็นตัวกลางในการเคลื่อนที่ของแสงโดยที่ปลายด้านหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นหัววัดการขจัดขนาดเล็กจากการสั่นสะเทือน และทำการตรวจวัดด้วยอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน ในทำนองเดียวกันกับงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้ว นั่นคืองานวิจัยนี้ได้ใช้ไดโอดเลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงเช่นเดียวกัน

จากงานวิจัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเห็นได้ว่าใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดเป็นส่วนใหญ่ซึ่งเป็นแสงอาพันธ์ต่ำ จึงเหมาะสมกับการใช้งานในระบบการตรวจวัดด้วยอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบไมเคลสันและการประยุกต์ อย่างไรก็ตามในการใช้งานยังมีปัญหาเกี่ยวกับอายุการใช้งานและความซับซ้อนของวงจรถับกระแสของแหล่งกำเนิดแสง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพยายามที่จะนำแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่มีอยู่ทั่วไปซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสงความยาวอาพันธ์สูงโดยมีวงจรถับกระแสที่ไม่ซับซ้อนและมีเสถียรภาพมาใช้ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสง อีกทั้งยังเป็นการพัฒนาแนวคิดในการทำเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดการขจัดที่มีระบบการทดลองไม่ซับซ้อนทำการตรวจวัดได้อย่างสะดวก

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

จากการที่การตรวจวัดด้วยใยแก้วนำแสงสามารถนำมาตรวจวัดปริมาณต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสงโดยมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญดังนี้

- 1.2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาแนวคิดใหม่ในการตรวจวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสง
- 1.2.3 เพื่อศึกษาคุณสมบัติต่างๆ เช่น เสถียรภาพในการวัดการขจัดเนื่องจากความร้อน คุณสมบัติการมีฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ของระบบการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 การดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยในเรื่องการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสงนี้ เริ่มต้นจากการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบการทดลองคือ การเคลื่อนที่ของแสงในใยแก้วนำแสง การเลี้ยวเบนของแสงเมื่อผ่านเกรตติงชนิดส่งผ่าน และการเปลี่ยนแปลงโหมดแสงที่เกิดขึ้นที่ใยแก้วนำแสงเนื่องจากสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมภายนอกที่กระทำผ่านเซนซิงยูนิต (Sensing Unit) นี้จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างดัชนีหักเหแสงของใยแก้วนำแสงมีผลทำให้โหมดแสงที่เกิดขึ้นที่ใยแก้วนำแสงเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยแล้วก็ได้ออกแบบและศึกษาระบบการทดลองหลังจากนั้นเป็นการทดลองระบบและศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงที่เกิดขึ้นที่ใยแก้วนำแสงเนื่องจากสิ่งแวดล้อมภายนอกคือ การขจัดของเซนซิงยูนิต แรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิต นอกจากนี้ยังศึกษาถึงเสถียรภาพของระบบการทดลองเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความร้อน และศึกษาคุณสมบัติการมีฮิสเตอรีซิสของระบบการทดลองอีกด้วย

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงที่เกิดขึ้นที่ใยแก้วนำแสงนั้นได้แบ่งหัวข้อออกเป็นการศึกษาการแยกโหมดของแสงด้วยเกรตติงชนิดส่งผ่าน การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการขจัดของเซนซิงยูนิตกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง การศึกษาเสถียรภาพในการวัดการขจัดเนื่องจากความร้อน และการศึกษาคุณสมบัติการมีฮิสเตอรีซิสของระบบการทดลอง การศึกษาการแยกโหมดของแสงด้วยเกรตติงชนิดส่งผ่านได้เริ่มจากการสังเกตจำนวนโหมดของแสงหลังจากถูกแยกด้วยเกรตติงชนิดส่งผ่าน นอกจากนี้ยังทดลองเปลี่ยนระยะระหว่างเกรตติงกับอุปกรณ์รับแสงแล้วตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงในแต่ละโหมด ระยะห่างระหว่างโหมดแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวและหลายโหมดเป็นตัวกลางในการเคลื่อนที่ของแสง จากการทดลองโหมดแสงที่แยกด้วยเกรตติงชนิดส่งผ่านจะเป็นไปตามสมการของเกรตติง ส่วนการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการขจัดของเซนซิงยูนิตและแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิตกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงนั้น ได้เริ่มจากการศึกษาการหาค่าถึงแยกและขีดจำกัดของแรงที่สามารถใช้ในงานวิจัยนี้ได้โดยการทดลองเพิ่มมวลบนเซนซิงยูนิตแล้วตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างโหมดแสง จากการทดลองมวลที่น้อยที่สุดจะเป็นค่าถึงแยกของแรงและมวลมากที่สุดซึ่งทำให้หมดสภาพความโค้งงอของใยแก้วนำแสงจะเป็นขีดจำกัดของแรง เมื่อได้ช่วงของแรงที่สามารถใช้งานได้แล้วจึงทำการเพิ่มมวลค่าต่างๆ พร้อมทั้งตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงจึงทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิตกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงได้ เพื่อเป็นการศึกษาการวัดการขจัดงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิตกับการขจัดของเซนซิงยูนิต ทำให้ได้การขจัดค่าต่างๆ พร้อมทั้งตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง จึงทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างการขจัดของเซนซิงยูนิตกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงได้เช่นเดียวกัน ส่วน

การศึกษาสเปกตรภาพในการวัดการขจัดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความร้อน โดยงานวิจัยนี้จะเน้นศึกษาช่วงอุณหภูมิของประเทศไทยเป็นสำคัญ ในการทดลองได้ใช้ระยะห่างระหว่างโหมดแสงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นค่าอ้างอิง จากนั้นทดลองเพิ่มอุณหภูมิ 4 ค่าคือ 30 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแต่ละค่าจะทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง สำหรับการศึกษาในหัวข้อสุดท้ายคือ การศึกษาคุณสมบัติการมีฮิสเทอรีซิสของระบบการทดลองในการวัดการขจัดของเซนซิงยูนิท แรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิท และความร้อน โดยการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองข้างต้นเพียงแต่เมื่อเพิ่มปริมาณต่างๆ แล้วเสร็จจะทำการทดลองลดปริมาณเหล่านั้นลงอีกครั้ง พร้อมทั้งตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงจึงสามารถตรวจสอบคุณสมบัติการมีฮิสเทอรีซิสได้

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางการส่งเสริมและพัฒนาเทคโนโลยีด้านการตรวจวัดด้วยใยแก้วนำแสงโดยเฉพาะการตรวจวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสง ด้วยการศึกษาแนวคิดใหม่ในการตรวจวัดและทำอุปกรณ์ตรวจวัดต้นแบบขึ้น อีกทั้งคาดว่าจะยังสามารถนำไปประยุกต์เพื่อวัดปริมาณอื่นๆ ได้อีกเช่น ความเครียด และการสั่นสะเทือน เป็นต้น จึงทำให้การตรวจวัดกว้างขวางขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีด้านการตรวจวัดด้วยใยแก้วนำแสงโดยอาศัยกระบวนการวิจัยเป็นเครื่องมือ ซึ่งทำให้เกิดทักษะในการวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ ตลอดจนได้เรียนรู้เทคนิคการป้อนแสงเข้าสู่ใยแก้วนำแสง และได้ศึกษาวิธีการใช้งานอุปกรณ์ทางแสงอื่นๆ เช่น แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ อีเลียมนีออน และอุปกรณ์รับแสง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีเบื้องต้นของแสง และใยแก้วนำแสง

การศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสงในงานวิจัยนี้สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการและทฤษฎีทางแสง ดังนั้นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานทางแสง และใยแก้วนำแสง เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษางานวิจัยที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อย่างไรก็ตามการกล่าวถึงทฤษฎีทางแสงให้ครอบคลุมเนื้อหาทั้งหมดนั้นไม่สามารถทำได้ ดังนั้นผู้เขียนจึงเลือกส่วนที่สำคัญ และเกี่ยวข้องโดยตรงกับการศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสงเท่านั้น ซึ่งมีรายละเอียดดังจะกล่าวต่อไป

2.1 ความรู้ทางแสงเบื้องต้น

2.1.1 การหักเหและการสะท้อน (Refraction and Reflection)

เมื่อกล่าวถึงการเคลื่อนที่ของแสงในตัวกลางต่างๆ [7] นั้นต้องคำนึงถึงตัวแปรสำคัญคือ ดัชนีหักเหแสง (Refractive Index) ซึ่งเป็นตัวแปรที่แสดงอัตราส่วนระหว่างความเร็วของแสงในสุญญากาศเทียบกับความเร็วของแสงในตัวกลางที่เคลื่อนที่ผ่าน ถ้ากำหนดให้ความเร็วของแสงในสุญญากาศแทนได้ด้วย c มีค่าประมาณ 3×10^8 เมตรต่อวินาทีและให้ความเร็วของแสงในตัวกลางต่างๆ มีค่าเป็น v ดังนั้นจะได้ค่าดัชนีหักเหแสงสำหรับตัวกลางต่างๆ สอดคล้องกับสมการดังนี้

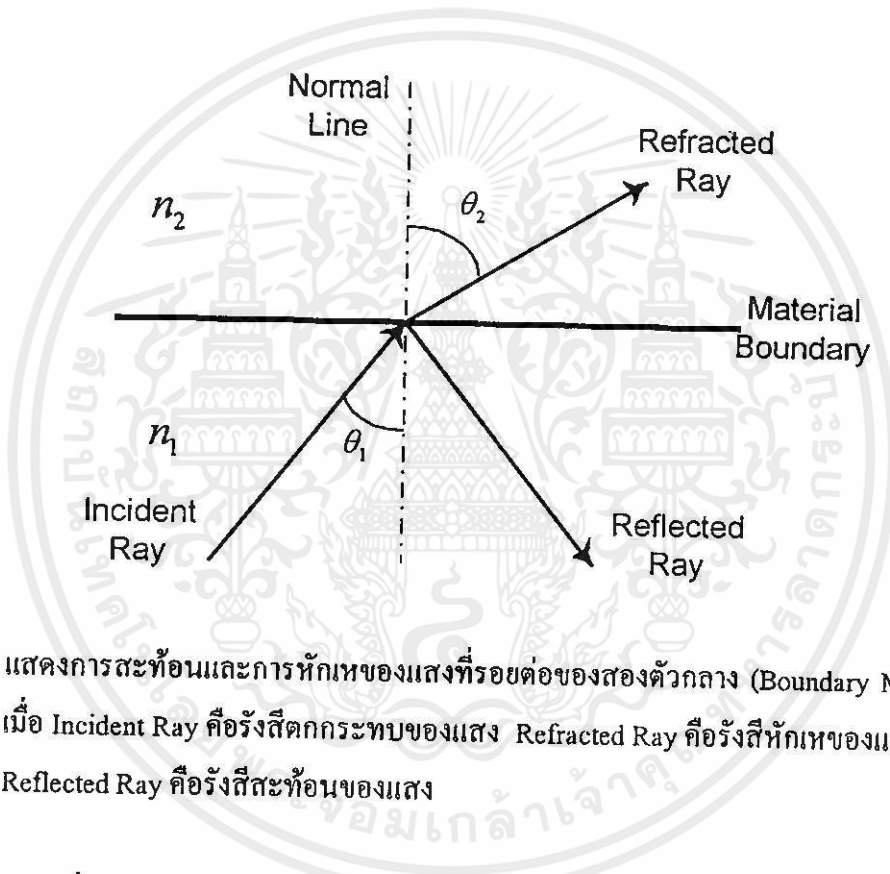
$$n = \frac{c}{v} \quad (2.1)$$

จากสมการนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางต่างๆ ความเร็วของแสงจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าดัชนีหักเหแสงของแต่ละตัวกลางเช่น ดัชนีหักเหแสงของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 1.00 ดัชนีหักเหแสงของน้ำมีค่าเท่ากับ 1.33 ดัชนีหักเหแสงของแก้วมีค่าเท่ากับ 1.50 และดัชนีหักเหแสงของแกลเลียมอาเซนาย (Gallium Arsenide) มีค่าเท่ากับ 3.35 เป็นต้น เมื่อพิจารณาในส่วนของการสะท้อนและการหักเหแสงที่รอยต่อของตัวกลางแสงดังรูปที่ 2.1 กล่าวคือเมื่อแสงเคลื่อนที่ไปยังรอยต่อของตัวกลางแสงที่มีดัชนีหักเหแตกต่างกันสองตัวกลาง (n_1, n_2) พบว่าบางส่วนของแสงจะสะท้อนกลับไปในตัวกลางแรก (n_1) และแสงส่วนที่เหลือจะหักเหผ่านไปยังตัวกลางแสงที่สอง (n_2) การหักเหของแสงเกิดขึ้นเนื่องจากผลต่างของความเร็วแสงในตัวกลางทั้งสอง ความสัมพันธ์ดังกล่าวมานี้เรียกว่า กฎของสเนล (Snell's Law) ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์

ระหว่างมุมของการหักเหและสะท้อนของแสง กับดัชนีหักเหแสงของตัวกลางทั้งสองดังสมการต่อไปนี้

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.2)$$

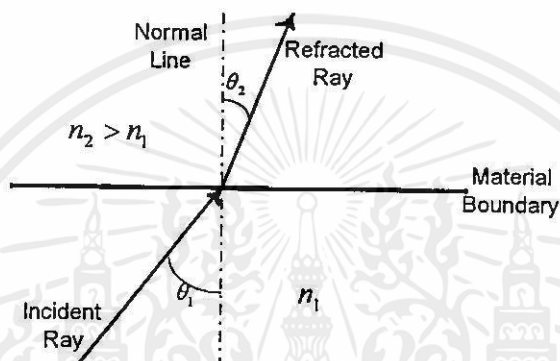
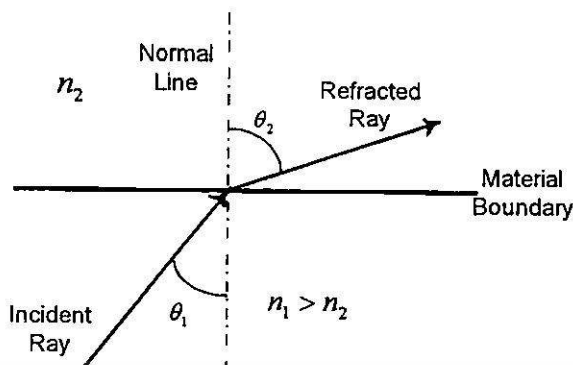
เมื่อ n_1 และ n_2 คือดัชนีหักเหแสงในตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2 ตามลำดับ θ_1 คือมุมของรังสีของแสงตกกระทบเทียบกับเส้นปกติซึ่งตั้งฉากกับรอยต่อตัวกลางแสง และ θ_2 คือมุมของรังสีหักเหที่กระทำกับเส้นปกติและเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อของตัวกลางแสง



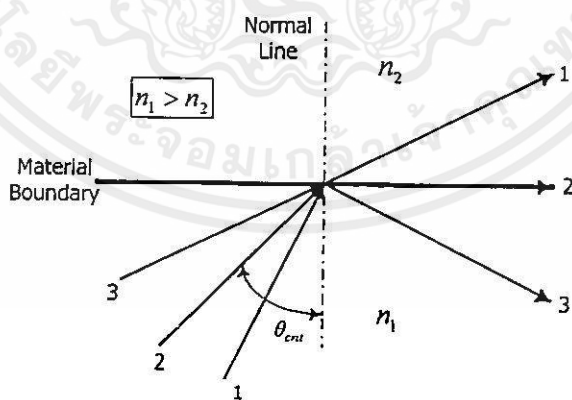
รูปที่ 2.1 แสดงการสะท้อนและการหักเหของแสงที่รอยต่อของสองตัวกลาง (Boundary Material) เมื่อ Incident Ray คือรังสีตกกระทบของแสง Refracted Ray คือรังสีหักเหของแสง และ Reflected Ray คือรังสีสะท้อนของแสง

จากรูปที่ 2.1 แสดงการสะท้อนและการหักเหแสงที่รอยต่อของตัวกลางแสงนั้น โดยทิศทางของการหักเหแสงจะขึ้นอยู่กับค่าดัชนีหักเหแสงของตัวกลางทั้งสอง โดยถ้า $n_1 > n_2$ แล้วจะทำให้การหักเหแสงเบนออกจากเส้นปกติ (Normal Line) และถ้า $n_2 > n_1$ แล้วจะทำให้การหักเหแสงเบนเข้าหาเส้นปกติดังรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงการหักเหของแสงเมื่อดัชนีหักเหแสงในแต่ละตัวกลางแตกต่างกัน เมื่อรังสีตกกระทบบนของแสงทำมุมตกกระทบบนที่ โดยรูปบน $n_1 > n_2$ ทำให้รังสีหักเหเบนออกจากเส้นปกติ และรูปล่าง $n_2 > n_1$ ทำให้รังสีหักเหเบนเข้าหาเส้นปกติ



รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมวิกฤติ θ_{crit} และการสะท้อนกลับหมดที่รอยต่อระหว่างสองตัวกลาง เมื่อ $n_1 > n_2$ โดย 1 คือรังสีตกกระทบบนที่ทำมุมน้อยกว่ามุมวิกฤติ 2 คือรังสีตกกระทบบนที่ทำให้เกิดมุมวิกฤติ และ 3 คือรังสีตกกระทบบนซึ่งทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมด

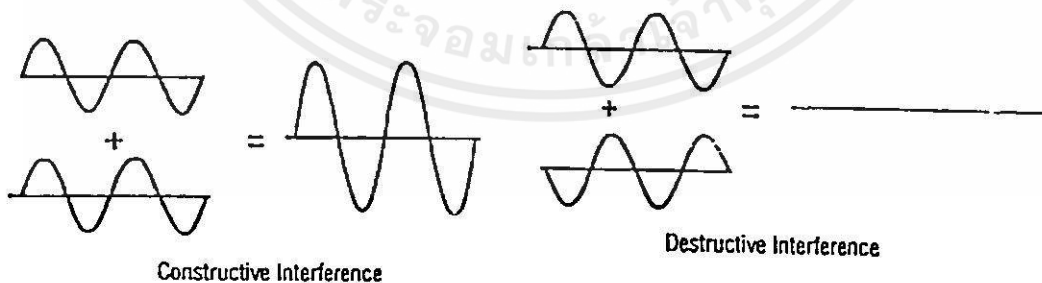
เมื่อพิจารณารอยต่อของตัวกลางแสงดังรูปที่ 2.3 โดยกำหนดให้ $n_1 > n_2$ การสะท้อนและการหักเหแสงจะเป็นไปตามสมการ (2.2) ถ้ามุมตกกระทบ θ_1 เพิ่มขึ้นจนกระทั่งแนวทางเดินของแสงในตัวกลางแรกขนานไปกับผิวระนาบของตัวกลางที่สองแล้วจะเรียกมุมตกกระทบนี้ว่า มุมวิกฤติ θ_{crit} (Critical Angle) เมื่อมุมตกกระทบมีค่ามากกว่ามุมวิกฤติจะทำให้แสงเกือบทั้งหมดเกิดการสะท้อนกลับเข้าสู่ภายในตัวกลางเดิมดังรูปที่ 2.3 ซึ่งจะเรียกว่า การสะท้อนกลับหมด (Total Internal Reflection) จากหลักการดังกล่าวสามารถหามุมวิกฤติได้จากสมการต่อไปนี้

$$\theta_{crit} = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2.3)$$

สมการ (2.3) นี้แสดงให้เห็นว่ามุมวิกฤติมีความสัมพันธ์กับดัชนีหักเหแสงของตัวกลางทั้งสองหรืออาจกล่าวได้ว่ามุมวิกฤติสัมพันธ์กับความเร็วของแสงในตัวกลางทั้งสองนั่นเอง

2.1.2 การแทรกสอด (Interference)

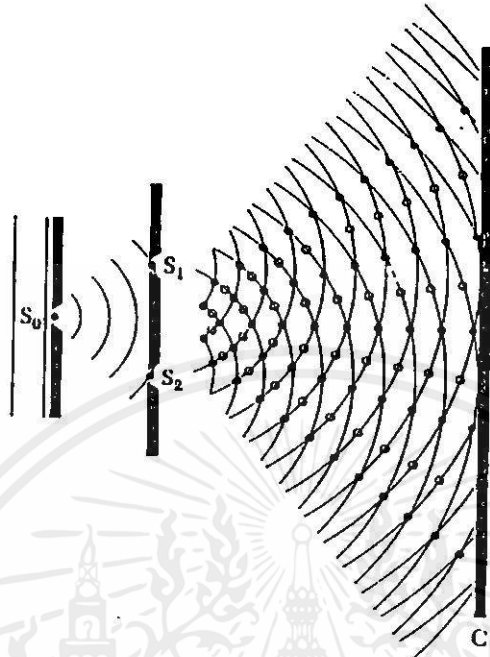
การแทรกสอดเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้กับคลื่นทุกชนิดทั้งคลื่นตามขวางเช่น คลื่นแสง และคลื่นตามยาวเช่น คลื่นเสียง เป็นต้น โดยการแทรกสอดเกิดขึ้นเมื่อคลื่นสองขบวนหรือมากกว่ามาพบกันที่ตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งผลที่ได้จากการแทรกสอดสามารถที่จะอธิบายได้ในเทอมของเฟสและแอมพลิจูดของคลื่นแต่ละขบวน ซึ่งทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน (Constructive Interference) หรือการแทรกสอดแบบหักล้างกัน (Destructive Interference) ในการแทรกสอดแบบเสริมกันจะมีผลทำให้แอมพลิจูดของคลื่นลัพธ์มีค่ามากกว่าแอมพลิจูดของคลื่นแต่ละขบวน ส่วนในการแทรกสอดแบบหักล้างกันจะมีผลทำให้แอมพลิจูดของคลื่นลัพธ์มีค่าน้อยกว่าแอมพลิจูดของคลื่นแต่ละขบวนแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการแทรกสอดแบบหักล้างและแบบเสริมกันของคลื่นสองขบวน โดยการแทรก

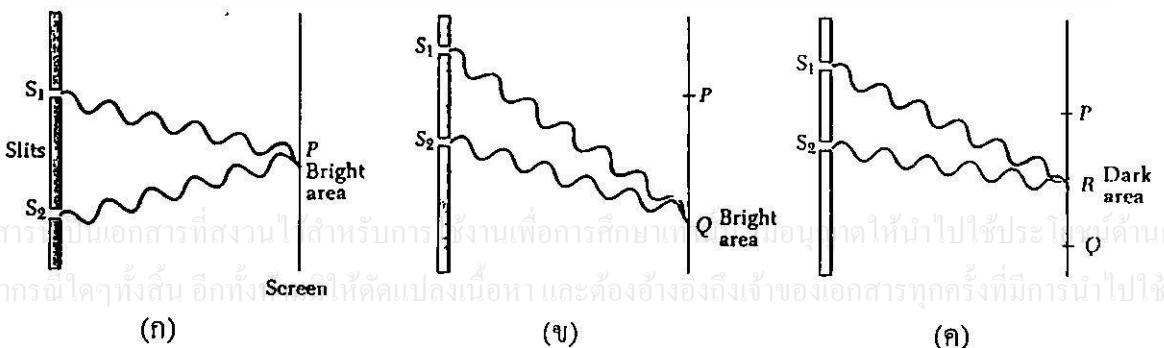
สอดแบบเสริมกันมีผลทำให้แอมพลิจูดของคลื่นลัพธ์มีค่ามากกว่าแอมพลิจูดของคลื่นแต่ละขบวน ในการแทรกสอดแบบหักล้างกันมีผลทำให้แอมพลิจูดของคลื่นลัพธ์มีค่าน้อยกว่าแอมพลิจูดของคลื่นแต่ละขบวน

การทดลองที่แสดงให้เห็นว่าคลื่นแสงสามารถแทรกสอดกันได้ ซึ่งพิจารณาได้จากการทดลองโดยโทมัส ยังก์ (Thomas Young) ดังรูปที่ 2.5 [8]



รูปที่ 2.5 แสดงการทดลองการแทรกสอดของโทมัสยังก์

จากรูป s_0 เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นที่ให้แสงความยาวคลื่นเดียว s_1 และ s_2 เป็นช่องแคบ (Slits) ขนาดเล็กมากๆ สองช่องอยู่บนฉากที่วางใกล้กัน และอยู่ห่างจาก s_0 น้อยมาก หน้าคลื่นที่ไปถึง s_1 และ s_2 เป็นหน้าคลื่นเดียวกันตามหลักของฮอยเกนส์ (Huygen's Principle) ที่กล่าวว่า "ทุกๆ จุดบนหน้าคลื่นอาจถือได้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดของคลื่นใหม่ซึ่งแผ่ออกไปทุกทิศทางด้วยความเร็วเท่าเดิมเมื่ออยู่ในตัวกลางเดิม ตำแหน่งของหน้าคลื่นใหม่จะเป็นผิวสัมผัสกับคลื่นลูกใหม่เหล่านี้" ดังนั้น s_1 และ s_2 ถือว่าเป็นจุดกำเนิดคลื่นใหม่ได้ ซึ่งมีความถี่และเฟสตรงกันเพราะว่าอยู่บนหน้าคลื่นเดียวกันเพราะฉะนั้น s_1 และ s_2 จึงเป็นคลื่นอาพันธ์ โดยมีฉาก C ที่อยู่ไกลมากเมื่อเทียบกับระยะระหว่าง s_1 และ s_2 ทำให้หาเงื่อนไขที่ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันและแบบหักล้างกันได้

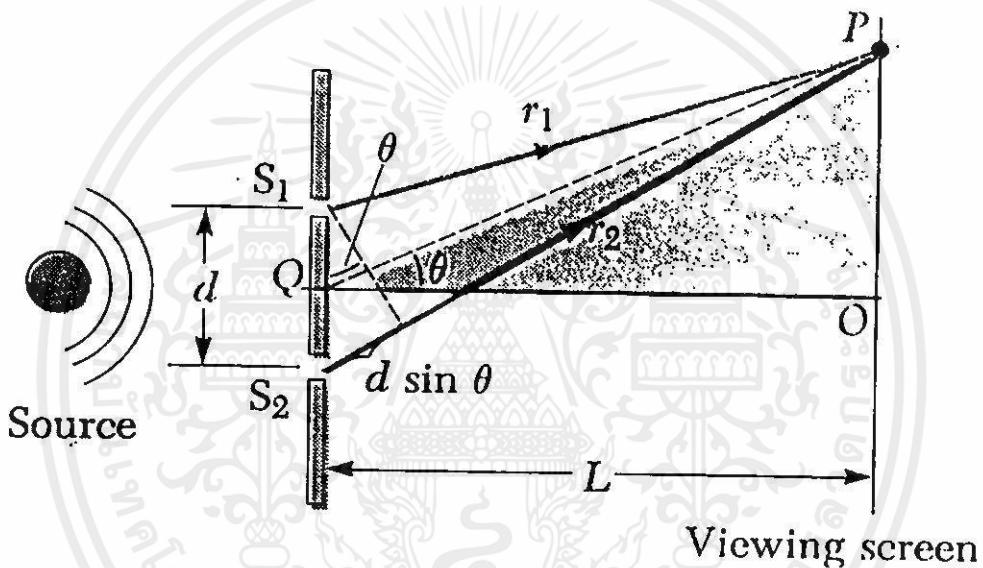


รูปที่ 2.6 แสดงการแทรกสอดของแสงซึ่งเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดแสงมาพบกันบนฉาก

จากรูป 2.6 (ก) แสงจาก s_1 และ s_2 ซึ่งมีเฟสตรงกันเดินทางมาพบกันและรวมกันที่ตำแหน่ง P บนฉาก (Screen) โดยระยะ s_1P เท่ากับระยะ s_2P จึงทำให้มีเฟสตรงกันเมื่อพบกันที่จุด P เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน โดยปรากฏเป็นแถบสว่าง (Bright Area)

จากรูปที่ 2.6 (ข) ถ้าคลื่นที่มีเฟสตรงกันจาก s_1 และ s_2 มาพบกันที่ตำแหน่ง Q โดยคลื่นขบวนบนเดิมทางมากกว่าคลื่นขบวนล่างอยู่หนึ่งความยาวคลื่นพอดีและยังมีเฟสตรงกัน เมื่อพบกันที่ฉากจึงเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน โดยปรากฏเป็นแถบสว่าง

จากรูป 2.6 (ค) ถ้าคลื่นที่มีเฟสตรงกันจาก s_1 และ s_2 มาพบกันที่ตำแหน่ง R โดยคลื่นขบวนบนเดินทางมากกว่าคลื่นขบวนล่างอยู่ครึ่งความยาวคลื่น เมื่อพบกันเฟสจะตรงกันข้ามเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกัน จึงปรากฏเป็นแถบมืด (Dark Area) บนฉาก



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างทางเรขาคณิตเพื่ออธิบายการทดลองของโทมัสยัง

จากรูปที่ 2.7 เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิด (Source) เคลื่อนที่ผ่านช่องแคบ s_1 และ s_2 อยู่ห่างกันเป็นระยะ d มีฉากวางห่างออกไปเป็นระยะตั้งฉากเท่ากับ L ความแตกต่างของระยะทาง (Path Difference) Δ ที่คลื่นทั้งสองขบวนเดินทางมาพบกันที่ P เท่ากับ $s_1P - s_2P$ หรือเท่ากับ $r_2 - r_1$ โดยระนาบของช่องแคบที่จุด Q ทำมุม θ กับแกนที่ลากจากกึ่งกลางของ s_1 และ s_2 ถึงฉากที่จุด P ตามสมการ $\Delta = r_2 - r_1 = d \sin \theta$ เมื่อ $L \gg d$ ถ้าความแตกต่างของระยะทางของคลื่นสองขบวนเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นแสงที่ P จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน แต่ถ้าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นแสงที่ P จะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกันตามสมการต่อไปนี้

$$\Delta = d \sin \theta = p\lambda \quad p = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

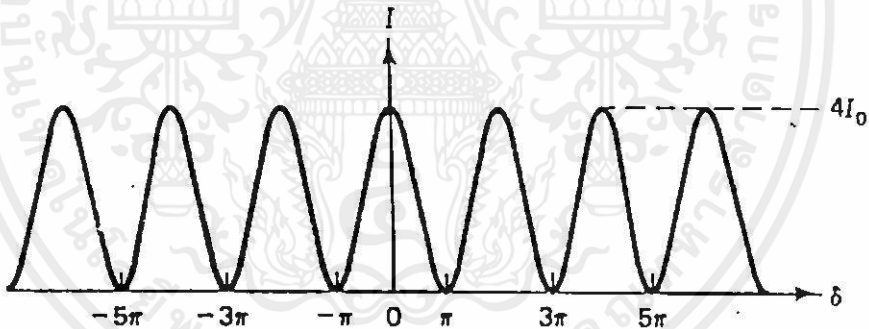
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta = d \sin \theta = \left(p + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad p = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.5)$$

โดยค่า p แสดงอันดับของริ้วการแทรกสอดแบบเสริมกันและแบบหักล้างกัน เครื่องหมาย \pm ของค่า p แสดงการแทรกสอดทั้งสองด้านสมมาตรกัน ซึ่งมีการกระจายความเข้มแสง (Irradiance) ของการแทรกสอดเป็นไปตามสมการต่อไปนี้ [9]

$$I = 4I_0 \cos^2 \alpha = 4I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2} \quad (2.6)$$

เมื่อ $\alpha = \frac{1}{2} kd \sin \theta = \frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}$ จากสมการ (2.6) นี้แสดงให้เห็นว่าการกระจายความเข้มของการแทรกสอดจะเปลี่ยนแปลงตามความแตกต่างทางเดินแสง $\Delta = d \sin \theta$ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความต่างเฟสโดย $\delta = k\Delta$ เมื่อ k คือค่าคงที่การเคลื่อนที่ของคลื่นในสุญญากาศ สามารถแสดงการกระจายความเข้มแสงของการแทรกสอดได้ดังรูปที่ 2.8

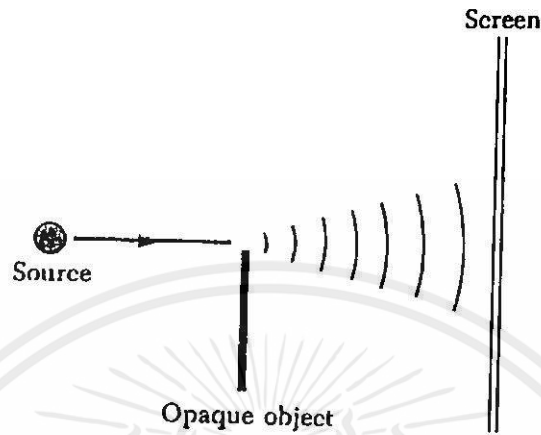


รูปที่ 2.8 แสดงการกระจายความเข้มแสงจากการแทรกสอด สัมพันธ์กับความต่างเฟสตามสมการ (2.6) โดยเมื่อความต่างเฟส δ ของแสงจากแหล่งกำเนิด s_1 และ s_2 มีค่าเท่ากับ $0, 2\pi, 4\pi$ และ 6π เป็นต้น จะมีความเข้มแสงสูงสุดคือ $I_{\max} = 4I_0$ และเมื่อ $\delta = \pi, 3\pi, 5\pi$ และ 7π เป็นต้น จะมีความเข้มแสงต่ำที่สุดคือ $I_{\min} = 0$

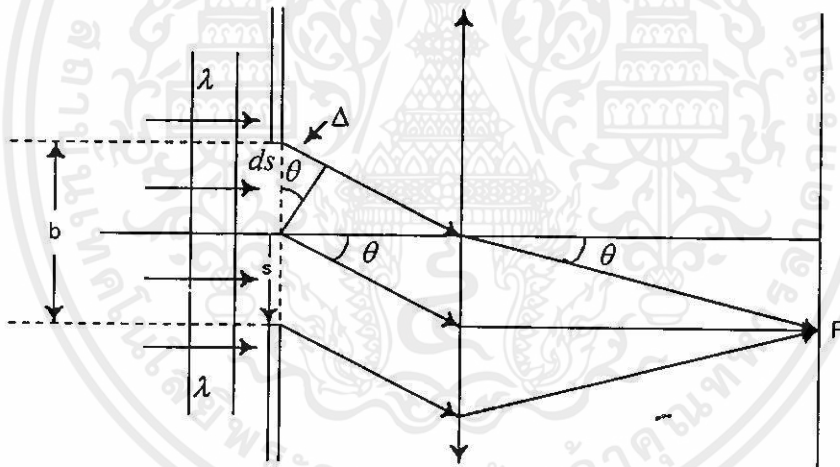
2.1.3 การเลี้ยวเบน (Diffraction)

การเลี้ยวเบนเป็นปรากฏการณ์อย่างหนึ่งที่แสดงคุณสมบัติความเป็นคลื่น กล่าวคือเมื่อคลื่นจากแหล่งกำเนิดถูกกีดขวางด้วยสิ่งกีดขวาง (Opaque Object) ซึ่งอาจเป็นฉากซึ่งมีรูเปิดเล็กๆ หรือช่องแคบที่จะปล่อยให้คลื่นผ่านไปได้ หรือเป็นวัสดุขนาดเล็กเช่น ลวดซึ่งกั้นคลื่นบางส่วนไม่ให้ผ่านไปแล้วแต่คลื่นสามารถกระจายรอบๆ สิ่งกีดขวางได้ ปรากฏการณ์นี้จะยังคงเด่นชัดเมื่อขนาดของ

ช่องแคบหรือสิ่งกีดขวางมีค่าเข้าใกล้ความยาวคลื่นดังรูปที่ 2.9 โดยในการเลี้ยวเบนจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ การเลี้ยวเบนแบบเฟรานโฮเฟอร์ (Fraunhofer) ซึ่งจะถือว่ามีรังสีที่ตกบนฉากรับภาพเป็นรังสีขนาน ส่วนการเลี้ยวเบนอีกชนิดหนึ่งคือการเลี้ยวเบนแบบเฟรสเนล (Fresnel) นั้นต้นกำเนิดแสงอาจอยู่ใกล้กับฉากรับภาพมาก



รูปที่ 2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของแสงเมื่อมีวัตถุมาขวางการเคลื่อนที่



รูปที่ 2.10 แสดงภาพการหาการกระจายความเข้มแสงจากการเลี้ยวเบนแบบเฟรานโฮเฟอร์ที่ช่องแคบเดี่ยว

การเลี้ยวเบนแบบเฟรานโฮเฟอร์ที่ช่องแคบเดี่ยว พิจารณาช่องแคบเดี่ยวที่มีความกว้างน้อยกว่าความยาวของช่องแคบมากพอดังรูปที่ 2.10 เมื่อแสงความยาวคลื่น λ ที่ตกบนช่องแคบให้เป็นแสงขนานตกตั้งฉากกับระนาบของช่องแคบ และจากหลักของฮอยเกนส์สามารถแบ่งช่องแคบเดี่ยวออกเป็นส่วนเล็กๆ ds ดังนั้นสามารถคำนวณสนามไฟฟ้าลัพธ์จากช่องแคบกว้าง b ที่ตำแหน่ง P ได้จาก [9]

$$dE_p = \left(\frac{dE_0}{r} \right) e^{i(kr - \omega t)} \quad (2.7)$$

เมื่อ r คือความยาวทางเดินแสง (Optical Path Length) จากส่วนเล็กๆ ds ถึงตำแหน่ง P dE_0 คือแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าจากส่วนเล็กๆ ds มีความสัมพันธ์ดังนี้ $dE_0 = E_L ds$ k คือค่าคงที่การเคลื่อนที่ของคลื่นในสุญญากาศ ω คือความถี่เชิงมุมและ t คือเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ ถ้าพิจารณาส่วนเล็กๆ ds ที่ตำแหน่ง $s = 0$ โดยที่ตำแหน่งนี้ความยาวทางเดินแสง $r = r_0$ ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง p เกิดจากความแตกต่างทางเดินแสง $\Delta = s \sin \theta$ ในแต่ละส่วนเล็กๆ ds หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$dE_p = \left(\frac{E_L ds}{r_0} \right) e^{i(kr_0 + ks \sin \theta - \omega t)} \quad (2.8)$$

สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง p หาได้จากการอินทิเกรตส่วนเล็กๆ ds ของช่องแคบได้ดังนี้

$$E_p = \left(\frac{E_L}{r_0} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} e^{iks \sin \theta} ds \right) e^{i(kr_0 - \omega t)} \quad (2.9)$$

$$E_p = \frac{E_L b}{r_0} \frac{\sin\left(\frac{1}{2} kb \sin \theta\right)}{\frac{1}{2} kb \sin \theta} \quad (2.10)$$

กำหนดให้ $\beta = \frac{1}{2} kb \sin \theta$ เพื่อให้สมการ (2.10) อยู่ในลักษณะที่ง่ายขึ้นได้เป็น

$$E_p = \frac{E_L b \sin \beta}{r_0 \beta} \quad (2.11)$$

จากสมการนี้แสดงให้เห็นว่าแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง p มีการเปลี่ยนแปลงไปกับความแตกต่างทางเดินแสง $\Delta = s \sin \theta = \frac{b}{2} \sin \theta$ ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างความต่างเฟสกับความแตกต่างทางเดินแสงคือ $\beta = k\Delta$ เป็นที่ทราบกันดีว่าการกระจายความเข้มแสงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของแอมพลิจูดสนามไฟฟ้า ดังนั้นได้การกระจายความเข้มแสงดังสมการด้านล่างนี้ และแสดงลักษณะการกระจายความเข้มแสงได้ดังรูปที่ 2.11 คือ

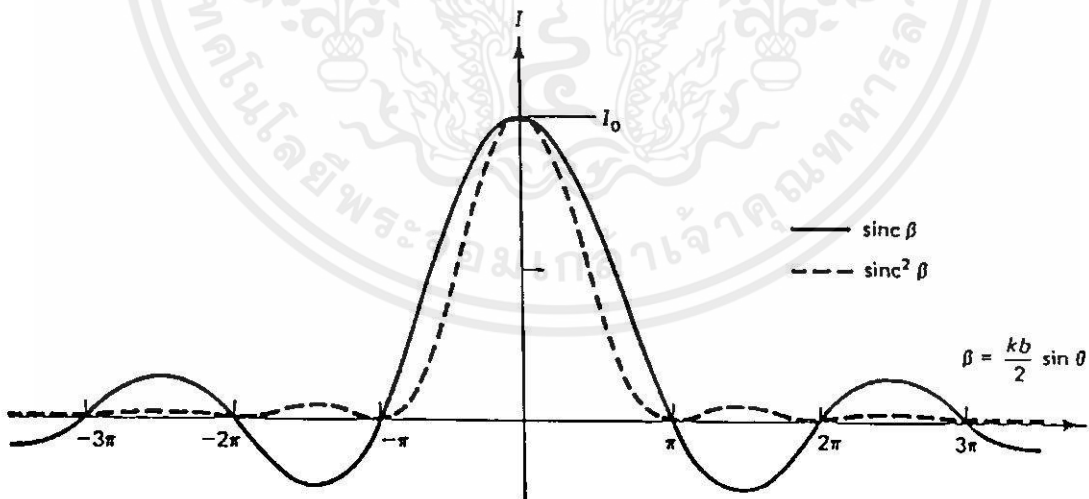
$$I = I_0 \left(\frac{\sin^2 \beta}{\beta^2} \right) = \text{sinc}^2 \beta \quad (2.12)$$

เมื่อ $I_0 = \frac{\epsilon_0 c}{2} \left(\frac{E_L b}{r_0} \right)^2$ เป็นแอมพลิจูดการกระจายความเข้มแสงซึ่งเป็นค่าคงที่ทั้งหมด
 เพื่อหาเงื่อนไขอันดับการเลี้ยวเบนที่เท่ากับศูนย์จะอาศัยคุณสมบัติเมื่อ $\beta \rightarrow 0$ จะทำให้ $\sin \beta = 0$
 หรือ $\lim_{\beta \rightarrow 0} \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right) = 1$ ทำให้ได้เงื่อนไขอันดับการเลี้ยวเบนที่มีแอมพลิจูดความเข้มแสงเท่ากับศูนย์
 ดังนี้

$$m\pi = \frac{1}{2}(kb \sin \theta) = \beta \quad \text{เมื่อ } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.13)$$

จากค่าคงที่ของการเคลื่อนที่ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ดังนั้นเขียนเงื่อนไขอันดับการเลี้ยวเบนที่เป็นศูนย์
 ได้ดังสมการ

$$b \sin \theta = m\lambda \quad \text{เมื่อ } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.14)$$



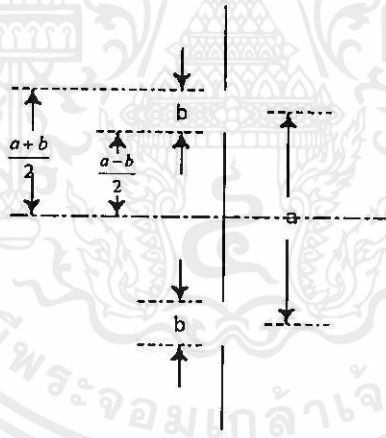
รูปที่ 2.11 แสดงการกระจายความเข้มแสงจากการเลี้ยวเบนที่ช่องแคบเดี่ยวสัมพันธ์กับ β ตาม
 สมการ (2.12) โดยเส้นประแสดงกราฟที่สร้างขึ้นจาก $\text{sinc}^2 \beta$ และเส้นทึบสร้างขึ้น
 จาก $\text{sinc} \beta$ เมื่อ $\beta = \frac{k}{2} b \sin \theta$ คือความต่างเฟสของแสงโดยที่ $\beta \rightarrow 0$ แล้วความเข้ม
 แสง $I = I_0$ และเมื่อ $\beta = \pi$ 2π และ 3π ความเข้มแสงจะมีค่าลดลงตามรูปด้านบนนี้

2.1.4 เกรตติงเลี้ยวเบน (Diffraction Grating)

ถ้าพิจารณาเกรตติงชนิดส่งผ่านที่มีช่องแคบจำนวนมากเท่ากับ N ช่อง แต่ละช่องห่างกัน a มีความกว้างเท่ากับ b ดังรูปที่ 2.12 อาศัยหลักการเลี้ยวเบนแบบเฟรอนโฮเฟอร์ที่ช่องแคบเดี่ยว จะสามารถหาสนามไฟฟ้าลัพธ์ได้ดังนี้

$$E_R = \frac{E_L}{r_0} \sum_{j=1}^{N/2} \left\{ \int_{[-(2j-1)a-b]/2}^{[-(2j-1)a+b]/2} e^{iks \sin \theta} ds + \int_{[(2j-1)a-b]/2}^{[(2j-1)a+b]/2} e^{iks \sin \theta} ds \right\} \quad (2.15)$$

เมื่อ N คือจำนวนช่องแคบทั้งหมดของเกรตติง และ j มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง $\frac{N}{2}$ โดยการอินทิเกรตทั้งสองเทอมภายในวงเล็บแสดงถึงความสมมาตรกันของเกรตติง ซึ่งการอินทิเกรตเทอมแรกเป็นส่วนของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากช่องแคบทั้งหมดด้านล่าง และการอินทิเกรตเทอมที่สองจะแทนสนามไฟฟ้าที่เกิดจากช่องแคบทั้งหมดด้านบนแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 ตัวอย่างเช่น จากค่า $j=1$ สนามไฟฟ้าลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจะเป็นกรณีของช่องแคบคู่นั่นเอง



รูปที่ 2.12 แสดงการเลี้ยวเบนของแสงผ่านช่องแคบจำนวนมาก

การคำนวณจะเริ่มจากการอินทิเกรตเทอมทั้งหมดภายในวงเล็บของสมการ (2.15) โดยกำหนดตัวแปรใหม่ให้เป็น A จะได้

$$A = \frac{1}{ik \sin \theta} \left\{ e^{-ik \sin \theta [(2j-1)a-b]/2} - e^{-ik \sin \theta [(2j-1)a+b]/2} \right\}$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งหา $\frac{1}{ik \sin \theta}$ แปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$+ \frac{1}{ik \sin \theta} \left\{ e^{ik \sin \theta [(2j-1)a+b]/2} - e^{ik \sin \theta [(2j-1)a-b]/2} \right\} \quad (2.16)$$

จากการกำหนดตัวแปรในหัวข้อการแทรกสอดจากการทดลองของโทมัส ยัง ตามสมการ (2.6) และการเลี้ยวเบนแบบฟราน์โฮเฟอร์ที่ช่องแคบเดี่ยวตามสมการ (2.10) จะได้

$$A = \frac{b}{2i\beta} \left[e^{-i(2j-1)\alpha} (e^{i\beta} - e^{-i\beta}) + e^{i(2j-1)\alpha} (e^{i\beta} - e^{-i\beta}) \right] \quad (2.17)$$

โดยการใช้สูตรของออยเลอร์ (Euler's Formular) คือ $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$ สามารถแก้สมการ (2.17) ได้ดังต่อไปนี้

$$A = \frac{b}{2i\beta} (2i \sin \beta) \{ 2 \cos [(2j-1)\alpha] \} \quad (2.18)$$

หรือ

$$A = \frac{2b \sin \beta}{\beta} \operatorname{Re} [e^{i(2j-1)\alpha}] \quad (2.19)$$

สมการนี้เป็นผลการอินทิเกรตเทอมในวงเล็บของสมการ (2.15) การคำนวณต่อไปนี้จะเป็นการรวมสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแต่ละช่องแคบจำนวนมาก N ช่องเข้าด้วยกันโดยกำหนดตัวแปรใหม่ให้เป็น S จะได้

$$S = 2b \frac{\sin \beta}{\beta} \operatorname{Re} \sum_{j=1}^{N/2} e^{i(2j-1)\alpha} \quad (2.20)$$

กระจายของสมการ (2.20) และเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$S = 2b \frac{\sin \beta}{\beta} \operatorname{Re} [e^{i\alpha} + e^{i3\alpha} + e^{i5\alpha} + \dots + e^{i(N-1)\alpha}] \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากสมการ (2.21) เป็นอนุกรมเรขาคณิตสามารถหาผลรวมได้จาก

$$a \left(\frac{r^n - 1}{r - 1} \right) = e^{i\alpha} \left[\frac{(e^{2i\alpha})^{N/2} - 1}{e^{2i\alpha} - 1} \right] = \frac{e^{iN\alpha} - 1}{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}$$

และอาศัยสูตรของออยเลอร์จะได้

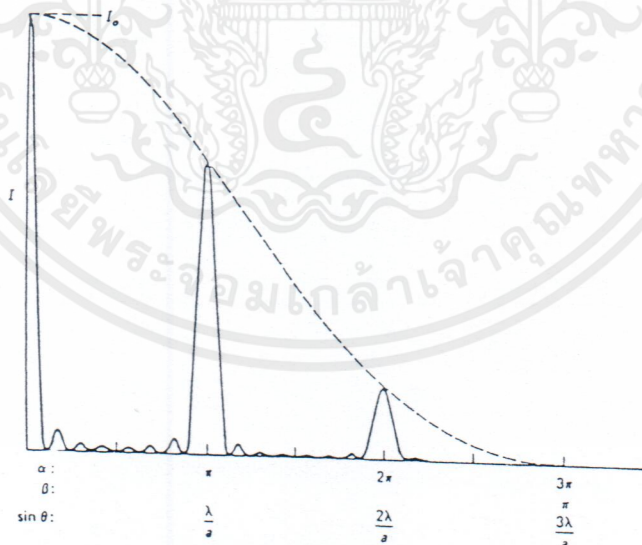
$$\frac{(\cos N\alpha - 1) + i \sin N\alpha}{2i \sin \alpha} = \frac{i(\cos N\alpha - 1) - \sin N\alpha}{-2 \sin \alpha} \quad (2.22)$$

สมการนี้มีส่วนจริงคือ $\frac{\sin N\alpha}{2 \sin \alpha}$ และแทนค่าในสมการ (2.15) จะได้สนามไฟฟ้าลัพธ์จากการกระตติงเลี้ยวเบนดังต่อไปนี้

$$E_R = \frac{E_L b \sin \beta \sin N\alpha}{r_0 \beta \sin \alpha} \quad (2.23)$$

เป็นที่ทราบกันดีว่าการกระจายความเข้มแสงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.13 และสมการต่อไปนี้

$$I = I_0 \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \left(\frac{\sin N\alpha}{\sin \alpha} \right)^2 \quad (2.24)$$



รูปที่ 2.13 แสดงการกระจายความเข้มของแสงจากการเลี้ยวเบนผ่านเกรตติงตามสมการ (2.24)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยเส้นประคือ $\left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2$ และเส้นทึบคือการกระจายความเข้มแสงของการเลี้ยวเบน ไม่ว่าจะฉีกดูทั้งเส้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ผ่านเกรตติงซึ่งเกิดจากรีวการแทรกสอด $\left(\frac{\sin N\alpha}{\sin \alpha} \right)^2$ ถูกมอดูเลตด้วยรีวการเลี้ยวเบน

จากสมการนี้แสดงให้เห็นว่าการกระจายความเข้มแสงของเกรตติงเลี้ยวเบนเกิดจากการกระจายความเข้มแสงของริ้วการแทรกสอดซึ่งถูกมอดูเลตโดยการกระจายความเข้มแสงของการเลี้ยวเบน จะพบว่าถ้า $\alpha = 0$ หรือมีจำนวนเต็มเท่าของ π จะได้ $\frac{\sin N\alpha}{\sin \alpha} = \frac{0}{0}$ ซึ่งไม่สามารถหาค่าได้ จึงต้องใช้กฎของโลปีทาล (L'Hospital's rule) ในการหาค่าตอบซึ่งจะได้ตำแหน่งการกระจายความเข้มแสงสูงสุดจากเกรตติงเลี้ยวเบนในกรณี $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ จะได้

$$\lim_{\alpha \rightarrow m\pi} \frac{\sin N\alpha}{\sin \alpha} = \lim_{\alpha \rightarrow m\pi} \frac{\cos N\alpha}{\cos \alpha} = \pm N$$

จากรูปที่ 2.13 สามารถหาเงื่อนไขการเลี้ยวเบนของเกรตติงได้โดยค่า $N\alpha$ มีค่าเป็นจำนวนเท่าของ π นั่นคือ $N\alpha = p\pi$ หรือ $a \sin \theta = \frac{p\lambda}{N}$ เมื่อ $p = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ การกระจายความเข้มแสงสูงสุดจากการเลี้ยวเบนจะปรากฏเมื่อ $p = 0, \pm N, \pm 2N, \dots$ และที่ค่า p นอกเหนือจากนี้จะมีค่าการกระจายความเข้มแสงต่ำที่สุด ดังนั้นถ้าเกรตติงที่ใช้งานมีจำนวนช่องแคบ N ช่องตำแหน่งการกระจายความเข้มแสงสูงสุดจากเกรตติงจะสอดคล้องกับ $\frac{p}{N} = m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm \dots$ เขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

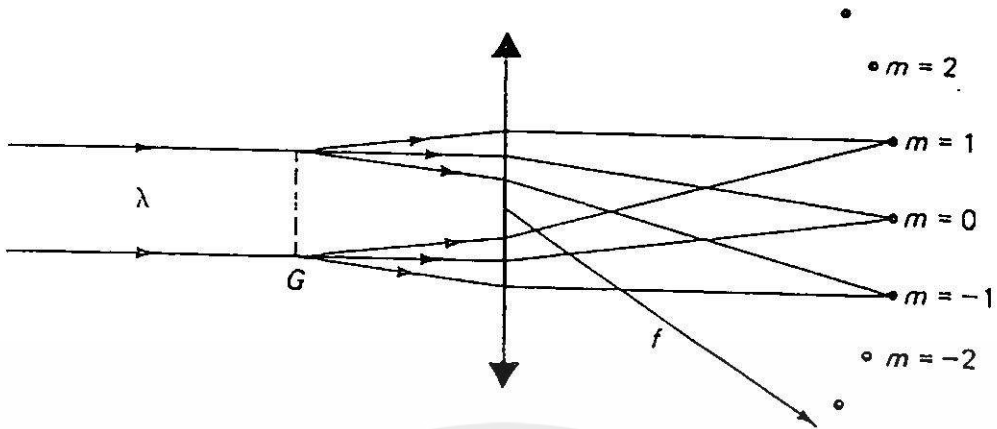
$$a \sin \theta_m = m\lambda \quad (2.25)$$

หรือ

$$a(\sin \theta_i + \sin \theta_m) = m\lambda \quad (2.26)$$

สมการที่ (2.25) และ (2.26) นี้เรียกว่าสมการการเลี้ยวเบนของเกรตติง (Diffraction-Grating's Equation) เมื่อ $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ คืออันดับการเลี้ยวเบน ส่วนเครื่องหมายบวกและลบแทนความสมมาตรของการกระจายความเข้มแสง a เป็นระยะห่างระหว่างช่องเปิดที่อยู่ติดกัน θ_i และ θ_m คือมุมที่ตกกระทบและเลี้ยวเบนของแสง แสดงได้ดังรูปที่ 2.14 จากสมการของเกรตติงพบว่าอันดับการเลี้ยวเบนที่ศูนย์จะเกิดขึ้นเมื่อ $\theta_m = -\theta_i$ นั่นคือ การเลี้ยวเบนจะอยู่ในแนวเดียวกันกับแนวการตกกระทบสำหรับทุกๆ ความยาวคลื่น สำหรับกรณีที่แนวการตกกระทบเป็นมุมคงที่ค่าหนึ่งแล้วมุมในการเลี้ยวเบนของแสงอันดับอื่นๆ จะมีค่าขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นหรือโหมดแสงนั่นเองหรืออาจกล่าวได้ว่าแสงในแต่ละความยาวคลื่นจะเลี้ยวเบนด้วยมุมที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงเมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดความยาวคลื่น λ เคลื่อนที่ผ่านเกรตติง G จะถูกแยกออกในอันดับการเลี้ยวเบน m ที่แตกต่างกันออกไป

2.1.4.1 กำลังแยกของเกรตติงเลี้ยวเบน (Resolving Power of The Diffraction

Grating)

จากสมการของเกรตติงเลี้ยวเบน จึงทำให้ทราบว่าแสงความยาวคลื่นต่างๆ จะเลี้ยวเบนด้วยมุมที่แตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อแสงขนานสองลำที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันเล็กน้อยตกบนเกรตติงตำแหน่งของความเข้มสูงสุดที่สุดของแต่ละความยาวคลื่นในอันดับเดียวกันอาจอยู่ชิดกันมากจนไม่สามารถทราบได้ว่ามีหลายความยาวคลื่นเพื่อที่จะให้สังเกตได้ว่าความยาวคลื่นทั้งสองแยกกันอย่างน้อยที่สุดตำแหน่งของความเข้มสูงสุดที่สุดของความยาวคลื่นหนึ่งต้องอยู่ตรงที่ตำแหน่งความเข้มศูนย์ของอีกความยาวคลื่น ดังนั้น กำลังแยกของเกรตติงจะหมายถึงความสามารถในการทำให้สเปกตรัมของแสงในอันดับเดียวกันของความยาวคลื่นที่อยู่ใกล้เคียงกันห่างกันอย่างชัดเจน

ถ้ากำหนดให้ $\lambda \approx \lambda_1 \approx \lambda_2$ โดย λ เป็นความยาวคลื่นเฉลี่ย และ $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ กำลังแยกของเกรตติงคือ

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (2.27)$$

หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน $R = mN$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่น (2.28) ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

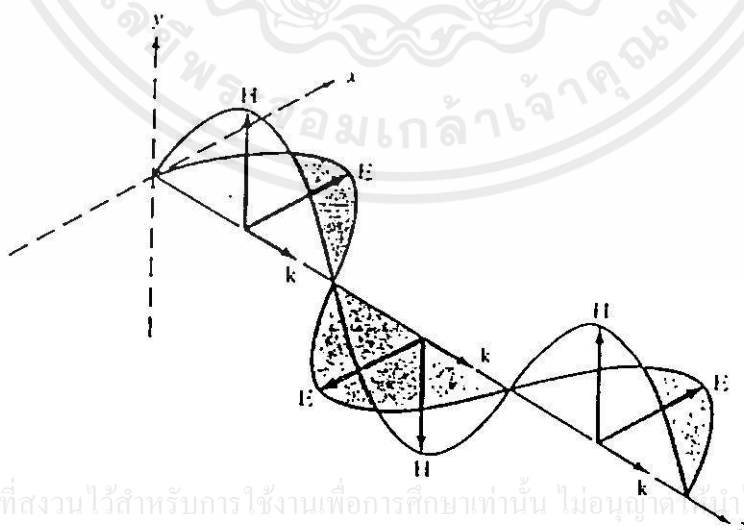
เมื่อ N เป็นจำนวนช่องแคบทั้งหมด และ m เป็นอันดับการเลี้ยวเบนจากสมการ (2.28) นี้ทำให้ทราบว่ากำลังแยกของเกรตติงขึ้นอยู่กับอันดับการเลี้ยวเบนกับจำนวนช่องแคบทั้งหมดของเกรตติง โดยที่อันดับการเลี้ยวเบนเดียวกันกำลังแยกของเกรตติงจะขึ้นอยู่กับจำนวนช่องของเกรตติงเพียงอย่างเดียวเท่านั้น และในทำนองเดียวกันสำหรับเกรตติงอันหนึ่งถ้าอันดับการเลี้ยวเบนยิ่งสูงกำลังแยกของเกรตติงก็จะสูงขึ้นด้วย

2.1.5 โพลาริเซชันเชิงเส้น

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงปรากฏการณ์การแทรกสอดและการเลี้ยวเบน ซึ่งเป็นคุณสมบัติของคลื่นไม่ว่าคลื่นนั้นจะเป็นคลื่นตามขวางหรือคลื่นตามยาว แต่สำหรับปรากฏการณ์โพลาริเซชันนั้นจะเกิดเฉพาะกับคลื่นตามขวางเท่านั้น ตัวอย่างเวกเตอร์ของคลื่นตามขวาง \vec{A} นั่นคือคลื่นแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีลักษณะเป็นคลื่นระนาบ (Plane Wave) หรือคลื่นโพลาริเซชันเชิงเส้น (Linearly Polarized Waves) มีทิศทางการเคลื่อนที่ตามเวกเตอร์ของเลขคลื่น \vec{k} ซึ่งเรียกว่าค่าคงที่การเคลื่อนที่ของคลื่น (Wave Propagation Constant) สามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$\vec{A}(\vec{x}, t) = \hat{e}_i A_0 \exp[j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{x})] \quad (2.29)$$

เมื่อ $\vec{x} = x\hat{e}_x + y\hat{e}_y + z\hat{e}_z$ แทนเวกเตอร์บอกตำแหน่งและ $\vec{k} = k_x\hat{e}_x + k_y\hat{e}_y + k_z\hat{e}_z$ ขณะที่ A_0 คือแอมพลิจูดของคลื่น $\omega = 2\pi\nu$ เมื่อ ν เป็นความถี่ของแสง ปริมาณของค่าคงที่การเคลื่อนที่ของคลื่น \vec{k} คือ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ โดย λ แทนความยาวคลื่นของแสงและ \hat{e}_i เป็นยูนิตเวกเตอร์แสดงทิศของคลื่น โดย i แทนด้วยทิศทางใน x, y และ z



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ลือทั้งห้าฉบับนี้ได้อัปโหลดขึ้นบนระบบดังกล่าวจึงเจ้าของเอกสารหรือผู้ที่มีกรรมสิทธิ์ในการนำไปใช้

รูปที่ 2.15 แสดงระนาบคลื่นโพลาริเซชันเชิงเส้นและแสดงทิศทางของสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็กและทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น

ถ้าให้สนามไฟฟ้าเคลื่อนที่ในทิศทาง $\vec{k} = k\hat{e}_z$ และมีทิศทางตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ ดังนั้น $\hat{e}_t = \hat{e}_x$ แสดงว่าสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงในทิศ x ดังรูปที่ 2.15 เขียนสมการแทนสนามไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\vec{E}_x(z, t) = \hat{e}_x E_{0x} \cos(\omega t - kz) \quad (2.30)$$

สมการนี้แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นระนาบซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทาง z จากสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นปริมาณเวกเตอร์ประกอบด้วยทิศของสนามไฟฟ้า \vec{E} ดังรูปที่ 2.15 โดยทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก \vec{H} ทั้งสองนี้จะตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นหรือ \vec{k} นั่นเอง ด้วยสาเหตุนี้จึงเรียกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ว่าคลื่นตามขวาง (Transverse Wave)

ในการศึกษาสถานภาพทางโพลาริเซชันเชิงเส้นนั้น จะใช้การพิจารณาโพลาริเซชันของคลื่นซึ่งตั้งฉากซึ่งกันและกัน โดยในที่นี้จะยกตัวอย่างของสนามไฟฟ้าที่มีโพลาริเซชันเชิงเส้นในทิศทาง y ดังนี้

$$\vec{E}_y(z, t) = \hat{e}_y E_{0y} \cos(\omega t - kz + \delta) \quad (2.31)$$

เมื่อ δ คือความแตกต่างเฟสของคลื่นซึ่งตั้งฉากซึ่งกันและกัน ดังนั้นเมื่อพิจารณาสถานภาพความเป็นโพลาริเซชันของคลื่นซึ่งตั้งฉากซึ่งกันและกันจะพบว่า

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_x(z, t) + \vec{E}_y(z, t) \quad (2.32)$$

โดยถ้าค่า δ ในสมการ (2.31) มีค่าเป็นศูนย์หรือเป็นจำนวนเท่าของ π แล้วคลื่นทั้งสองจะมีเฟสตรงกันและจะส่งผลให้สมการ (2.32) เป็นสมการของคลื่นที่มีเวกเตอร์โพลาริเซชันทำมุมกันตามสมการต่อไปนี้

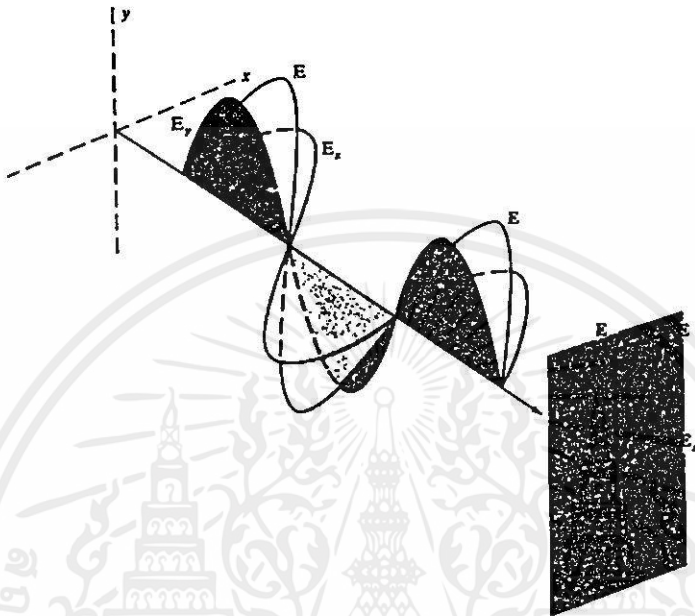
$$\theta = \arctan \frac{E_{0y}}{E_{0x}} \quad (2.33)$$

เมื่อ θ คือมุมของโพลาริเซชันของเวกเตอร์ \hat{e}_x กับ \hat{e}_y และขนาดของ \vec{E} คือ

ไม่ว่าการนิโคทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = (E_{0x}^2 + E_{0y}^2)^{1/2} \quad (2.34)$$

ในกรณีนี้กล่าวถึงข้างต้นนี้สามารถแสดงภาพของระนาบคลื่น และเวกเตอร์ลิพธ์ของโพลาไรเซชันเชิงเส้นได้ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งพบว่าประกอบด้วยสองคลื่นระนาบที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน โดยอาจแยกออกได้เป็น 2 ระนาบนอกจากนี้ยังมีเฟสตรงกันสามารถรวมกันเป็นคลื่นที่มีโพลาไรเซชันเชิงเส้น

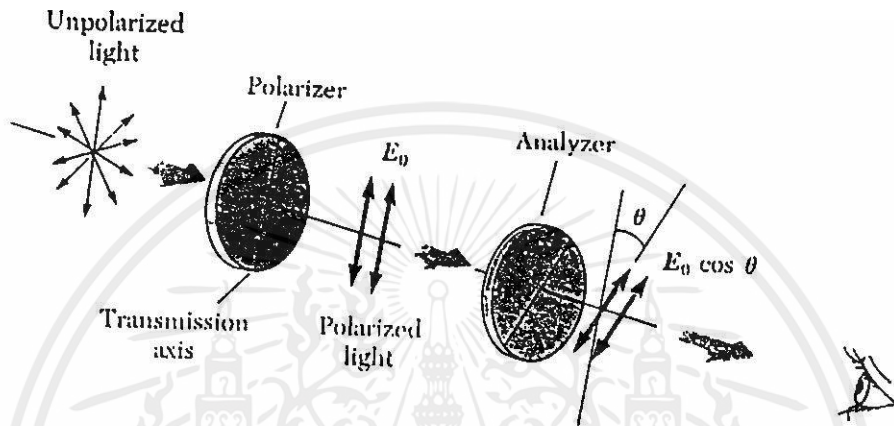


รูปที่ 2.16 แสดงโพลาไรเซชันของสองคลื่นที่มีเฟสตรงกัน

โดยทั่วไปแล้วแสงโพลาไรซ์กับแสงไม่โพลาไรซ์นั้นตามนุษย์ไม่สามารถบอกความแตกต่างได้จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์อย่างอื่นช่วยเช่น การใช้ผลึกไดโคอิก (Dichotic) ซึ่งมีคุณสมบัติการยอมให้แสงผ่านเฉพาะแสงที่มีเวกเตอร์สนามไฟฟ้าสั้นในทิศทางขนานกับแกนพิเศษเรียกว่าแกนส่งผ่าน (Transmission Axis) เท่านั้น นอกจากนั้นจะถูกดูดกลืนแสงไว้หมดด้วยผลึกนี้ได้แก่ทัวร์มาลีน (Tourmaline) และเฮอราพาไรต์ (Herapathite) เมื่อมีแสงไม่โพลาไรซ์ผ่านแผ่นโพลาไรซ์ (Polaroid) ที่ทำจากผลึกที่กล่าวมาแล้วนั้นแผ่นโพลาไรซ์จะดูดกลืนแสงที่สนามไฟฟ้าที่สั้นในทิศตั้งฉากกับแกนส่งผ่าน แต่จะยอมให้แสงที่สนามไฟฟ้าสั้นในแนวขนานกับแกนส่งผ่านออกไปได้ ฉะนั้นแสงไม่โพลาไรซ์เมื่อผ่านแผ่นโพลาไรซ์แล้วจะเป็นแสงโพลาไรซ์ได้ดังรูปที่ 2.17 และถ้าให้แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นมีสนามไฟฟ้า E_0 ให้ผ่านโพลาไรซ์อีกแผ่นหนึ่งเรียกว่าตัววิเคราะห์ (Analyzer) เมื่อตั้งฉากแสงที่ผ่านโดยหมุนตัววิเคราะห์ที่มีแกนส่งผ่านทำมุม θ กับแกนส่งผ่านอันแรกความเข้มแสงที่ส่งผ่านออกมาจะเป็นไปตามกฎของมาลุส (Malus's law) ได้ดังนี้

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (2.35)$$

เมื่อ I_0 เป็นความเข้มแสงก่อนผ่านตัววิเคราะห์ และ I เป็นความเข้มแสงหลังผ่านตัววิเคราะห์ จากสมการนี้ความเข้มแสงสูงที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อแกนส่งผ่านของแผ่นโพลาไรซ์กับตัววิเคราะห์ขนานกันคือ $\theta = 0$ หรือ π และถ้าจะให้ไม่มีแสงผ่านออกมาได้เลยเมื่อแกนส่งผ่านทั้งสองทำมุมกัน $\theta = \frac{\pi}{2}$ หรือ $\frac{3\pi}{2}$ นั่นเอง



รูปที่ 2.17 แสดงการเคลื่อนที่ของแสงไม่โพลาไรซ์ (Unpolarized Light) ผ่านโพลาไรซ์เซอร์ (Polarizer) แสงที่ได้จะเป็นแสงโพลาไรซ์ (Polarized Light) มีสนามไฟฟ้า E_0 ตามแนวแกนส่งผ่าน (Transmission Axis) เท่านั้น และเมื่อแสงโพลาไรซ์เคลื่อนที่ผ่านแผ่นโพลาไรซ์อีกแผ่นหนึ่งเรียกว่าตัววิเคราะห์ (Analyzer) โดยมีแกนส่งผ่านทำมุม θ กับแกนส่งผ่านอันแรกสนามไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าเป็น $E_0 \cos \theta$

2.2 โยแก้วนำแสง

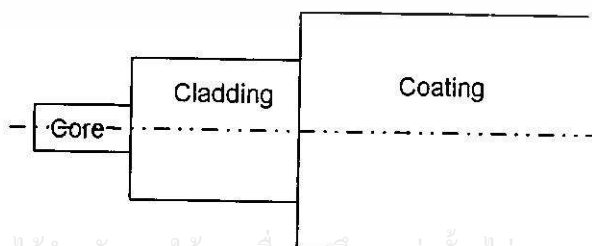
ในช่วงระยะเวลาไม่นานมานี้เทคโนโลยีของการสื่อสารโดยใช้สายเคเบิลได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากกับการสื่อสารสมัยใหม่ แต่เดิมนั้นสัญญาณต่างๆ ทาง การสื่อสารถูกส่งไปตามสายทองแดง แต่สืบเนื่องจากข้อจำกัดเรื่องความสามารถของการส่งสัญญาณหรือความกว้างของช่องสัญญาณ และการสูญเสียสัญญาณจึงทำให้มีการคิดค้นสายเคเบิลใหม่ๆ ขึ้น จนกระทั่งปัจจุบันนี้ได้เป็นที่รู้จักกันดีว่า สายเคเบิลใยแก้วนำแสงนั้นมีข้อดีอย่างมากเมื่อเทียบกับสายทองแดง

นอกจากใยแก้วนำแสงที่ได้นำมาใช้ในเรื่องของการสื่อสารแล้ว ใยแก้วนำแสงก็ยังสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับงานอื่นๆ ได้อย่างกว้างขวางเช่น การนำมาประยุกต์ทำเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดเพื่อใช้ในทางการแพทย์ ใช้ในทางการเกษตร และใช้ในด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงพื้นฐานเบื้องต้นที่ควรทราบของใยแก้วนำแสง คุณสมบัติของใยแก้วนำ

แสงต่างๆ เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสงต่อไป

2.2.1 ประวัติความเป็นมา

ในอดีตนั้น การติดต่อสื่อสารได้อาศัยตาเพื่อรับรู้ข่าวสารต่างๆ ดังนั้นข้อมูลจึงถูกส่งไปในลักษณะของสัญญาณคว้นไฟ การใช้สัญญาณตรง และการทำให้แสงตะเกียงสว่างหรือมีดเป็นต้น ต่อมาเกิดการสื่อสารประเภทต่างๆ เกิดขึ้นเป็นลำดับเช่น โทรเลข โทรศัพท์ โทรศัพท์เคลื่อนที่ และดาวเทียม เป็นต้น จนกระทั่ง พ.ศ. 2399 จอน ทินดัล (John Tyndall) ได้ค้นพบปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดของแสงจากน้ำที่ไหลออกจากถัง [10] ต่อมาในปี พ.ศ. 2423 อเล็กซานเดอร์ เกรแฮมเบลล์ (Alexander Graham Bell) ได้ประดิษฐ์โทรศัพท์ใช้แสงหรือเรียกว่าโฟโตโฟน (Photophone) โดยเสียงจะถูกเปลี่ยนเป็นแสงและส่งออกไปได้ไกลถึง 213 เมตร ในส่วนของสายส่งที่ใช้ใยแก้วนำแสงโดยการป้อนแสงเข้าไบนั้นเกิดขึ้นเมื่อ พ.ศ. 2494 โดยมีการพัฒนาใยแก้วนำแสงเพื่อใช้ในวงการแพทย์ ซึ่งกล่าวได้ว่าเป็นใยแก้วนำแสงอันแรกทีสร้างขึ้นโดยมีการสูญเสีย 1000 dB/Km ต่อมามีการพัฒนาเทคโนโลยีของแสงที่นำมาใช้กับการสื่อสารคือเมื่อ พ.ศ. 2503 เลเซอร์ถูกค้นพบขึ้นจึงทำให้หลักการของแสงที่นำมาใช้กับใยแก้วนำแสงมีความเป็นไปได้สูงขึ้นจึงทำให้การวิจัยค้นคว้าเกี่ยวกับใยแก้วนำแสงเกิดขึ้นอย่างจริงจังในปี พ.ศ. 2509 โดยเคา (Kao) ได้เสนอบทความเรื่องความเป็นไปได้ในอนาคตเกี่ยวกับการใช้ใยแก้วนำแสง ในบทความได้วิเคราะห์เกี่ยวกับสาเหตุของการสูญเสียของแสงในใยแก้วนำแสง และกล่าวว่าถ้าหากกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่มีอยู่ในใยแก้วนำแสงออกอย่างเพียงพอจนกระทั่งลดการสูญเสียต่ำลงเหลือประมาณ 20 dB/Km แล้วที่ระดับการสูญเสียนี้อาจมีความเป็นไปได้สำหรับการนำไปใช้ในการสื่อสาร และในปี พ.ศ. 2513 บริษัทคอร์นิง (Corning) ประเทศสหรัฐอเมริกาได้ประสบผลสำเร็จในการสร้างใยแก้วนำแสงที่มีการสูญเสียน้อยมากในขณะนั้นคือ 20 dB/Km นับตั้งแต่นั้นเป็นต้นมาจนกระทั่งปัจจุบันใยแก้วนำแสงได้พัฒนาให้มีการสูญเสียน้อยมากอย่างรวดเร็วโดยมีค่าการสูญเสีย 0.2 dB/Km ที่ความยาวคลื่น 1550 ไมโครเมตร เป็นต้น

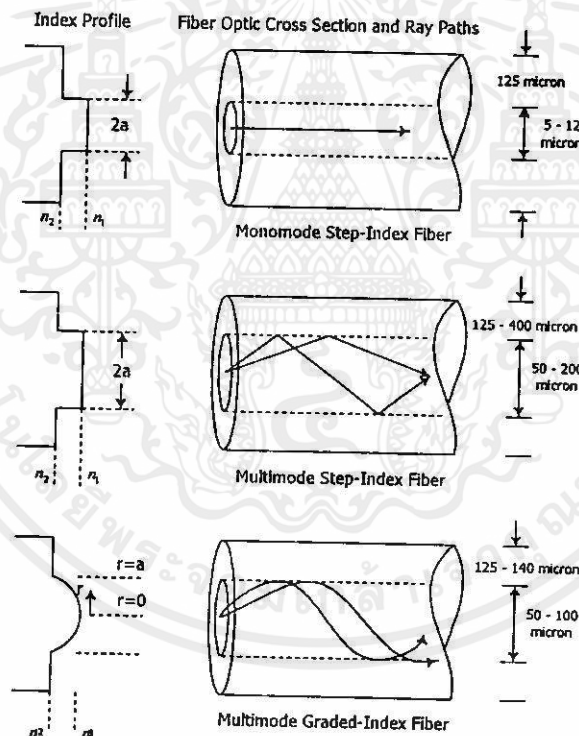


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเพื่อจุดประสงค์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.18 ภาพแสดงลักษณะโครงสร้างของใยแก้วนำแสง

2.2.2 โครงสร้างของใยแก้วนำแสง

ใยแก้วนำแสงสร้างขึ้นจากแก้วหรือสารที่เป็นไดอิเล็กตริก (Dielectric) โดยมีโครงสร้างที่เป็นตัวกลางทรงกระบอกอย่างน้อย 2 ชั้นคือ ชั้นแรกจะเรียกว่าแกน (Core) ของใยแก้วนำแสงซึ่งมีดัชนีหักเหแสงเป็น n_1 มีค่าประมาณ 1.48 โดยขนาดของแกนใยแก้วนำแสงมีเส้นผ่านศูนย์กลาง $2a$ ส่วนที่อยู่ถัดออกมาเป็นชั้นของแคลคดิง (Cladding) ซึ่งมีดัชนีหักเหแสงเป็น n_2 มีค่าประมาณ 1.46 ดังรูปที่ 2.18 โดยหน้าที่สำคัญของแกนใยแก้วนำแสงคือเป็นตัวกลางนำแสง ส่วนหน้าที่ของแคลคดิงคือลดการสูญเสียกำลังแสงเนื่องจากการสะท้อนกลับหมดของแสงและป้องกันการดัดโค้งกำลังแสงเมื่อแกนใยแก้วนำแสงสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมอื่นๆ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นส่วนป้องกันมิให้แกนของใยแก้วนำแสงโค้งงอหรือหักได้ง่าย และชั้นต่อมาเรียกว่าโคตติง (Coating) ซึ่งอยู่ถัดจากชั้นแคลคดิงออกมาซึ่งทำหน้าที่ป้องกันแสงจากภายนอกเข้าสู่ใยแก้วนำแสง และป้องกันแสงจากใยแก้วนำแสงออกสู่ภายนอก โดยมีค่าดัชนีหักเหแสงประมาณ 1.52 นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันการกระทำจากแรงภายนอกอีกด้วย



รูปที่ 2.19 แสดงภาคตัดขวางของใยแก้วนำแสง (Fiber Optic Cross Section) ทางเดินของแสง (Ray Paths) และโปรไฟล์ของดัชนีหักเหแสง (Index Profile) โดย n_1 แทนดัชนีหักเหแสงของแกน ส่วน n_2 แทนดัชนีหักเหแสงของแคลคดิง และ a คือขนาดของรัศมีแกนใยแก้วนำแสง โดยจำแนกตามองค์ประกอบดัชนีหักเหแสงของแกนเมื่อรูปบนแสดงโครงสร้างใยแก้วนำแสงแบบสเต็ปอินเด็กซ์โหมดเดียว รูปกลางแสดงโครงสร้างแบบสเต็ปอินเด็กซ์หลายโหมด และรูปล่างแสดงโครงสร้างแบบเกรดอินเด็กซ์หลายโหมด

2.2.3 ชนิดของใยแก้วนำแสง

วิธีการแบ่งชนิดของใยแก้วนำแสงนั้นมีหลายวิธีด้วยกันกล่าวคือ การแบ่งชนิดตามสารไดอิเล็กตริกที่ใช้เช่น ใยแก้วนำแสงที่ใช้สารไดอิเล็กตริกที่เป็นแก้วซิลิกา (Silica Glass) และใยแก้วนำแสงที่ใช้ไดอิเล็กตริกที่เป็นพลาสติก (Plastic Optical Fiber) เป็นต้น การแบ่งชนิดตามจำนวนโหมดซึ่งเคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงกล่าวคือ ถ้าภายในใยแก้วนำแสงมีทางเดินหรือโหมดของแสงเพียงแนวเดียวแล้วจะเรียกว่า ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว (Single Mode Fiber) แต่ถ้าภายในใยแก้วนำแสงมีทางเดินหรือโหมดของแสงเป็นจำนวนมากเรียกใยแก้วนำแสงแบบนี้ว่า ใยแก้วนำแสงหลายโหมด (Multimode Fiber) และการแบ่งชนิดตามองค์ประกอบดัชนีหักเหแสงของแกนใยแก้วนำแสง เป็นต้น

การแบ่งชนิดของใยแก้วนำแสงตามองค์ประกอบดัชนีหักเหแสงของแกนใยแก้วนำแสงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ ชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ (Step-Index Fiber) และชนิดเกรดอินเด็กซ์ (Graded-Index) โดยที่ใยแก้วนำแสงชนิดสเต็ปอินเด็กซ์นั้นมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหแสงของแกนที่มีองค์ประกอบเดียวโดยตลอดตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางดังรูปที่ 2.19 (บนและล่าง) ส่วนใยแก้วนำแสงชนิดเกรดอินเด็กซ์นั้นมีองค์ประกอบดัชนีหักเหแสงของไม่สม่ำเสมอโดยมีค่าลดลงทีละน้อยตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางดังรูปที่ 2.19(ล่าง) ใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดนี้ยังสามารถแบ่งได้อีก 3 ประเภทด้วยกันคือ ชนิดสเต็ปอินเด็กซ์โหมดเดียว (Monomode Step-Index Fiber) ชนิดสเต็ปอินเด็กซ์หลายโหมด (Multimode Step-Index Fiber) และชนิดเกรดอินเด็กซ์หลายโหมด (Multimode Graded-Index Fiber) ดังรูปที่ 2.19(บน กลาง และล่าง)

2.2.4 พารามิเตอร์ของใยแก้วนำแสง

พารามิเตอร์ของใยแก้วนำแสงนั้นถือว่ามีควมสำคัญอย่างมากต่อการศึกษาการเคลื่อนที่ของแสงภายในใยแก้วนำแสงกล่าวคือ ความแตกต่างของดัชนีหักเหแสง (Fractional Refractive Index Difference) ซึ่งสามารถแสดงความแตกต่างระหว่างดัชนีหักเหแสงของแกนและแคลดดิ้ง นิวเมอริกัลอะเพอร์เจอร์ (Numerical Aperture) หรือ NA และมุมรับแสง (Acceptance Angle) ซึ่งแสดงความสามารถของการป้อนแสงเข้าไปในใยแก้วนำแสงและการปล่อยแสงออกมาจากใยแก้วนำแสง สำหรับพารามิเตอร์สุดท้ายที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้คือ ความถี่นอร์มอลไลซ์ (Normalized Frequency) หรือ V เป็นพารามิเตอร์ที่จะกำหนดจำนวนโหมดแสงภายในใยแก้วนำแสง

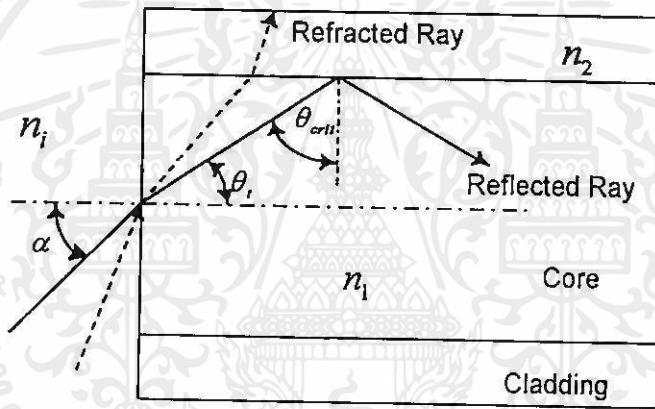
2.2.4.1 ความแตกต่างดัชนีหักเหแสง

จากหัวข้อที่ผ่านมาแล้วนั้น ได้กล่าวถึงโครงสร้างของใยแก้วนำแสง ประกอบไปด้วยสารไดอิเล็กตริกซึ่งมีค่าดัชนีหักเหแสงแตกต่างกันนั้น โดยดัชนีหักเหแสงในส่วนของแกน n_1 มีค่ามากกว่าดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง n_2 เพื่อให้เกิดการสะท้อนกลับหมดของแสงตามสมการ (2.3) ดัง

นั่นความแตกต่างดัชนีหักเหแสงจะเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงขนาดของความแตกต่างดัชนีหักเหแสงระหว่างแกนและแคลคดิง โดยกำหนดค่าความแตกต่างดัชนีหักเหแสงดังสมการ

$$\Delta = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} \quad (2.36)$$

โดยทั่วไปความแตกต่างดัชนีหักเหแสงจะมีค่าน้อยกว่า 1 มาก ซึ่งเกิดจากดัชนีหักเหแสงของแกนและแคลคดิงซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันนั่นเอง กล่าวคือดัชนีหักเหแสงของแกนมีค่าประมาณ 1.48 และดัชนีหักเหแสงของแคลคดิงมีค่าประมาณ 1.46 ดังนั้นความแตกต่างดัชนีหักเหแสงมีค่าเป็น 0.01 โดยค่าความแตกต่างดัชนีหักเหแสงนี้หากมีค่ามากจะทำให้สะดวกต่อการป้อนแสงเข้าไปในใยแก้วนำแสง



รูปที่ 2.20 ภาพแสดงการหาค่ามุมวิกฤตของใยแก้วนำแสง โดยทางเดินของแสงในเส้นที่บดคือ การสะท้อนกลับหมดภายในแกนซึ่งแสงจากแหล่งกำเนิดที่เคลื่อนที่จากอากาศมีดัชนีหักเหแสง n_1 ทำมุมตกกระทบ α กับเส้นปกติที่รอยต่อระหว่างอากาศกับแกนแล้วหักเหเข้าสู่แกนใยแก้วนำแสงโดยมีมุมหักเห θ_i ต่อจากนั้นแสงจะทำมุมตกกระทบซึ่งเท่ากับมุมวิกฤต θ_{crit} บริเวณรอยต่อระหว่างแกนและแคลคดิงมีดัชนีหักเหแสง n_1 และ n_2 เกิดการสะท้อนกลับหมดภายในใยแก้วนำแสงขึ้น

2.2.4.2 นิวเมอริคัลอะเพอร์เจอร์และมุมรับแสง

จากการสะท้อนกลับหมดภายในใยแก้วนำแสงทำให้สามารถหามุมวิกฤตได้แล้วยังสามารถใช้มุมวิกฤตเพื่อหาค่านิวเมอริคัลอะเพอร์เจอร์และมุมรับแสงได้ โดยอาศัยพารามิเตอร์ของใยแก้วนำแสงอีกค่าหนึ่งคือ ความแตกต่างดัชนีหักเหแสง พิจารณารูปที่ 2.20 ทางเดินของแสงที่

ตกกระทบบนรอยต่อระหว่างแกนและแคลคดิ่งด้วยมุมวิกฤตตามสมการ (2.3) จากกฎของสเนลซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ [11]

$$\begin{aligned} n_1 \sin \alpha &= n_1 \sin \theta_c = n_1 \sin(90 - \theta_{crit}) \\ &= n_1 \cos \theta_{crit} \\ &= n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{crit}} \end{aligned} \quad (2.37)$$

จากสมการ (2.3) คือ $\sin \theta_{crit} = \frac{n_2}{n_1}$ ดังนั้น

$$n_1 \sin \alpha = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.38)$$

สมการนี้สามารถใช้หาค่านิวเมอริคัลอะเพอร์เจอร์ได้ โดยค่านิวเมอริคัลอะเพอร์เจอร์นี้แสดงความสามารถในการรับแสงของใยแก้วนำแสงโดยพิจารณาในลักษณะของมุมรับแสง ซึ่งเป็นมุมของลำแสงที่ทำให้แสงถูกโฟกัสเข้าไปในใยแก้วนำแสงได้พอดีจะได้

$$NA = n_1 \sin \alpha_{max} \quad (2.39)$$

เมื่อ n_1 เป็นดัชนีหักเหแสงของอากาศมีค่าเท่ากับ 1 และ α_{max} คือมุมตกกระทบมากที่สุดที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดของแสง จากสมการ (2.39) แสดงให้เห็นว่าการป้อนแสงเข้าสู่ใยแก้วนำแสงนั้นหากแสงตกกระทบที่ปลายใยแก้วนำแสงด้วยมุมตกกระทบที่มากกว่า α_{max} แล้วจะไม่เกิดการสะท้อนกลับหมดภายในตัวรอยต่อระหว่างแกนและแคลคดิ่ง นั่นคือแสงจะไม่สามารถเดินทางเข้าไปในใยแก้วนำแสงได้ทั้งหมด แต่จะมีแสงส่วนหนึ่งหักเหเข้าไปในแคลคดิ่งและสูญเสียออกไป การที่จะป้อนแสงเข้าไปในใยแก้วนำแสงอย่างมีประสิทธิภาพที่สุดนั้นจะต้องโฟกัสแสงโดยใช้เลนส์รวมแสงที่มีค่านิวเมอริคัลอะเพอร์เจอร์สัมพันธ์กับของใยแก้วนำแสง ดังนั้นสมการ (2.38) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากพารามิเตอร์ความแตกต่างดัชนีหักเหแสงระหว่างแกนและแคลดดิ้งซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 มากนั้นจะได้ว่า $\Delta \ll 1$ ทำให้สามารถประมาณสมการ (2.40) ได้โดย

$$\begin{aligned} NA &= \sqrt{(n_1 + n_2)(n_1 - n_2)} \\ &= \sqrt{(2n_1)(n_1 \Delta)} \\ NA &= n_1 \sqrt{2\Delta} \end{aligned} \quad (2.41)$$

สมการ (2.40) และ (2.41) นี้เป็นการหาค่านิวเมอริคัลอะเพอร์เจอร์จากความสัมพันธ์ของดัชนีหักเหแสงของแกนและแคลดดิ้ง โดยทั่วไปแล้วค่านิวเมอริคัลอะเพอร์เจอร์ของใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดียวมีค่าประมาณ 0.11 และใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมคมีค่าประมาณ 0.2 – 0.4

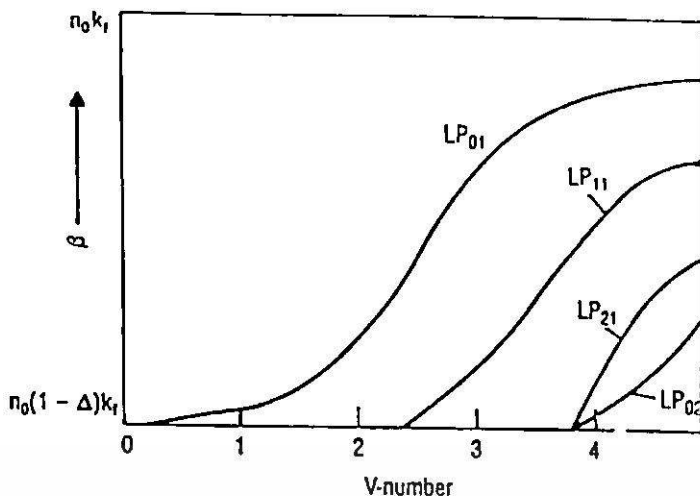
2.2.4.3 ความถี่นอร์มอลไลซ์

เนื่องจากมุมรับแสงของใยแก้วนำแสงนั้นสามารถหาได้จากสมการ (2.39) ซึ่งมีอยู่หลายค่า จึงทำให้เกิดทางเดินของแสงในใยแก้วนำแสงได้หลายทางเดินหรือหลายโหมคหรือหลายความยาวคลื่นนั่นเอง โดยแต่ละโหมคแสงนี้หมายถึงลักษณะของการกระจายพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือการกระจายความเข้มแสงที่ปลายใยแก้วนำแสง เมื่อพิจารณารูปที่ 2.21 แสดงให้เห็นว่าถ้าแสงตกกระทบกับปลายใยแก้วนำแสงด้วยมุมที่มากกว่า α_{\max} แล้วจะมีแสงบางส่วนหักเหเข้าไปภายในแคลดดิ้ง แต่อย่างไรก็ตามที่รอยต่อระหว่างแคลดดิ้งกับอากาศแสงบางส่วนจะสะท้อนกลับเข้ามาภายในแกนของใยแก้วนำแสงได้อีกตามกฎของสเนล จึงเรียกโหมคแสงนี้ว่าโหมคแคลดดิ้ง (Cladding Mode) และแสงอีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปภายนอกใยแก้วนำแสง ดังนั้นในการหาจำนวนโหมคของใยแก้วนำแสง และชนิดของใยแก้วนำแสงนั้นจะเป็นโหมคเดียวหรือหลายโหมคจะหาได้จากพารามิเตอร์ที่เรียกว่าความถี่นอร์มอลไลซ์หรือ V ตามสมการ

$$V = k_f \cdot a \cdot NA \quad (2.42)$$

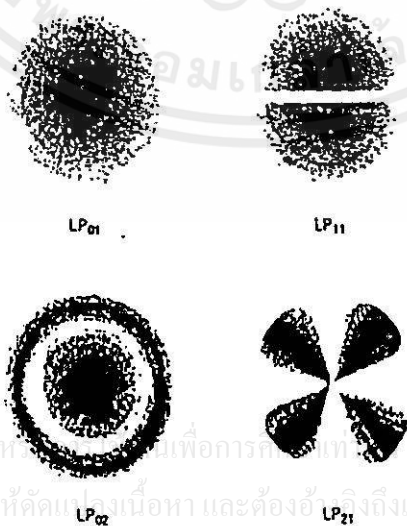
เมื่อ $k_f = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ คือค่าคงที่การเคลื่อนที่ของคลื่นในสุญญากาศ และ λ_0 เป็น

ความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ a คือรัศมีของแกนใยแก้วนำแสง และ NA คือนิวเมอริคัลอะเพอร์เจอร์ของใยแก้วนำแสง สมการนี้พบว่าความถี่นอร์มอลไลซ์เปลี่ยนแปลงไปตามความยาวคลื่นแสง รัศมีของแกนใยแก้วนำแสง และนิวเมอริคัลอะเพอร์เจอร์



รูปที่ 2.21 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่นอร์มอลไลซ์กับค่าคงที่การเคลื่อนที่ของแสงภายในใยแก้วนำแสง

เมื่อนำค่าคงที่การเคลื่อนที่ของคลื่น β มีค่าเป็น $\beta = k_r n_0 = \frac{2\pi n_0}{\lambda_0}$ มาสร้างกราฟที่มีความสัมพันธ์กับ V จะได้กราฟดังรูปที่ 2.21 จากรูปนี้พบว่าถ้า $0 < V < 2.405$ แล้วจะมีโหมดแสงเพียงโหมดเดียวที่สามารถเคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงได้นั้นคือ LP_{01} จึงเรียกใยแก้วนำแสงนี้ว่าใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว นอกจากนี้ถ้าค่า $V > 2.405$ แล้วจะมีโหมดแสงอื่นที่สามารถเคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงได้เช่น $LP_{01}, LP_{11}, LP_{21}$ และ LP_{02} จึงเรียกใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด เมื่อ LP หมายถึงลักษณะการกระจายพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อออกจากปลายใยแก้วนำแสงโดยคิดเมื่อดัชนีหักเหแสงส่วนของแกนและเปลือกดิ่งมีค่าใกล้เคียงกันแสดงได้ดังรูปที่ 2.22 และถ้าความยาวคลื่นแสงทำให้ $V = 2.405$ จะเรียกความยาวคลื่นนี้ว่าความยาวคลื่นคัทออฟ (Cut-Off Wavelength) หมายถึงความยาวคลื่นน้อยที่สุดที่ยังคงทำให้เป็นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวอยู่ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.22 ภาพแสดงการกระจายความเข้มของแสงในโหมดต่างๆ ของใยแก้วนำแสง

2.3 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของแสง และใยแก้วนำแสงที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสง ซึ่งประกอบไปด้วยหลักการหักเหแสงและการสะท้อนแสง การแทรกสอดและการเลี้ยวเบน เกรตติงชนิดส่งผ่านซึ่งเป็นอุปกรณ์ส่วนหนึ่งของการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสง และทฤษฎีโพลาไรเซชันเชิงเส้น ในส่วนของใยแก้วนำแสงนั้นได้กล่าวถึงประวัติความเป็นมาของใยแก้วนำแสง โครงสร้างใยแก้วนำแสง และหลักการสะท้อนกลับหมดของที่เป็นหลักการสำคัญของใยแก้วนำแสงแบบต่างๆ จากผลของการสะท้อนกลับหมดนี้นำไปสู่การหาพารามิเตอร์ของใยแก้วนำแสงคือ ความแตกต่างดัชนีหักเหแสง นิวเมอริคัลอะเพอร์เจอร์และมุมรับแสง และความถี่ออร์มอลโธซ์ เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

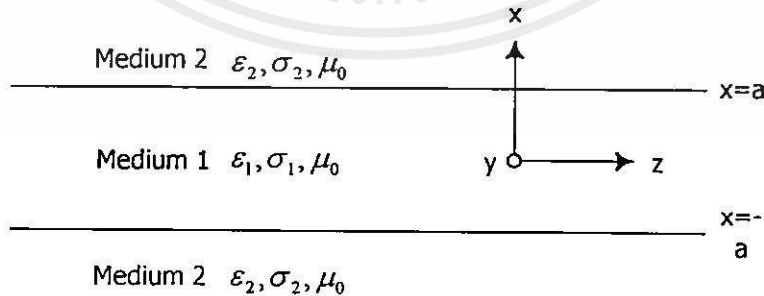
บทที่ 3

การเคลื่อนที่ของคลื่นในใยแก้วนำแสง

เนื่องจากการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสงในงานวิจัยนี้ ใช้ใยแก้วนำแสงเพื่อเป็นตัวกลางในการเคลื่อนที่ของแสง ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการเคลื่อนที่ของคลื่นในใยแก้วนำแสง พฤติกรรมของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสง ซึ่งจะนำไปสู่การศึกษาโหมดของแสงแบบต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในใยแก้วนำแสง โดยจะเริ่มต้นจากการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของคลื่นในท่อนำคลื่นแบบระนาบ (Slab Waveguide) เพื่อเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของคลื่นในใยแก้วนำแสงที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกทั้งโหมดเดียวและหลายโหมด ซึ่งมีรายละเอียดดังจะกล่าวต่อไป

3.1 การเคลื่อนที่ของคลื่นในท่อนำคลื่นแบบระนาบ

ในบทที่ 2 ได้แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของใยแก้วนำแสงที่สร้างขึ้นจากแก้วหรือวัสดุที่เป็นไดอิเล็กตริก ซึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรดังต่อไปนี้คือ สภาพอ่อนไหวทางไฟฟ้า (Permittivity, ϵ) ค่าซึมซาบทางไฟฟ้า (Permeability, μ) และค่าสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity, σ) เนื่องจากคลื่นแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของคลื่นที่จะกล่าวต่อไปนี้จะอาศัยทฤษฎีทัศนศาสตร์ของคลื่น (Wave Optics) ในการวิเคราะห์ โดยจะเริ่มต้นจากสมการของแมกซ์เวลล์ นอกจากนี้จะสมมุติให้วัสดุที่เป็นสารไดอิเล็กตริกมีความเป็นเอกพันธ์ (Homogenous) กล่าวคือเป็นวัสดุซึ่งมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน และมีความเป็นไอโซทรอปิก (Isotropic) คือเป็นวัสดุที่มีสมบัติทางกายภาพไม่ขึ้นอยู่กับทิศทาง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของท่อนำคลื่นแบบระนาบ

ก่อนที่จะวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของคลื่นในใยแก้วนำแสง ในหัวข้อนี้จะวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของคลื่นในท่อนำคลื่นแบบระนาบซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกันกับใยแก้วนำแสงเพื่อเป็นแนวทางสำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของคลื่นในใยแก้วนำแสงที่มีความซับซ้อนมากกว่าโดยจะกล่าวในหัวข้อต่อไปเมื่อพิจารณาท่อนำคลื่นแบบระนาบซึ่งจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.1 โดยประกอบไปด้วยตัวกลางที่ 1 (Medium 1) ที่มีสมบัติทางไฟฟ้าเป็น ϵ_1 และ σ_1 อยู่ระหว่างรอยต่อ $x = -a$ และ $x = a$ ของตัวกลางที่ 2 (Medium 2) ที่มีสมบัติทางไฟฟ้าเป็น ϵ_2 และ σ_2 โดยเหตุที่ตัวกลางทั้งสองนี้ไม่มีสมบัติความเป็นแม่เหล็ก ดังนั้นจะมีค่าซึมซาบทางไฟฟ้า μ แทนได้ด้วย μ_0 ซึ่งเป็นค่าซึมซาบทางไฟฟ้าในสุญญากาศ จากสมการของแมกซ์เวลล์ที่จะใช้เป็นจุดเริ่มต้นในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ในท่อนำคลื่นแบบระนาบเขียนได้ดังนี้ [12]

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E} \quad (3.2)$$

เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบไปด้วยสนามแม่เหล็ก \vec{H} และสนามไฟฟ้า \vec{E} ซึ่งตั้งฉากซึ่งกันและกันและตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 สำหรับกรณีนี้จะพิจารณาเฉพาะสนามไฟฟ้าก่อนเท่านั้น จากสมการ (3.1) เมื่อคูณด้วยเวกเตอร์โอเปอเรเตอร์ (Vector Operator) ∇ จะได้

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial (\nabla \times \vec{H})}{\partial t} \quad (3.3)$$

เมื่อแทนค่าสมการ (3.2) ในเทอมด้านขวาของสมการ (3.3) เพื่อหาสมการคลื่น (Wave Equation) ของสนามไฟฟ้าจะได้

$$\nabla (\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\mu_0 \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3.4)$$

สมมติให้ตัวกลางทั้งสองไม่มีประจุไฟฟ้าอิสระอยู่ ดังนั้น $\nabla \cdot \vec{D} = 0$ ทำให้ได้ $\nabla \cdot (\epsilon \vec{E}) = \epsilon (\nabla \cdot \vec{E}) + (\nabla \epsilon) \cdot \vec{E} = 0$ จากคอนตันของหัวข้อนี้ได้ให้วัสดุมีความเป็นเอกพันธ์และเป็นวัสดุไอโซโทรปิกแสดงว่า $\nabla \epsilon = 0$ ดังนั้น $\nabla \cdot \vec{E} = 0$ จะได้สมการคลื่นของสนามไฟฟ้าดังต่อไปนี้

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3.5)$$

สมการ (3.5) นี้เป็นสมการคลื่นของสนามไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้า \vec{E} ขึ้นอยู่กับตำแหน่งและเวลาที่เคลื่อนที่ไปในตัวกลาง ซึ่งจะใช้ในการหาลักษณะของสนามไฟฟ้าในตัวกลางทั้งสองหรือคำตอบของสมการคลื่นนั่นเอง

3.1.1 สนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นแบบระนาบ

จากหลักการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นที่ทราบกันดีว่าสนามไฟฟ้า \vec{E} มีทิศทางตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ ดังนั้นจึงเรียกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหล่านี้ว่าคลื่นตามขวาง (Transverse Wave) หรือ TE ถ้ากำหนดให้คลื่นเคลื่อนที่ด้วยความถี่เชิงมุม ω ในทิศทาง z และขนาดของสนามไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $\exp(j\omega t - \gamma z)$ เมื่อ $\gamma(\omega) = \alpha(\omega) + j\beta(\omega)$ เป็นค่าคงที่การเคลื่อนที่ (Propagation Constant) ของคลื่นโดย α และ β คือค่าคงที่การลดทอน (Attenuation Constant) และค่าคงที่เฟส (Phase Constant) ตามลำดับ จากค่าคงที่การเคลื่อนที่แสดงให้เห็นว่า ถ้าคลื่นมีความแตกต่างของโหมด หรือ ความยาวคลื่น หรือ ความถี่แล้วจะมีค่าคงที่การเคลื่อนที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นค่าคงที่การเคลื่อนที่นี้จะแสดงคุณสมบัติของคลื่นในแต่ละโหมดนั่นเอง

สำหรับคลื่นตามขวาง TE ที่มีความเป็นโพลาริเซชันในทิศ y ดังนั้น $E_x = E_z = 0$ เขียนสมการคลื่น (3.5) ใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + k_c^2 E_y = 0 \quad (3.6)$$

เมื่อ $k_c^2 = k^2 + \gamma^2$ และ $k^2 \triangleq \omega^2 \mu_0 \varepsilon \left(1 - \frac{j\sigma}{\omega\mu_0}\right)$ เนื่องจาก k^2 เป็นจำนวนเชิงซ้อนและ γ^2 เป็นจำนวนเชิงซ้อนเช่นเดียวกันจึงทำให้ k_c^2 เป็นจำนวนเชิงซ้อนด้วย เพื่อให้การวิเคราะห์ทำได้ง่ายขึ้นจะพิจารณาเฉพาะกรณีที่ k^2 และ γ^2 เป็นค่าจริงเท่านั้น ดังนั้นตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ จะต้องไม่มีการลดทอนนั่นคือ $\alpha = 0$ หรือ $\beta = 0$ จะทำให้ γ^2 เป็นค่าจริงเท่านั้นและ k^2 จะเป็นค่าจริงได้ก็ต่อเมื่อ $\sigma = 0$ และ ε เป็นค่าจริงเท่านั้น ซึ่งทำให้ได้คลื่นเคลื่อนที่ในทิศทาง z แบบไม่มีการลดทอนโดยมีค่าคงที่การเคลื่อนที่คือ $\gamma = j\beta$

การหาคำตอบของสมการ (3.6) หรือลักษณะสนามไฟฟ้าในแต่ละตัวกลางจะทำได้ก็ต่อเมื่อ k_c^2 มีค่าเป็นบวกในตัวกลางที่ 1 และมีค่าเป็นลบในตัวกลางที่ 2 ซึ่งต่อไปนี้จะเป็นการหาไม่ว่าลักษณะของสนามไฟฟ้าในแต่ละตัวกลาง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.1 ตัวกลางที่ 1

ในการพิจารณาสนามไฟฟ้าซึ่งเคลื่อนที่ในตัวกลางที่ 1 จะใช้เลข 1 แทนซึ่งจะหาได้เมื่อ $k_{c1}^2 > 0$ ดังนั้น k_{c1} เป็นค่าจริงกำหนดให้เป็น

$$k_{c1} = h_1 \quad (3.7)$$

ซึ่งทำให้ได้ $k_1^2 > \beta^2$ หรือ $\omega^2 \mu_0 \epsilon_1 > \beta^2$ จากค่าความเร็วแสงในสุญญากาศคือ $c = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ นั่นคือสมการ (3.7) นี้แสดงให้เห็นว่าความเร็วของแสงในตัวกลางที่ 1 คือ $c_1 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_1}}$ ของท่อนำคลื่นแบบระนาบมีค่าน้อยกว่าความเร็วแสงในสุญญากาศนั่นเอง โดยคำตอบของสมการ (3.6) หรือลักษณะของสนามไฟฟ้าสำหรับตัวกลางที่ 1 จะมีค่าดังนี้

$$E_{y1} = (A \cosh_1 x + B \sinh_1 x) \exp(j\omega t - j\beta z) \quad (3.8)$$

เมื่อ A และ B เป็นค่าคงที่ในตัวกลางที่ 1 สมการ (3.8) นี้แสดงให้ทราบว่าสนามไฟฟ้าในตัวกลางที่ 1 เป็นคลื่นระนาบเคลื่อนที่ในทิศ z มีความเป็นโพลาไรซ์ในทิศ y และมีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดในทิศ x แบบไซน์ (Sine)

3.1.1.2 ตัวกลางที่ 2

ในการพิจารณาสนามไฟฟ้าซึ่งเคลื่อนที่ในตัวกลางที่ 2 จะใช้เลข 2 แทนซึ่งจะหาได้เมื่อ $k_{c2}^2 < 0$ ดังนั้น k_{c2} จะมีค่าเป็นจำนวนเชิงซ้อนซึ่งกำหนดให้เป็น

$$k_{c2} = jh_2 \quad (3.9)$$

เมื่อทำให้ได้ $k_2^2 < \beta^2$ หรือ $\omega^2 \mu_0 \epsilon_2 < \beta^2$ จากค่าความเร็วของแสงในสุญญากาศเช่นเดียวกับในตัวกลางที่ 1 สมการ (3.9) นี้แสดงให้ทราบว่าความเร็วของแสงในตัวกลางที่ 2 คือ $c_2 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_2}}$ ของท่อนำคลื่นแบบระนาบซึ่งมีค่ามากกว่าความเร็วแสงในสุญญากาศนั่นเอง ค่า

คำตอบของสมการ (3.6) หรือลักษณะของสนามไฟฟ้าสำหรับตัวกลางที่ 2 จะมีค่าดังนี้

$$E_{y2} = C \exp(-h_2 x) \exp(j\omega t - j\beta z) \quad , \quad x \geq a \quad (3.10)$$

$$E_{y2} = D \exp(h_2 x) \exp(j\omega t - j\beta z) \quad , \quad x \leq -a \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำข้อมูลไปเผยแพร่และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ C และ D เป็นค่าคงที่ในตัวกลางที่ 2 สมการ (3.10) และ (3.11) แสดงให้ทราบว่า สนามไฟฟ้าในตัวกลางที่ 2 มีลักษณะเป็นคลื่นระนาบเคลื่อนที่ในทิศ z มีความเป็นโพลาไรซ์ในทิศ y ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลในทิศ x กล่าวคือเมื่อค่า x มากขึ้น แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าจะมีค่าลดน้อยลงหรืออาจกล่าวได้ว่าแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าลดลงเมื่อเคลื่อนที่ในตัวกลางที่ 2 นั้นเอง

จากการหาคำตอบของสมการ (3.6) ที่กล่าวมาแล้วนี้คือคำตอบของสนามไฟฟ้าซึ่งเคลื่อนที่ในท่อนำคลื่นแบบระนาบ สำหรับสนามแม่เหล็กในท่อนำคลื่นแบบระนาบสามารถหาได้เช่นเดียวกันโดยอาศัยสมการ (3.1) ทำให้ได้สนามแม่เหล็กดังต่อไปนี้

$$H_x = \frac{1}{j\omega\mu_0} \frac{\partial E_y}{\partial z} \quad (3.12)$$

$$H_z = -\frac{1}{j\omega\mu_0} \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (3.13)$$

3.1.2 คลื่นตามขวางที่มีความสมมาตรและไม่สมมาตรภายในท่อนำคลื่นแบบระนาบ

จากคำตอบของสมการคลื่น (3.6) ทำให้ทราบลักษณะของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในตัวกลางที่ 1 และ 2 ว่าลักษณะของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเหล่านี้จะมีความสมมาตรหรือไม่ขึ้นอยู่กับค่าคงที่ภายในคำตอบของสมการคลื่น นั่นคือสมการ (3.8), (3.10), (3.11), (3.12) และ (3.13) โดยหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสนามไฟฟ้าที่มีความสมมาตรเมื่อค่าคงที่ $B = 0$ และ $C = D$ โดยที่ไม่สมมาตรเมื่อค่าคงที่ $A = 0$ และ $C = -D$

3.1.2.1 คลื่นตามขวางที่มีความสมมาตร

สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในท่อนำคลื่นแบบระนาบจะมีความสมมาตรเมื่อค่าคงที่ $B = 0$ และ $C = D$ ดังนั้น สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าตามสมการ (3.8), (3.10), (3.11), (3.12) และ (3.13) มีค่าดังต่อไปนี้

$$E_{y1} = A \cos(h_1 x) \exp(j\omega t - j\beta z) \quad , \quad |x| \leq a \quad (3.14)$$

$$E_{y2} = C \exp(-h_2 |x|) \exp(j\omega t - j\beta z) \quad , \quad |x| \geq a \quad (3.15)$$

$$H_{x1} = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} A \cos(h_1 x) \exp(j\omega t - j\beta z) \quad , \quad |x| \leq a \quad (3.16)$$

$$H_{x2} = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} C \exp(-h_2 |x|) \exp(j\omega t - j\beta z) \quad , \quad |x| \geq a \quad (3.17)$$

$$H_{z1} = \frac{h_1}{j\omega\mu_0} A \sin(h_1 x) \exp(j\omega t - j\beta z) \quad , \quad |x| \leq a \quad (3.18)$$

$$H_{z2} = \frac{h_2}{j\omega\mu_0} C \exp(-h_2 x) \exp(j\omega t - j\beta z) \quad , \quad x \geq a \quad (3.19)$$

$$H_{z2} = -\frac{h_2}{j\omega\mu_0} C \exp(h_2 x) \exp(j\omega t - j\beta z) \quad , \quad x \leq -a \quad (3.20)$$

อาศัยเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ที่รอยต่อระหว่างตัวกลางที่ 1 และ 2 สนามไฟฟ้า E_y และสนามแม่เหล็ก H_z มีความต่อเนื่องระหว่างตัวกลางทั้งสองนั่นคือ $E_{y1} = E_{y2}$ และ $H_{z1} = H_{z2}$ จากสมการ (3.14) (3.15) (3.18) และ (3.19) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$A \cos(u) = C \exp(-w) \quad , \quad x = a \quad (3.21)$$

$$uA \sin(u) = wC \exp(-w) \quad , \quad x = a \quad (3.22)$$

เมื่อ u และ w เป็นตัวแปรที่กำหนดขึ้นใหม่มีค่าดังต่อไปนี้ $u = h_1 a$ และ $w = h_2 a$ นำสมการ (3.22) ทหารด้วยสมการ (3.21) ได้สมการใหม่ขึ้นสมการใหม่ที่ได้นี้เรียกว่า สมการลักษณะเฉพาะของคลื่นตามขวางที่มีความสมมาตร (Characteristic Equation for Symmetric TE waves) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$w = u \tan(u) \quad (3.23)$$

3.1.2.2 คลื่นตามขวางที่มีความไม่สมมาตร

สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในท่อนำคลื่นแบบระนาบจะมีความไม่สมมาตรเมื่อค่าคงที่ $A = 0$ และ $C = -D$ ดังนั้น สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามสมการ (3.8) (3.10) (3.11) (3.12) และ (3.13) มีค่าดังต่อไปนี้

$$E_{y1} = B \sin(h_1 x) \exp(j\omega t - j\beta z) \quad , \quad |x| \leq a \quad (3.24)$$

$$E_{y2} = C \exp(-h_2 x) \exp(j\omega t - j\beta z) \quad , \quad x \geq a \quad (3.25)$$

$$E_{y2} = -C \exp(h_2 x) \exp(j\omega t - j\beta z) \quad , \quad x \leq -a \quad (3.26)$$

$$H_{z1} = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} B \sin(h_1 x) \exp(j\omega t - j\beta z) \quad , \quad |x| \leq a \quad (3.27)$$

$$H_{z2} = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} C \exp(-h_2 x) \exp(j\omega t - j\beta z) \quad , \quad x \geq a \quad (3.28)$$

$$H_{z2} = \frac{\beta}{\omega\mu_0} C \exp(h_2 x) \exp(j\omega t - j\beta z) \quad , \quad x \leq -a \quad (3.29)$$

$$H_{z1} = -\frac{h_1}{j\omega\mu_0} B \cos(h_1 x) \exp(j\omega t - j\beta z) \quad , \quad |x| \leq a \quad (3.30)$$

$$H_{z2} = \frac{h_2}{j\omega\mu_0} C \exp(-h_2 x) \exp(j\omega t - j\beta z) \quad , \quad x \geq a \quad (3.31)$$

$$H_{z2} = \frac{h_2}{j\omega\mu_0} C \exp(h_2 x) \exp(j\omega t - j\beta z) \quad , \quad x \leq -a \quad (3.32)$$

อาศัยเงื่อนไขขอบเขตที่รอยต่อระหว่างตัวกลางที่ 1 และ 2 สนามไฟฟ้า E_y และสนามแม่เหล็ก H_z มีความต่อเนื่องระหว่างตัวกลางทั้งสองนั่นคือ $E_{y1} = E_{y2}$ และ $H_{z1} = H_{z2}$ เช่นเดียวกับกรณีหัวข้อ 3.1.2.1 จะได้สมการลักษณะเฉพาะของคลื่นตามขวางที่มีความไม่สมมาตร (Characteristic Equation for Antisymmetric TE waves) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$w = -u \cotan(u) \quad (3.33)$$

3.1.3 โหมดของคลื่นตามขวาง

จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้เป็นคือ $k_c^2 = k^2 + \gamma^2$, $k^2 \triangleq \omega^2 \mu_0 \epsilon \left(1 - \frac{j\sigma}{\omega\mu_0}\right)$, $k_{c1} = h_1$, $k_{c2} = jh_2$, $u = h_1 a$ และ $w = h_2 a$ ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง u และ w ได้ตามสมการ

$$\begin{aligned} u^2 + w^2 &= (h_1^2 + h_2^2) a^2 = (k_{c1}^2 - k_{c2}^2) a^2 = (k_1^2 - k_2^2) a^2 \\ &= \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 a^2 (\epsilon_{r1} - \epsilon_{r2}) = (k_0 a)^2 (\epsilon_{r1} - \epsilon_{r2}) \triangleq v^2 \end{aligned} \quad (3.34)$$

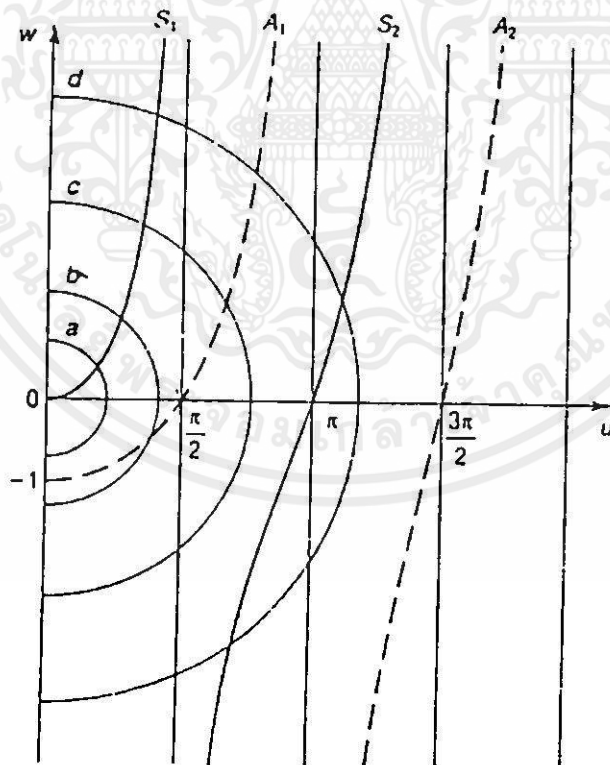
เมื่อ $k_0^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0$, ϵ_0 คือค่าสภาพอ่อนไหวทางไฟฟ้าในสุญญากาศและ ϵ_r คือค่าสภาพอ่อนไหวทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ของตัวกลางที่ i ขณะที่ $i = 1$ และ 2 จากสมการ (3.34) จะเรียกตัวแปร v นี้ว่าความถี่นอร์มอลไลซ์ (Normalized Frequency) โดยค่านี้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง u และ w ที่เป็นคำตอบของสมการ (3.23) และ (3.33) ซึ่งจะใช้ในการอธิบายการเกิดโหมดของคลื่นหรือแสงภายในท่อนำคลื่นแบบระนาบ

ดังนั้น ที่ความถี่หรือความยาวคลื่นค่าหนึ่ง จะมีค่าความถี่นอร์มอลไลซ์เฉพาะในแต่ละความถี่ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่า u และ w เพียงค่าเดียวเท่านั้นที่เป็นคำตอบของสมการลักษณะเฉพาะ (3.23) และ (3.33) นั่นเอง โดยพบว่าคำตอบของสมการเหล่านี้จะมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง (Discrete) ในลักษณะของคลื่นที่สอดคล้องกับความถี่นอร์มอลไลซ์ค่าหนึ่งจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าโหมด (Modes) การหาค่า u และ w นั้นจะอาศัยวิธีการสร้างกราฟในระบบพิกัดฉากเพื่อหาค่าตอบแสดง

ดังรูปที่ 3.2 กราฟนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง u และ w จากสมการ (3.23) ซึ่งแทนได้ด้วยเส้นทึบ S_1 และ S_2 ส่วนความสัมพันธ์ระหว่าง u และ w จากสมการ (3.33) จะแทนได้ด้วยเส้นประ A_1 และ A_2 นอกจากนี้ยังสร้างกราฟจากสมการ (3.34) บนรูป 3.2 นี้ด้วย โดยสมการ (3.34) เป็นสมการวงกลมที่มีรัศมี v มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดกำเนิดแทนได้ด้วยวงกลม a b c และ d จุดตัดวงกลมเหล่านี้กับเส้นทึบและเส้นประตามที่กล่าวมาแล้วคือค่า u และ w หรือคำตอบของสมการ (3.23) และ (3.33) นั่นเอง ซึ่งทำให้ทราบลักษณะของโหนดแสงได้และยังนำไปสู่การหาจำนวนโหนดของแสงได้ดังนี้

ถ้า $v < 1$ แล้ว จากรูปที่ 3.2 แทนได้ด้วยวงกลม a มีจุดตัดเพียงจุดเดียวซึ่งตัดกับเส้นทึบ S_1 สอดคล้องกับค่า w ที่เป็นบวกทำให้ทราบว่าสนามไฟฟ้าในตัวกลางที่ 2 มีค่าลดน้อยลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลเมื่อค่า x เพิ่มขึ้นตามสมการ (3.10) และ (3.11)

ถ้า $1 < v < \frac{\pi}{2}$ แล้วจะได้วงกลม b ดังรูปที่ 3.2 เกิดจุดตัดขึ้น 2 จุดที่เส้นประ A_1 และเส้นทึบ S_1 ที่จุดตัดกับเส้นประ A_1 จะมีค่า w เป็นลบทำให้ทราบว่าสนามไฟฟ้าในตัวกลางที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลเมื่อค่า x มีค่าเพิ่มขึ้นตามสมการ (3.10) และ (3.11)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.2 แสดงการหาคำตอบของสมการลักษณะเฉพาะด้วยวิธีการสร้างกราฟ

3.1.4 ค่าคงที่การเคลื่อนที่ของคลื่น

ในหัวข้อ 3.1.1 ได้กล่าวถึงค่าคงที่การเคลื่อนที่ของคลื่น $\gamma(\omega) = \alpha(\omega) + j\beta(\omega)$ ที่ประกอบด้วยค่าคงที่การลดทอน α และค่าคงที่เฟส β แสดงคุณสมบัติของคลื่นในแต่ละโหมดหรือความยาวคลื่นหรือความถี่นั่นเอง แต่สำหรับคลื่นที่ไม่มีการลดทอนภายในท่อนำคลื่นแบบระนาบ $\alpha = 0$ หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าคงที่การลดทอนไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ ดังนั้นค่าคงที่การเคลื่อนที่ที่จะประกอบด้วยค่าคงที่เฟสเท่านั้น จากสมการ $k_c^2 = k^2 + \gamma^2$, $k^2 \triangleq \omega^2 \mu_0 \epsilon \left(1 - \frac{j\sigma}{\omega\mu_0}\right)$, $\gamma = j\beta$, (3.7) , (3.9) , $u = h_1 a$, $w = h_2 a$ และ (3.34) จะได้ค่าคงที่เฟสดังนี้

$$\begin{aligned} \beta(\omega) &= \sqrt{\omega^2 \mu_0 \epsilon_1 - h_1^2} = \sqrt{\omega^2 \mu_0 \epsilon_2 + h_2^2} \\ &= \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_1} \sqrt{1 - \frac{u^2}{v^2} \left(1 - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}\right)} \end{aligned} \quad (3.35)$$

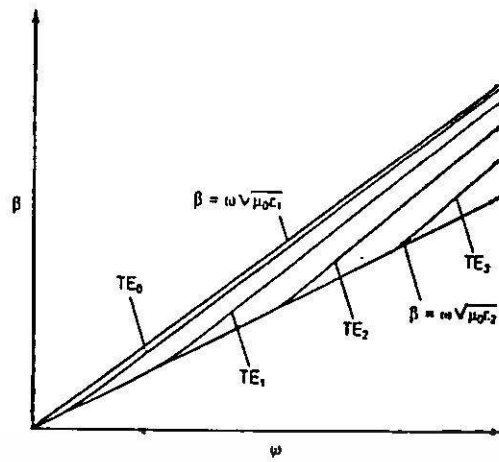
เนื่องจากแต่ละโหมดมีค่า u และความถี่อิมพลไลซ์ v เฉพาะตัวแตกต่างกัน ดังนั้นคลื่นในแต่ละโหมดจะมีค่าคงที่เฟสซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะในแต่ละโหมดด้วยตามสมการ (3.35) กรณีถ้า $w = 0$ หรือ $u^2 = v^2$ ในแต่ละโหมดดังนั้น $h_2 = 0$ โหมดของคลื่นที่เป็นไปตามเงื่อนไขนี้จะเรียกว่าความถี่คัทออฟ (Cut-off frequency, ω_c) ซึ่งเขียนสมการได้เป็น

$$\beta(\omega_c) = \omega_c \sqrt{\mu_0 \epsilon_2} \quad (3.36)$$

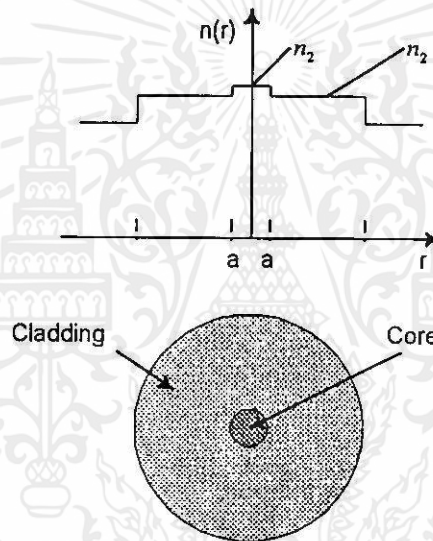
จากสมการ (3.36) แสดงให้เห็นว่าที่ความถี่คัทออฟนั้นค่าคงที่เฟสมีค่าเท่ากับของคลื่นซึ่งเคลื่อนที่ในตัวกลางที่ 2 และถ้า $\omega \rightarrow \infty$ แล้ว $\frac{u}{v} \rightarrow 0$ จากสมการ (3.35) จะได้ค่าคงที่เฟสคือ

$$\beta(\omega) \rightarrow \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_1} \quad (3.37)$$

ดังนั้น ถ้าความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นแล้วค่าคงที่เฟสจะมีค่าเข้าใกล้ค่าคงที่เฟสของคลื่นซึ่งเคลื่อนที่ในตัวกลางที่ 1 ดังรูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ ω ซึ่งทำให้ทราบค่าคงที่เฟสของคลื่นโหมดต่างๆ ดังนี้ TE_0 , TE_1 , TE_2 และ TE_3 นอกจากนี้ยังพบว่าภายในท่อนำคลื่นแบบระนาบจะมีโหมด TE_0 เกิดขึ้นอย่างน้อยที่สุดหนึ่งโหมดหรือกล่าวได้ว่าโหมด TE_0 ไม่มีความถี่คัทออฟ



รูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การเคลื่อนที่กับความถี่ของโหมดต่างๆ



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของดัชนีหักเหแสงของใยแก้วนำแสงชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ (รูปบน) เมื่อ n_1 คือดัชนีหักเหแสงบริเวณแกน n_2 คือดัชนีหักเหแสงบริเวณแคลดดิ้ง และ a คือรัศมีของแกนใยแก้วนำแสง ซึ่งมีภาคตัดขวางแสดงดังรูปด้านล่าง

3.2 การเคลื่อนที่ของคลื่นในใยแก้วนำแสง

จากหัวข้อที่ 3.1 ได้กล่าวถึงการเคลื่อนที่ของคลื่นในท่อนำคลื่นแบบระนาบ ซึ่งทำให้ทราบคำตอบของสมการคลื่นที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่องซึ่งก็คือโหมดของคลื่นนั่นเอง ในหัวข้อนี้จะอาศัยพื้นฐานจากหัวข้อดังกล่าวเพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของคลื่นในใยแก้วนำแสงชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ พร้อมทั้งศึกษาลักษณะของโหมดแสงแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามผู้ใดทำซ้ำหรือดัดแปลงโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ผลแบบสงวนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากใยแก้วนำแสงที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะของภาคตัดขวางและรูปแบบของดัชนีหักเหแสงดังรูปที่ 3.4 ประกอบไปด้วยแกนและแคลคดิงที่เป็นวัสดุไดอิเล็กตริก ดังนั้นในการวิเคราะห์จะให้แกนและแคลคดิงของใยแก้วนำแสงมีสมบัติทางไฟฟ้าเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.1 นอกจากนี้ยังมีความเป็นเอกพันธ์และความเป็นไอโซโทรปิก ในการวิเคราะห์จะเริ่มต้นจากสมการคลื่นของสนามไฟฟ้าดังนี้

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (3.38)$$

เมื่อ $k^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon - j\omega \mu_0 \sigma$ เนื่องจากใยแก้วนำแสงมีคุณสมบัติการสูญเสียเล็กน้อยมาก ดังนั้น $\sigma = 0$ โดยมีสภาพอ่อนไหวทางไฟฟ้าของแกนและแคลคดิงเป็น ϵ_1 และ ϵ_2 ตามลำดับ จากค่าคงที่การเคลื่อนที่ในหัวข้อ 3.1.4 ซึ่งทำให้ได้ $k_0 \Delta \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = \frac{\omega}{c_0}$ โดยเขียนค่าคงที่ k^2 ใหม่ได้เป็น $k^2 = k_0^2 \epsilon_r$ เมื่อ ϵ_r คือสภาพอ่อนไหวทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ และเนื่องจากใยแก้วนำแสงมีลักษณะเป็นทรงกระบอกดังนั้นการวิเคราะห์จึงอาศัยระบบพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical Coordinates) จึงเขียนสมการ (3.38) ใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} \nabla^2 \vec{E} &= \hat{a}_r \left(\nabla^2 E_r - \frac{2}{r^2} \frac{\partial E_\phi}{\partial \phi} - \frac{E_r}{r^2} \right) + \hat{a}_\phi \left(\nabla^2 E_\phi + \frac{2}{r^2} \frac{\partial E_r}{\partial \phi} - \frac{E_\phi}{r^2} \right) + \hat{a}_z (\nabla^2 E_z) \\ &= -k_0^2 \epsilon_r (\hat{a}_r E_r + \hat{a}_\phi E_\phi + \hat{a}_z E_z) \end{aligned} \quad (3.39)$$

เมื่อ \hat{a}_r , \hat{a}_ϕ และ \hat{a}_z คือยูนิตเวกเตอร์ในทิศ r , ϕ และ z ตามลำดับ และเพื่อให้การวิเคราะห์สะดวกขึ้นจะพิจารณาสนามไฟฟ้า E_z สมการ (3.39) โดยเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\nabla^2 E_z = -k_0^2 \epsilon_r E_z \quad (3.40)$$

อาศัยลาปลาซเซียนโอเปอร์เรเตอร์ (Laplacian Operator) ในระบบพิกัดทรงกระบอกดังนั้นสมการ (3.40) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} + k_0^2 \epsilon_r E_z = 0 \quad (3.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (3.41) สามารถหาคำตอบได้โดยวิธีการแยกตัวแปร (Separation of Variables)

โดยการสมมติให้สนามไฟฟ้า E_z เกิดจากผลคูณของสามฟังก์ชัน

$$E_z = R(r)\phi(\varphi)Z(z) \quad (3.42)$$

เมื่อ $R(r)$ เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับ r , $\phi(\varphi)$ เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับ φ และ $Z(z)$ เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับ z เท่านั้น เมื่อแทนค่าสมการ (3.42) ลงใน (3.41) และหารด้วย $R\phi Z$ จะได้

$$\frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = - \left(\frac{1}{R} \frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{1}{R} \frac{dR}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{1}{\phi} \frac{d^2 \phi}{d\varphi^2} + k^2 \epsilon_r \right) \quad (3.43)$$

เนื่องจากทางด้านขวาของสมการนี้ไม่ขึ้นอยู่กับ z จึงทำให้ด้านขวาไม่มีผลต่อสมการนี้จึงสามารถแทนได้ด้วยค่าคงที่ γ^2 ซึ่งทำให้ได้

$$\frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = \gamma^2 \quad (3.44)$$

สมการ (3.44) นี้มีคำตอบคือ -

$$Z(z) = C_1 \exp(-\gamma z) + C_2 \exp(\gamma z) \quad (3.45)$$

เมื่อ C_1 และ C_2 เป็นค่าคงที่ซึ่งสามารถหาได้จากเงื่อนไขขอบเขต γ คือค่าคงที่การเคลื่อนที่ของคลื่นดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.1.4 แต่ในหัวข้อนี้จะพิจารณาเฉพาะคลื่นที่เคลื่อนที่ในทิศ z ดังนั้น $C_2 = 0$ เมื่อแทนค่าสมการ (3.44) ลงใน (3.43) จะได้

$$\frac{1}{\phi} \frac{d^2 \phi}{d\varphi^2} = - \left(\frac{r^2}{R} \frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{r}{R} \frac{dR}{dr} + \gamma^2 r^2 + r^2 k^2 \epsilon_r \right) \quad (3.46)$$

สมการนี้สามารถหาคำตอบได้เช่นเดียวกับสมการ (3.43) โดยทางขวาของสมการสามารถแทนได้ด้วยค่าคงที่ $-n^2$ ซึ่งจะได้คำตอบดังต่อไปนี้

$$\phi(\varphi) = C_3 \cos(n\varphi) + C_4 \sin(n\varphi) \quad (3.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เมื่อ C_3 และ C_4 คือค่าคงที่ สมการ (3.47) นี้จะมีค่าเหมือนเดิมทุกๆ 2π และ n เป็นจำนวนเต็ม ดังนั้นเพื่อให้การหาคำตอบสะดวกขึ้นโดยการแทนค่าคงที่ γ^2 และ $-n^2$ ลงในสมการ (3.43) ซึ่งจะได้สมการดิฟเฟอเรนเชียลเชิงเส้น (Linear Differential Equation)

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + \left(\gamma^2 + k_0^2 \epsilon_r - \frac{n^2}{r^2} \right) R = 0 \quad (3.48)$$

และเพื่อให้สามารถหาคำตอบได้สะดวกขึ้นจะกำหนดตัวแปรขึ้นใหม่คือ $h^2 = \gamma^2 + k_0^2 \epsilon_r$ ดังนั้นสมการ (3.48) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + \left(h^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) R = 0 \quad (3.49)$$

สมการ (3.49) นี้เรียกว่าสมการดิฟเฟอเรนเชียลเบสเซล (Bessel's Differential Equation) และมีคำตอบที่เรียกว่าเบสเซลฟังก์ชัน (Bessel Function)

3.2.1 คลื่นที่ไม่มีการลดทอนภายในใยแก้วนำแสง

จากหัวข้อ 3.1.1 ในการเคลื่อนที่ของคลื่นในท่อนำคลื่นแบบระนาบทำให้การหาคำตอบง่ายขึ้นโดยกำหนดให้ $\alpha = 0$ ดังนั้น $\gamma = j\beta$ เขียนค่าคงที่ h^2 ใหม่ได้เป็น $h^2 = -\beta^2 + k_0^2 \epsilon_r$ เนื่องจากคลื่นไม่มีการลดทอนจึงสนใจการเปลี่ยนแปลงของคลื่นในทิศ r เป็นหลัก ดังนั้นเพื่อให้หาคำตอบสมการ (3.49) ได้จะให้ค่าคงที่ h^2 มีค่าเป็นบวกบริเวณแกนและเป็นลบบริเวณแคลดคิงของใยแก้วนำแสง โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างสภาพอ่อนไหวทางไฟฟ้ากับดัชนีหักเหแสงของแกนและแคลดคิงจะได้

$$n_1 = \sqrt{\epsilon_{r1}} \quad \text{และ} \quad n_2 = \sqrt{\epsilon_{r2}} \quad (3.50)$$

3.2.1.1 สนามไฟฟ้าบริเวณแกนใยแก้วนำแสง

ในการพิจารณาสนามไฟฟ้าบริเวณแกนของใยแก้วนำแสงจะกำหนดให้ $h = h_1$ มีค่าเป็นจำนวนจริงและที่บริเวณนี้ h^2 มีค่าเป็นบวกดังนั้น

$$h_1^2 = -\beta^2 + k_0^2 n_1^2 > 0 \quad (3.51)$$

สมการนี้แสดงให้เห็นทราบว่าความเร็วของคลื่นบริเวณแกน $\frac{\omega}{kn_1}$ ของใยแก้วนำแสงมีค่าน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กว่าความเร็วของคลื่นในสูญญากาศ $\frac{\omega}{\beta}$ จากสมการ (3.49) สามารถหาสนามไฟฟ้าบริเวณแกนของ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ใยแก้วนำแสงได้จาก

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + \left(h_1^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) R = 0 \quad (3.52)$$

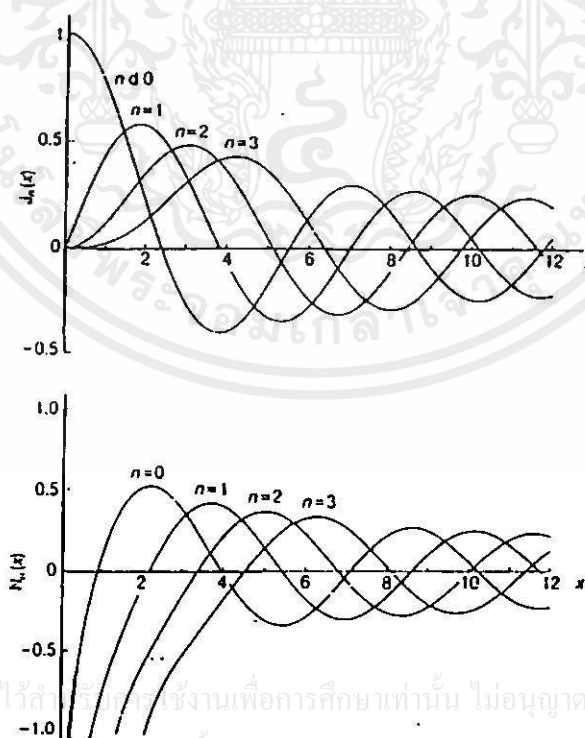
คำตอบของสมการ (3.52) นี้คือ

$$R(r) = C_5 J_n(h_1 r) + C_6 N_n(h_1 r) \quad (3.53)$$

เมื่อ J_n และ N_n คือเบสเซลฟังก์ชันอันดับที่ n ชนิดที่หนึ่งและสองตามลำดับ ซึ่งฟังก์ชันเหล่านี้แสดงได้ดังรูปที่ 3.5 โดยมี C_5 และ C_6 คือค่าคงที่ เนื่องจากบริเวณแกนหรือ $N_n(0) = -\infty$ ซึ่งไม่สามารถหาคำตอบได้ ดังนั้น $C_6 = 0$ จากการหาคำตอบด้วยวิธีการแยกตัวแปรที่สนามไฟฟ้าเกิดจากผลคูณของสามฟังก์ชัน จึงหาคำตอบของสมการ (3.7) หรือลักษณะของสนามไฟฟ้าบริเวณแกนได้ดังนี้

$$E_z = J_n(h_1 r) (A_1 \cos(n\phi) + B_1 \sin(n\phi)) \exp(j\omega t - \gamma z), \quad r < a \quad (3.54)$$

เมื่อ $A_1 = C_1 C_3 C_5$, $B_1 = C_1 C_4 C_5$ และ a คือรัศมีของแกนใยแก้วนำแสง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.5 แสดงเบสเซลฟังก์ชันอันดับที่ n ชนิดที่หนึ่ง(บน) และสอง(ล่าง)

3.2.1.2 สนามไฟฟ้าบริเวณแคลคดิงโยแก้วนำแสง

ในการพิจารณาสนามไฟฟ้าบริเวณแคลคดิงของโยแก้วนำแสงจะกำหนดให้ $h = jh_2$ เมื่อ h_2 มีค่าเป็นจำนวนจริงและที่บริเวณนี้ h^2 มีค่าเป็นลบดังนั้น

$$-h_2^2 = -\beta^2 + k_0^2 n_2^2 < 0 \quad (3.55)$$

สมการนี้แสดงให้เห็นทราบว่าความเร็วของคลื่นบริเวณแคลคดิงของโยแก้วนำแสง $\frac{\omega}{kn_2}$ มีค่ามากกว่าความเร็วของคลื่นในสุญญากาศ $\frac{\omega}{\beta}$ จากสมการ (3.49) สามารถหาสนามไฟฟ้าบริเวณแคลคดิงของโยแก้วนำแสงได้จาก

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} - \left(h_2^2 + \frac{n^2}{r^2} \right) R = 0 \quad (3.56)$$

คำตอบของสมการ (3.56) นี้คือ

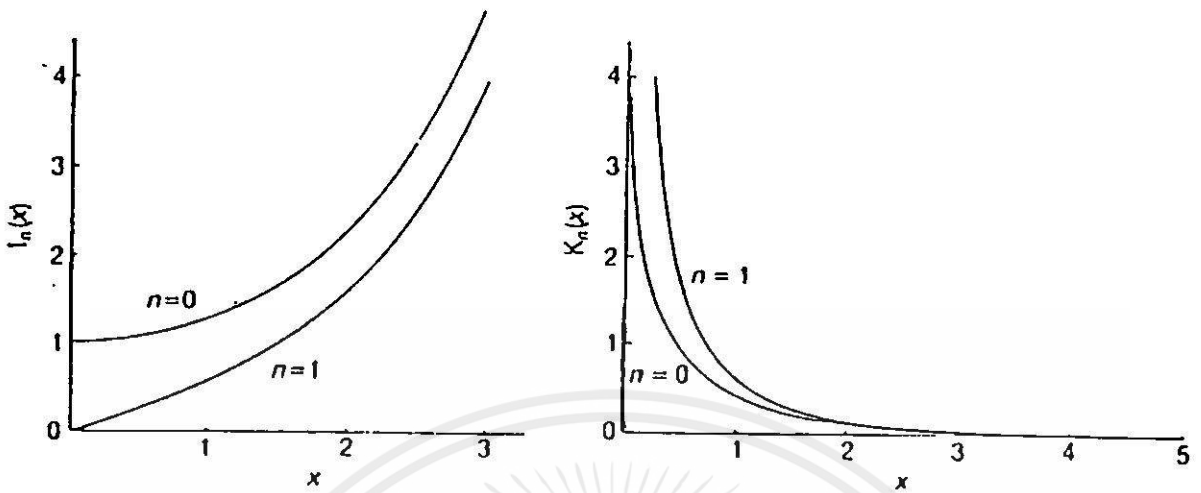
$$R(r) = C_7 I_n(h_2 r) + C_8 K_n(h_2 r) \quad (3.57)$$

เมื่อ I_n และ K_n คือเบสเซลฟังก์ชันที่ถูกเปลี่ยนแปลง (Modified Bessel Function) อันดับที่ n ชนิดที่หนึ่งและสองตามลำดับ ซึ่งฟังก์ชันเหล่านี้แสดงได้ดังรูปที่ 3.6 โดยมี C_7 และ C_8 คือค่าคงที่ เนื่องจากบริเวณแคลคดิงหรือ $I_n(\infty) = \infty$ ไม่สามารถหาค่าขอบได้ ดังนั้น $C_7 = 0$ จากการหาคำตอบด้วยวิธีการแยกตัวแปรสนามไฟฟ้าที่เกิดจากผลคูณของสามฟังก์ชัน จึงหาคำตอบของสมการ (3.7) หรือลักษณะของสนามไฟฟ้าบริเวณแคลคดิงได้ดังนี้

$$E_z = K_n(h_2 r) (A_2 \cos(n\phi) + B_2 \sin(n\phi)) \exp(j\omega t - \gamma z) \quad , \quad r > a \quad (3.58)$$

เมื่อ $A_2 = C_1 C_3 C_8$, $B_2 = C_1 C_4 C_8$ และ a คือรัศมีของแกนโยแก้วนำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงเบสเซลฟังก์ชันที่ถูกเปลี่ยนแปลงอันดับที่ n ชนิดที่หนึ่ง(ซ้าย) และสอง(ขวา)

3.2.1.3 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในทิสอื่น ๆ

จากหัวข้อที่ผ่านมาทำให้ทราบสนามไฟฟ้า E_z ในส่วนของสนามแม่เหล็ก H_z จะสามารถหาได้ด้วยวิธีเดียวกันโดยมีคำตอบดังนี้

$$H_z = J_n(h_1 r)(F_1 \cos(n\phi) + G_1 \sin(n\phi)) \exp(j\omega t - \gamma z) \quad , \quad r < a \quad (3.59)$$

$$H_z = K_n(h_2 r)(F_2 \cos(n\phi) + G_2 \sin(n\phi)) \exp(j\omega t - \gamma z) \quad , \quad r > a \quad (3.60)$$

เมื่อ F_1 , G_1 , F_2 และ G_2 คือค่าคงที่ เมื่อทราบสนามไฟฟ้า E_z และสนามแม่เหล็ก H_z แล้วจะทำให้หาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในทิศทางอื่นได้โดยการแทนค่าสนามไฟฟ้า E_z และสนามแม่เหล็ก H_z ลงในสมการต่อไปนี้ซึ่งหาได้จากสมการของแมกซ์เวลล์

$$E_r = -\frac{1}{h^2} \left[\gamma \frac{\partial E_z}{\partial r} + j \frac{\omega \mu}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right] \quad (3.61)$$

$$E_\phi = \frac{1}{h^2} \left[-\frac{\gamma}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} + j \omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial r} \right] \quad (3.62)$$

$$H_r = \frac{1}{h^2} \left[j \frac{\omega \epsilon}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \gamma \frac{\partial H_z}{\partial r} \right] \quad (3.63)$$

$$H_\phi = -\frac{1}{h^2} \left[j \omega \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{\gamma}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right] \quad (3.64)$$

3.2.2 คลื่นตามขวาง คลื่นผสม และโหนด

คลื่นในใยแก้วนำแสงชนิดสเต็ปอินเด็กซ์สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทด้วยกันดังต่อไปนี้ ประเภทแรกคือคลื่นตามขวางสนามไฟฟ้าหรือ TE (Transverse Electric) ซึ่งบางครั้งเรียกว่าคลื่นสนามแม่เหล็กหรือ H โดยคลื่นประเภทแรกนี้มีคุณสมบัติคือ $E_z = 0$ และ $H_z \neq 0$ ที่กล่าวว่า เป็นคลื่น TE นั้นก็เพราะว่ามีเฉพาะสนามไฟฟ้าเท่านั้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ประเภทที่สองคือคลื่นตามขวางแม่เหล็กหรือ TM (Transverse Magnetic) ซึ่งบางครั้งเรียกว่าคลื่นสนามไฟฟ้าหรือ E โดยคลื่นประเภทนี้มีคุณสมบัติคือ $E_z \neq 0$ และ $H_z = 0$ ที่กล่าวว่าเป็นคลื่น TM นั้นก็เพราะว่ามีเฉพาะสนามแม่เหล็กเท่านั้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น และประเภทสุดท้ายคือคลื่นผสมหรือ HE (Hybrid Waves) โดยคลื่นผสมนี้มีคุณสมบัติคือ $E_z \neq 0$ และ $H_z \neq 0$ ที่เรียกว่าคลื่นผสมนั้นก็เพราะว่ามีทั้งส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น จากคลื่นทั้งสามประเภทนี้จะเห็นว่าคลื่นสองประเภทแรกจะเป็นกรณีเฉพาะของคลื่นผสมโดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.2.1 คลื่นตามขวางสนามไฟฟ้า

จากคุณสมบัติของคลื่น TE คือ $H_z \neq 0$ จึงพิจารณาสมการ (3.59) และ (3.60) เนื่องจากทั้งสองสมการขึ้นอยู่กับ z และ t เหมือนกันดังนั้นเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$H_z = J_n(h_1 r)(F_1 \cos(n\phi) + G_1 \sin(n\phi)) \quad , \quad r < a \quad (3.65)$$

$$H_z = K_n(h_2 r)(F_2 \cos(n\phi) + G_2 \sin(n\phi)) \quad , \quad r > a \quad (3.66)$$

เนื่องจากคลื่นตามขวางสนามไฟฟ้ามี $E_z = 0$ และ $H_z \neq 0$ จะสามารถหาสนามแม่เหล็กตามสมการ (3.64) ได้โดยแทนค่าสมการ (3.65) และ (3.66) จะได้

$$H_\phi = \frac{n\gamma}{h_1^2 r} J_n(h_1 r)(F_1 \sin(n\phi) - G_1 \cos(n\phi)) \quad , \quad r < a \quad (3.67)$$

$$H_\phi = -\frac{n\gamma}{h_2^2 r} K_n(h_2 r)(F_2 \sin(n\phi) - G_2 \cos(n\phi)) \quad , \quad r > a \quad (3.68)$$

อาศัยเงื่อนไขขอบเขตสนามแม่เหล็ก H_z มีความต่อเนื่องบริเวณแกนและแคลดดิ้ง จากสมการ (3.65) และ (3.66) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_1 J_n(u) = F_2 K_n(w) \quad (3.69)$$

เมื่อ $u = h_1 a$ และ $w = h_2 a$ เช่นเดียวกับการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของคลื่นในท่อนำคลื่นแบบระนาบ โดยอาศัยเงื่อนไขขอบเขตสนามแม่เหล็ก H_φ ซึ่งมีความต่อเนื่องบริเวณแกนและแคลดดิ้ง จากสมการ (3.67) และ (3.68) จะได้

$$-\frac{F_1}{h_1^2} J_n(u) = \frac{F_2}{h_2^2} K_n(w) \quad (3.70)$$

เนื่องจากเงื่อนไขของเขตทำให้ทราบว่าสมการ (3.69) และ (3.70) จะเป็นจริงเมื่อ $n=0$ ในกรณีนี้ $H_\varphi = 0$ และเงื่อนไขความต่อเนื่องตามสมการ (3.70) สามารถตัดทิ้งได้ เมื่อแทนค่า $n=0$ ลงในสมการ (3.65) และ (3.66) จึงได้

$$H_z = F_1 J_0(h_1 r) \quad , \quad r < a \quad (3.71)$$

$$H_z = F_2 K_0(h_2 r) \quad , \quad r > a \quad (3.72)$$

และสมการ (3.69) เมื่อ $n=0$ คือ

$$F_1 J_0(u) = F_2 K_0(w) \quad (3.73)$$

เนื่องจาก H_z ไม่ขึ้นอยู่กับ φ ดังนั้น $E_r = 0$ ตามสมการ (3.61) ต่อไปนี้เป็นการหาสนามแม่เหล็ก H_r จากสมการ (3.63) จึงทำให้ได้

$$H_r = -\frac{\gamma}{h_1} F_1 J_0'(h_1 r) \quad , \quad r < a \quad (3.74)$$

$$H_r = \frac{\gamma}{h_1} F_2 K_0'(h_2 r) \quad , \quad r > a \quad (3.75)$$

สำหรับสนามไฟฟ้า E_φ ซึ่งหาได้จากสมการ (3.62) โดยแทนค่าสมการ (3.71) และ (3.72) จะได้

$$E_\varphi = \frac{1}{h_1} F_1 j\omega\mu_0 J_0'(h_1 r) \quad , \quad r < a \quad (3.76)$$

$$E_\varphi = -\frac{1}{h_2 j} j\omega\mu_0 K_0'(h_2 r) \quad , \quad r > a \quad (3.77)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก แจกจ่าย หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

อาศัยเงื่อนไขขอบเขตของสนามแม่เหล็ก H_z และสนามไฟฟ้า E_ρ มีความต่อเนื่องบริเวณแกนและแกลดคิงจึงได้

$$\frac{1}{h_1} F_1 J'_0(u) = -\frac{1}{h_2} F_2 K'_0(w) \quad (3.78)$$

อาศัยเงื่อนไขขอบเขตของตัวกลางทั้งสองตามสมการ (3.73) และ (3.78) ทำให้หาสมการลักษณะเฉพาะของคลื่นตามขวางสนามไฟฟ้า TE ได้ดังนี้

$$\frac{1}{u} \frac{J'_0(u)}{J_0(u)} = -\frac{1}{w} \frac{K'_0(w)}{K_0(w)} \quad (3.79)$$

สมการลักษณะเฉพาะนี้จะนำไปสู่การวิเคราะห์โหมดของคลื่น และลักษณะของคลื่นในแต่ละโหมดได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง u , w และ v จากนิยามของความถี่นอร์มอลไลซ์ เช่นเดียวกับการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของคลื่นภายในท่อนำคลื่นแบบระนาบ

$$v \triangleq \frac{\omega a}{c_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3.80)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง u , w และ v ซึ่งหาได้จากสมการ (3.51) และ (3.55) ดังต่อไปนี้

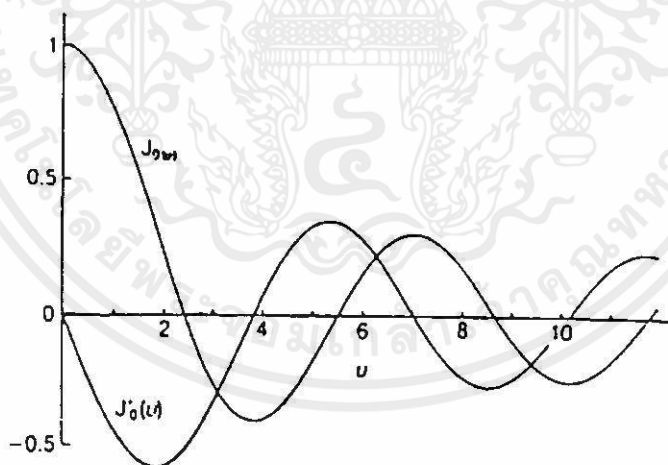
$$v^2 = u^2 + w^2 \quad (3.81)$$

สมการแสดงลักษณะเฉพาะนี้จะหาคำตอบหรือค่า u , w และ v ได้โดยอาศัยสมการ (3.81) โดยคำตอบจะมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง เมื่อได้ค่า u และ w แล้วสามารถทราบลักษณะของสนามไฟฟ้า E_ρ , H_z และ H_ρ ที่บริเวณแกนและแกลดคิงของใยแก้วนำแสงได้ ในการหาคำตอบของสมการลักษณะเฉพาะนี้ไม่สามารถทำได้ด้วยวิธีการปกติแต่สามารถหาคำตอบได้ด้วยวิธีการสร้างกราฟดังต่อไปนี้

3.2.2.2 การหาคำตอบสมการลักษณะเฉพาะด้วยวิธีการสร้างกราฟ

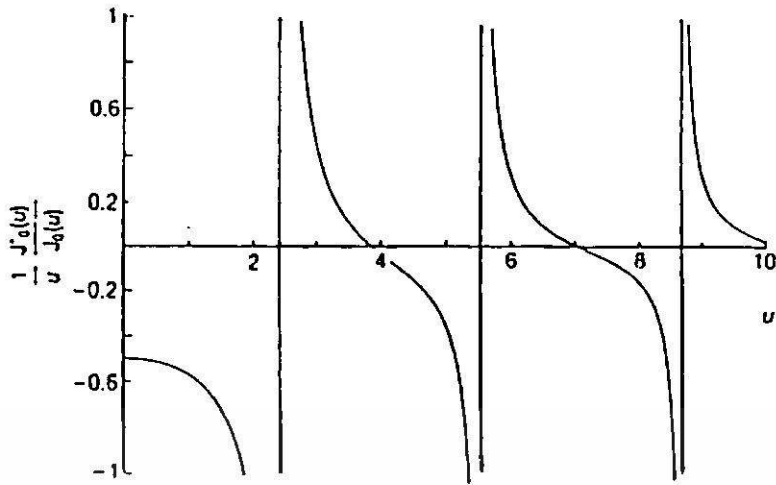
ก่อนที่จะกล่าวถึงคำตอบของสมการลักษณะเฉพาะนั้น จะพิจารณาลักษณะของกราฟ $J_0(u)$ และ $J'_0(u)$ แสดงดังรูปที่ 3.7 ซึ่งทำให้ได้ลักษณะของกราฟทางด้านซ้ายของสมการ (3.79) ที่ขึ้นอยู่กับ u เท่านั้นดังรูปที่ 3.8 ส่วนลักษณะของกราฟ $K_0(w)$ และ $K'_0(w)$ แสดงดังรูปที่ 3.9 ซึ่งทำ

ให้ได้ลักษณะของกราฟทางด้านขวาของสมการ (3.79) ที่ขึ้นอยู่กับ w เท่านั้นดังรูปที่ 3.10 เมื่อนำกราฟทั้งสองด้านของสมการ (3.79) มาสร้างบนรูปเดียวกันจึงได้กราฟดังรูปที่ 3.11 เมื่อพิจารณารูปนี้โดยกำหนดให้ $v = 8$ กรณีนี้กราฟทั้งสองเกิดจุดตัดขึ้นสองจุด โดยที่จุดตัดทั้งสองนี้คือค่า u ซึ่งเป็นคำตอบของสมการลักษณะเฉพาะนั่นเอง เมื่อได้ค่า v และ u จะสามารถหาค่า w ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสามตามสมการ (3.81) จากคำตอบที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าค่า u และ w มีความสัมพันธ์กับความถี่หรือโหมดของคลื่นที่เปลี่ยนไปขณะเดินทางในใยแก้วนำแสง ดังนั้นคลื่นในแต่ละโหมดจะมีค่า u และ w ที่แตกต่างกันออกไป ทำให้เกิดโหมดขึ้นต่างกันและลักษณะของสนามไฟฟ้าจะแตกต่างกันตามไปด้วย โหมดที่สอดคล้องกับจุดตัดของกราฟ $J_0(u) = 0$ ระหว่างอันดับที่ m และ $m+1$ นี้จะเรียกว่าโหมด H_{0m} หรือโหมด TE_{0m} นั่นเอง ตัวอย่างเช่น กราฟ $J_0(u)$ มีค่าเป็นศูนย์ที่ค่า u ประมาณ 2.405 และ 5.5 จากรูปที่ 3.11 จะเห็นว่าที่ค่า $u = 2.405$ เป็นจุดตัดแรกของกราฟ $J_0(u) = 0$ อันดับที่ 1 และ $u = 5.5$ เป็นจุดตัดของกราฟอันดับที่ 2 ระหว่างสองค่านี้จะพบว่าเกิดจุดตัดขึ้นหนึ่งจุด จึงเรียกโหมดนี้ว่า H_{01} หรือ TE_{01} กรณีค่า $u < 2.405$ จากรูปที่ 3.11 จะไม่เกิดจุดตัดระหว่างกราฟทั้งสองเส้นขึ้นดังนั้นจึงไม่เกิดโหมด H_{0m} ขึ้น กรณีความถี่ซึ่งทำให้ $u = v$ และ $w = 0$ แล้วจะเรียกความถี่นี้ว่าความถี่คัตออฟ (Cut-off Frequency)

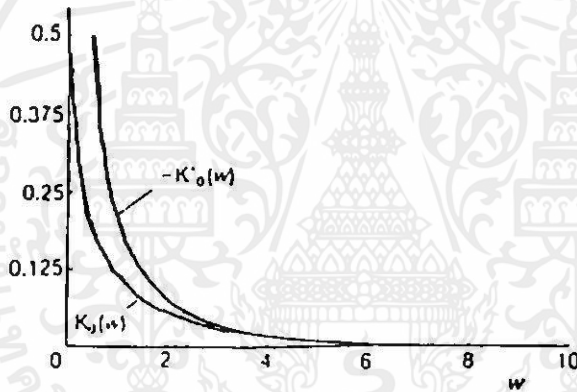


รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของกราฟ $J_0(u)$ และ $J'_0(u)$

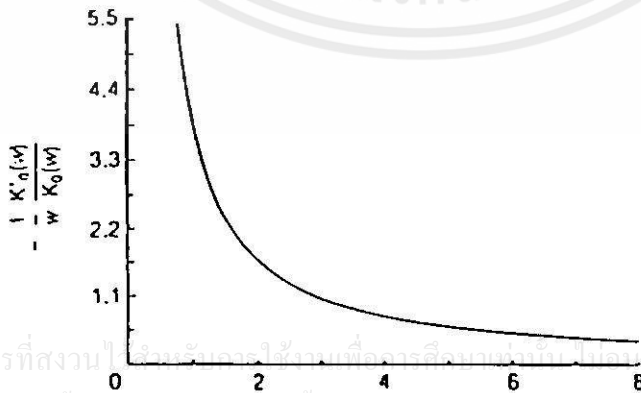
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะของกราฟทางด้านซ้ายของสมการ (3.79)

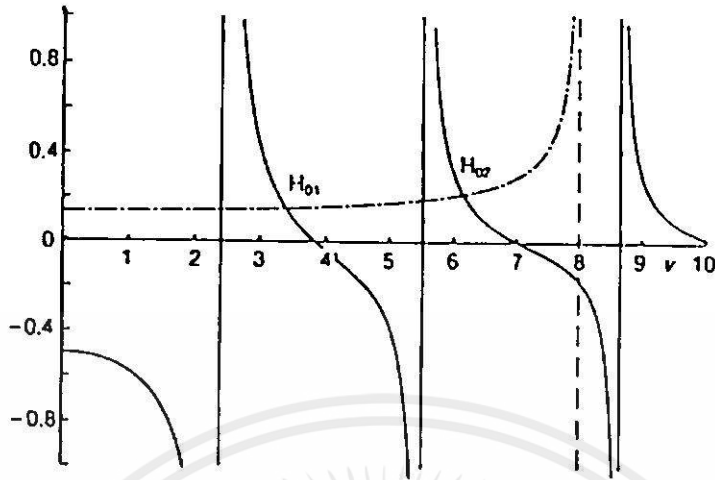


รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะของกราฟ $K_0(w)$ และ $K'_0(w)$



รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะของกราฟทางด้านขวาของสมการ (3.79)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะกราฟของสมการลักษณะเฉพาะ (3.79)

3.2.2.3 คลื่นตามขวางสนามแม่เหล็ก

คลื่นตามขวางสนามแม่เหล็กหรือ TM ซึ่งบางครั้งเรียกว่าคลื่นสนามไฟฟ้าหรือ E โดยคลื่นชนิดนี้มีคุณสมบัติคือ $E_z \neq 0$ และ $H_z = 0$ โดยอาศัยวิธีการหาค่าตอบเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.2.2.1 ได้สมการลักษณะเฉพาะที่คล้ายคลึงกันกับคลื่นตามขวางสนามไฟฟ้างี้

$$\frac{\varepsilon_1 J_0(u)}{u J_0(u)} = -\frac{\varepsilon_2 K_0'(w)}{w K_0(w)} \quad (3.82)$$

เมื่ออาศัยเงื่อนไขขอบเขตของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กทำให้ทราบลักษณะของคลื่นและโหมดได้ โดยโหมดของคลื่นตามขวางสนามแม่เหล็กจะเรียกว่าโหมด TM_{0m} หรือ E_{0m}

3.2.2.4 คลื่นผสม

เนื่องจากคลื่นผสมมีคุณสมบัติ $E_z \neq 0$ และ $H_z \neq 0$ จากสมการ (3.54) (3.58) (3.59) และ (3.60) จะได้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในทิศทางต่างๆ บริเวณแกนและแคลดดิ้งดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง $E_z = J_n(h_1 r)(A_1 \cos(n\phi) + B_1 \sin(n\phi))$, $r < a$ ซึ่งมีการ (3.83)

$$E_z = K_n(h_2 r)(A_2 \cos(n\phi) + B_2 \sin(n\phi)) \quad , \quad r > a \quad (3.84)$$

$$H_z = J_n(h_1 r)(F_1 \cos(n\varphi) + G_1 \sin(n\varphi)) \quad , \quad r < a \quad (3.85)$$

$$H_z = K_n(h_2 r)(F_2 \cos(n\varphi) + G_2 \sin(n\varphi)) \quad , \quad r > a \quad (3.86)$$

จากสมการ (3.62) สามารถหาสนามไฟฟ้า E_φ ได้เป็น

$$E_\varphi = \frac{1}{h_1^2} \left[-\frac{\gamma}{r} J_n(h_1 r)(-A_1 n \sin(n\varphi) + B_1 n \cos(n\varphi)) + j\omega\mu_0 h_1 J_n'(h_1 r)(F_1 \cos(n\varphi) + G_1 \sin(n\varphi)) \right] \quad r < a \quad (3.87)$$

$$E_\varphi = -\frac{1}{h_2^2} \left[-\frac{\gamma}{r} K_n(h_2 r)(-A_2 n \sin(n\varphi) + B_2 n \cos(n\varphi)) + j\omega\mu_0 h_2 K_n'(h_2 r)(F_2 \cos(n\varphi) + G_2 \sin(n\varphi)) \right] \quad r > a \quad (3.88)$$

อาศัยเงื่อนไขขอบเขตของสนามไฟฟ้า E_φ มีความต่อเนื่องที่บริเวณ $r = a$ จะได้

$$\left\{ \frac{1}{h_1^2} \left[\frac{n\gamma}{a} A_1 J_n(u) + j\omega\mu_0 h_1 G_1 J_n'(u) \right] + \frac{1}{h_2^2} \left[\frac{n\gamma}{a} A_2 K_n(w) + j\omega\mu_0 h_2 G_2 K_n'(w) \right] \right\} \sin(n\varphi) + \left\{ \frac{1}{h_1^2} \left[-\frac{n\gamma}{a} B_1 J_n(u) + j\omega\mu_0 h_1 F_1 J_n'(u) \right] + \frac{1}{h_2^2} \left[-\frac{n\gamma}{a} B_2 K_n(w) + j\omega\mu_0 h_2 F_2 K_n'(w) \right] \right\} \cos(n\varphi) = 0 \quad (3.89)$$

เนื่องจากสมการ (3.89) ไม่สามารถหาคำตอบได้ด้วยวิธีปกติ เพราะว่ามีหลายตัวแปรภายในสมการเดียวกัน เพื่อให้หาคำตอบได้จึงสมมุติให้ค่าคงที่ B_1, B_2, F_2 และ F_1 เท่ากับศูนย์จะทำให้หาคำตอบที่เกี่ยวข้องกับค่าคงที่ A_1, A_2, G_1 และ G_2 ได้ หรืออีกกรณีหนึ่งคือถ้าสมมุติให้ค่าคงที่ A_1, A_2, G_1 และ G_2 เท่ากับศูนย์แล้วจะหาคำตอบที่เกี่ยวข้องกับค่าคงที่ B_1, B_2, F_2 และ F_1 ได้โดยคำตอบจากทั้งสองกรณีจะออร์ทोगอนัล (Orthogonal) กัน

พิจารณากรณีแรกคือ B_1, B_2, F_2 และ F_1 เท่ากับศูนย์ได้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามสมการ (3.83), (3.84), (3.85) และ (3.86) ดังนี้

$$E_z = A_1 J_n(h_1 r) \cos(n\varphi) \quad , \quad r < a \quad (3.90)$$

$$E_z = A_2 K_n(h_2 r) \cos(n\varphi) \quad , \quad r > a \quad (3.91)$$

$$H_z = G_1 J_n(h_1 r) \sin(n\varphi) \quad , \quad r < a \quad (3.92)$$

$$H_z = G_2 K_n(h_2 r) \sin(n\varphi) \quad , \quad r > a \quad (3.93)$$

ขณะที่สมการ (3.87) และ (3.88) เขียนใหม่ได้เป็น

$$E_\phi = \frac{1}{h_1^2} \left[\frac{n\gamma}{r} A_1 J_n(h_1 r) + j\omega\mu_0 h_1 G_1 J_n'(h_1 r) \right] \sin(n\phi) \quad , \quad r < a \quad (3.94)$$

$$E_\phi = -\frac{1}{h_2^2} \left[\frac{n\gamma}{r} A_2 J_n(h_2 r) + j\omega\mu_0 h_2 G_2 K_n'(h_2 r) \right] \sin(n\phi) \quad , \quad r > a \quad (3.95)$$

ในการหาสมการลักษณะเฉพาะซึ่งต้องใช้สนามไฟฟ้า E_r จากสมการ (3.61) จะได้

$$E_r = -\frac{1}{h_1^2} \left[\gamma h_1 A_1 J_n'(h_1 r) + j \frac{\omega\mu n}{r} G_1 J_n(h_1 r) \right] \cos(n\phi) \quad , \quad r < a \quad (3.96)$$

$$E_r = \frac{1}{h_1^2} \left[\gamma h_2 A_2 K_n'(h_2 r) + j \frac{\omega\mu n}{r} G_2 K_n(h_2 r) \right] \cos(n\phi) \quad , \quad r > a \quad (3.97)$$

การหาสมการลักษณะเฉพาะโดยอาศัยเงื่อนไขขอบเขตต่างๆ ดังนี้ โดยใช้ความต่อเนื่องของสนามไฟฟ้า E_z และสนามแม่เหล็ก H_z จะได้

$$A_2 = A_1 \frac{J_n(u)}{K_n(w)} \quad (3.98)$$

$$G_2 = G_1 \frac{J_n(u)}{K_n(w)} \quad (3.99)$$

จากความต่อเนื่องของสนามไฟฟ้า E_ϕ จะได้

$$\frac{1}{h_1^2} \left[\frac{n\gamma}{a} A_1 J_n(u) + j\omega\mu_0 h_1 G_1 J_n'(u) \right] = -\frac{1}{h_2^2} \left[\frac{n\gamma}{a} A_2 K_n(w) + j\omega\mu_0 h_2 G_2 K_n'(w) \right] \quad (3.100)$$

จากความต่อเนื่องของสนามไฟฟ้า E_r จะได้

$$-\frac{\epsilon_1}{h_1^2} \left[\gamma h_1 A_1 J_n'(u) + j \frac{\omega\mu n}{a} G_1 J_n(u) \right] = \frac{\epsilon_2}{h_2^2} \left[\gamma h_2 A_2 K_n'(w) + j \frac{\omega\mu n}{a} G_2 K_n(w) \right] \quad (3.101)$$

เมื่อแทนค่าสมการ (3.98) และ (3.99) ลงในสองสมการด้านบนนี้และอาศัยความสัมพันธ์ $\gamma = j\beta$, $u = h_1 a$ และ $w = h_2 a$ แล้วจัดสมการใหม่ทำให้ได้

$$\left(\frac{1}{u^2} + \frac{1}{w^2}\right)n\beta A_1 + \left[\frac{1}{u} \frac{J'_n(u)}{J_n(u)} + \frac{1}{w} \frac{K'_n(w)}{K_n(w)}\right]\omega\mu_0 G_1 = 0 \quad (3.102)$$

$$\left[\frac{\varepsilon_1}{u} \frac{J'_n(u)}{J_n(u)} + \frac{\varepsilon_2}{w} \frac{K'_n(w)}{K_n(w)}\right]\beta A_1 + \left(\frac{\varepsilon_1}{u^2} + \frac{\varepsilon_2}{w^2}\right)\omega\mu_0 n G_1 = 0 \quad (3.103)$$

กำหนดตัวแปรขึ้นใหม่เพื่อให้สมการอยู่ในรูปอย่างง่ายดังนี้

$$Y_n(u) \triangleq \frac{1}{u} \frac{J'_n(u)}{J_n(u)} \quad (3.104)$$

$$X_n(w) \triangleq \frac{1}{w} \frac{K'_n(w)}{K_n(w)} \quad (3.105)$$

สมการ (3.102) และ (3.103) จะนำไปสู่สมการลักษณะเฉพาะโดยอาศัยการหาดีเทอร์มิแนนซ์ (Determinant) ได้ดังนี้

$$\begin{vmatrix} \left(\frac{1}{u^2} + \frac{1}{w^2}\right)n\beta & [Y_n(u) + X_n(w)]\omega\mu_0 \\ [\varepsilon_1 Y_n(u) + \varepsilon_2 X_n(w)]\beta & \left(\frac{\varepsilon_1}{u^2} + \frac{\varepsilon_2}{w^2}\right)\omega\mu_0 n \end{vmatrix} = 0 \quad (3.106)$$

สมการลักษณะเฉพาะของคลื่นผสมคือ

$$n^2 \left(\frac{1}{u^2} + \frac{1}{w^2}\right) \left(\frac{1}{u^2} + \frac{p}{w^2}\right) = [Y_n(u) + X_n(w)][Y_n(u) + pX_n(w)] \quad (3.107)$$

เมื่อ $p = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ อัตราส่วนระหว่าง A_1 และ G_1 ตามสมการ (3.102) และ (3.103) หาได้ดังนี้

$$G_1 = -A_1 \frac{n\beta \left(\frac{1}{u^2} + \frac{1}{w^2}\right)}{\omega\mu_0 [Y_n(u) + X_n(w)]} = -A_1 \frac{\beta}{\omega\mu_0 n} \frac{\varepsilon_1 Y_n(u) + \varepsilon_2 X(w)}{\left(\frac{\varepsilon_1}{u^2} + \frac{\varepsilon_2}{w^2}\right)} \quad (3.108)$$

เอกสารนี้เป็นเมื่อได้สมการลักษณะเฉพาะ (3.107) และค่าคงที่ตามสมการ (3.98), (3.99) และ (3.108) ไม่ว่าจะแล้วสามารถศึกษาลักษณะของคลื่นในโหมดต่างๆ ได้โดยการหาคำตอบด้วยวิธีสร้างกราฟเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.2.2.2

3.2.2.5 สมการลักษณะเฉพาะของคลื่นผสม

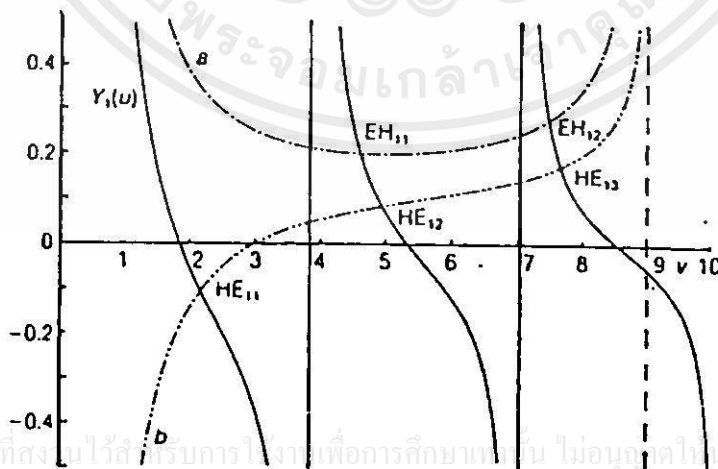
สมการลักษณะเฉพาะของคลื่นผสม (3.107) นี้ไม่สามารถหาคำตอบได้ด้วยวิธีการปกติ แต่สามารถหาคำตอบได้ด้วยวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Method) ซึ่งจะได้กราฟเพื่อนำมาศึกษาโหมดของคลื่นได้ เมื่อจัดสมการ (3.107) ใหม่ให้อยู่ในรูปสมการกำลังสอง (Quadratic Equation) จะได้

$$Y_n^2(u) + (1+p)X_n(w)Y_n(u) + pX_n^2(w) - n^2\left(\frac{1}{u^2} + \frac{1}{w^2}\right)\left(\frac{1}{u^2} + \frac{p}{w^2}\right) = 0 \quad (3.109)$$

คำตอบของสมการกำลังสอง (3.109) คือ

$$Y_n(u) = -\left(\frac{1+p}{2}\right)X_n(w) \pm \sqrt{\left[\frac{1}{4}(1-p)^2 X_n^2(w) + n^2\left(\frac{1}{u^2} + \frac{1}{w^2}\right)\left(\frac{1}{u^2} + \frac{p}{w^2}\right)\right]} \quad (3.110)$$

สมการนี้สามารถหาคำตอบได้ด้วยวิธีการสร้างกราฟทางด้านซ้ายและขวาของสมการเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.2.2.2 กราฟของสมการ (3.110) แสดงดังรูปที่ 3.12 โดยรูปนี้เกิดจากการกำหนดให้ $n=1$, $p=0.99$ และ $v=9$ โดยกราฟเส้น a และ b สอดคล้องกับด้านขวาของสมการ (3.110) ซึ่งเส้น a สอดคล้องกับค่าบวกและเส้น b สอดคล้องกับค่าลบของสมการ จุดตัดของกราฟ $Y_n(u)$ กับกราฟเส้น a และ b คือคำตอบของสมการ (3.110) หรือจำนวนโหมดนั่นเอง โดยโหมด EH_{nm} เกิดจากกราฟ $Y_n(u)$ ตัดกับกราฟทางด้านขวาในกรณีที่เป็นบวกแต่สำหรับโหมด HE_{nm} เกิดจากกราฟ $Y_n(u)$ ตัดกับกราฟทางด้านขวาในกรณีที่เป็นลบ



รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะของกราฟคำตอบของสมการกำลังสอง (3.110)

3.2.3 โหมดโพลาไรเซชันเชิงเส้น

จากหัวข้อ 3.2.2 เป็นการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของคลื่นประเภทต่างๆ เพื่อศึกษาลักษณะของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในโหมดต่างๆ โดยเริ่มต้นจากสมการแมกซ์เวลล์ซึ่งจะนำไปสู่สมการลักษณะเฉพาะนั้น พบว่าการหาคำตอบของสมการลักษณะเฉพาะนั้นมีความซับซ้อนไม่สามารถหาได้ด้วยวิธีปกติ ในหัวข้อนี้จะนำเสนอวิธีการหาคำตอบที่ง่ายขึ้นโดยจะพิจารณาในกรณีที่เรียกว่าวีคิลีไกดิง (Weakly Guiding) กล่าวคือเป็นกรณีความแตกต่างของดัชนีหักเหแสงระหว่างแกนและแคลดดิ้งมีค่าน้อย คำตอบที่หาได้นี้จะเป็นเพียงคำตอบโดยประมาณ (Approximate Solution) เท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากหัวข้อ 3.2.2 ที่ได้คำตอบอย่างถูกต้อง (Exact Solution) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

เนื่องจากการหาคำตอบของสมการลักษณะเฉพาะจะนำไปสู่โหมดของคลื่นแบบ $EH_{n-1,m}$ และ $HE_{n+1,m}$ โดยถ้าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของโหมดต่างๆ เกิดขึ้นจากคลื่นตามขวางทั้งสามแบบตามหัวข้อ 3.2.2 แล้วจะเรียกโหมดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในหัวข้อนี้ว่าโหมดโพลาไรเซชันเชิงเส้น (Linearly Polarized Modes) หรือ $LP_{n,m}$ ซึ่งแต่ละโหมดโพลาไรเซชันเชิงเส้นจะแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} LP_{0m} &= HE_{1m} \\ LP_{1m} &= HE_{2m} + E_{0m} + H_{0m} \\ LP_{nm} &= HE_{n+1,m} + EH_{n-1,m} \quad \text{เมื่อ } n > 2 \end{aligned} \quad (3.111)$$

โดยแต่ละค่าของ m และ $n > 0$ แล้วจะเกิดโหมด $LP_{n,m}$ ขึ้น 4 แบบกล่าวคือค่า m หนึ่งค่าจะให้โหมด LP_{0m} ซึ่งทั้งสองโหมดนี้เกิดขึ้นจากการพิจารณาสมการ (3.89) ออกเป็น 2 กรณีดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2.2.4 ส่วนอีกสองโหมด LP_{nm} เกิดขึ้นจากการตั้งฉากกันระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

ต่อไปนี้จะเริ่มต้นการวิเคราะห์โหมดโพลาไรเซชันเชิงเส้น โดยอาศัยการประมาณคือความแตกต่างของดัชนีหักเหแสงระหว่างแกนและแคลดดิ้งมีค่าน้อยนั่นคือ $p = 1$. จากสมการ (3.110) จะได้

$$n \left(\frac{1}{u^2} + \frac{1}{w^2} \right) = \pm [Y_n(u) + X_n(w)] \quad (3.112)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ กรณีความถี่ของคลื่นมีค่าห่างจากความถี่คutoffหรือเกิด โหมดขึ้นเป็นจำนวนมากแล้ว

$w \rightarrow \infty$ สมการ (3.112) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{n}{u} = \pm \frac{J'_n(u)}{J_n(u)} \quad (3.113)$$

สมการ (3.113) นี้คือสมการลักษณะเฉพาะในกรณีโหมดโพลาไรเซชันเชิงเส้นโดยค่าบวก สอดคล้องกับโหมด EH ขณะที่ค่าลบสอดคล้องกับโหมด HE ค่าตอบของสมการ (3.113) สามารถหาได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ของเบสเซิลฟังก์ชันซึ่งทำได้

$$uJ'_n(u) = nJ_n(u) - uJ_{n+1}(u) \quad (3.114)$$

$$uJ'_n(u) = -nJ_n(u) + uJ_{n-1}(u) \quad (3.115)$$

อาศัยสมการ (3.114) สามารถเขียนสมการ (3.113) ในกรณีเครื่องหมายบวกได้ดังนี้

$$\frac{n+1}{u} = -\frac{J'_{n+1}(u)}{J_{n+1}(u)} = \frac{n+1}{u} - \frac{J_n(u)}{J_{n+1}(u)} \quad (3.116)$$

คำตอบของสมการนี้คือค่า u ที่ทำให้ $J_n(u) = 0$ ในอันดับที่ m ต่างๆ โหมดของคลื่นที่เกิดจากสมการนี้เรียกว่า $EH_{n-1,m}$ ในทำนองเดียวกันอาศัยสมการ (3.115) จะเขียนสมการ (3.113) ในกรณีเครื่องหมายลบได้ดังนี้

$$\frac{n+1}{u} = -\frac{J'_{n+1}(u)}{J_{n+1}(u)} = \frac{n+1}{u} - \frac{J_n(u)}{J_{n+1}(u)} \quad (3.117)$$

คำตอบของสมการนี้คือค่า u ที่ทำให้ $J_n(u) = 0$ ในอันดับที่ m ต่างๆ โหมดของคลื่นที่เกิดจากสมการนี้เรียกว่า $HE_{n+1,m}$

จากสมการ (3.51) และ (3.55) ทำให้ทราบถึงค่าคงที่เฟสบริเวณแกนและแคลดดิ้งของใยแก้วนำแสงซึ่งเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$k_0 n_1 < \beta < k_0 n_2 \quad (3.118)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับรองรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ในกรณีโหมดโพลาไรเซชันเชิงเส้นนี้ $n_1 \rightarrow n_2$ ซึ่งทำให้ได้ค่าคงที่เฟสใหม่คือ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\beta = \omega \sqrt{\epsilon \mu_0} \quad (3.119)$$

เมื่อ $\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$ ต่อไปนี้เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ A_1 และ G_1 โดยการแทนค่าสมการ (3.112) และ (3.119) ลงในสมการ (3.102) จะได้

$$G_1 = \pm \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} A_1 \quad (3.120)$$

เครื่องหมายบวกของสมการนี้จะสอดคล้องกับการเกิดโหมด HE ซึ่งก็คือเครื่องหมายลบของสมการ (3.112) และเครื่องหมายลบของสมการนี้จะสอดคล้องกับการเกิดโหมด EH ซึ่งก็คือเครื่องหมายบวกของสมการ (3.112) นั่นเอง สำหรับสนามไฟฟ้า E_z และสนามแม่เหล็ก H_z ที่บริเวณแกนของใยแก้วนำแสงจะหาได้จากสมการ (3.90), (3.92) และ (3.120) ได้เป็น

$$E_z = A_1 J_n(h_1 r) \cos(n\varphi) \quad (3.121)$$

$$H_z = \pm A_1 \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} J_n(h_1 r) \sin(n\varphi) \quad (3.122)$$

ในกรณีความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ F_1 และ B_1 ซึ่งเป็นกรณีที่อยู่ทอโกนอลกันกับสมการ (3.120) ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$F_1 = \pm \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} B_1 \quad (3.123)$$

กรณีตามสมการนี้เครื่องหมายลบสอดคล้องกับโหมด HE และเครื่องหมายบวกสอดคล้องกับโหมด EH จากสมการ (3.83) และ (3.85) ในกรณี $A_1 = G_1 = 0$ แล้วสมการ (3.123) จะสามารถนำไปสู่สนามไฟฟ้า E_z และสนามแม่เหล็ก H_z กรณีที่อยู่ทอโกนอลโหมดได้เป็น

$$E_z = B_1 J_n(h_1 r) \sin(n\varphi) \quad (3.124)$$

$$H_z = \pm B_1 \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} J_n(h_1 r) \cos(n\varphi) \quad (3.125)$$

จากโหมดของคลื่นแบบ $EH_{n-1,m}$ และ $HE_{n-1,m}$ ซึ่งทำให้เกิดโหมดของคลื่นแบบโพลาไรเซชันเชิงเส้นชั้น 4 แบบโดยจะกำหนดให้แอมพลิจูด A_1 และ B_1 มีค่าเท่ากันจะหาลักษณะของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในระบบพิกัดฉากได้โดยอาศัยสมการต่อไปนี้

$$E_x = -\frac{1}{h^2} \left(\gamma \frac{\partial E_z}{\partial x} + j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \quad (3.126)$$

$$E_x = \frac{1}{h^2} \left(-\gamma \frac{\partial E_z}{\partial y} + j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (3.127)$$

$$H_x = \frac{1}{h^2} \left(j\omega\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} - \gamma \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (3.128)$$

$$H_x = -\frac{1}{h^2} \left(j\omega\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} + \gamma \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \quad (3.129)$$

เนื่องจากสนามไฟฟ้า E_z และสนามแม่เหล็ก H_z อยู่ในระบบพิกัดทรงกระบอกซึ่งต้องเปลี่ยนให้อยู่ในระบบพิกัดฉากก่อนโดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{\partial r}{\partial x} = \cos \varphi, \quad \frac{\partial r}{\partial y} = \sin \varphi, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial x} = -\frac{1}{r} \sin \varphi, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \frac{1}{r} \cos \varphi$$

เมื่อ $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ และ $\varphi = \arctan \frac{y}{x}$ จากสมการ (3.126), (3.127), (3.128) และ (3.129) ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะแบ่งโหมดโพลาริเซชันออกเป็น 4 แบบตามเครื่องหมายบวกและลบโดยอาศัยสมการ (3.114) และ (3.115) นั่นคือลักษณะของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กกรณี โหมดโพลาริเซชันเชิงเส้นหรือ LP_{nm} ได้ดังต่อไปนี้ เมื่อ E_n คือสนามไฟฟ้ามากที่สุดบริเวณรอยต่อระหว่างแกนและแคลคดิง

ลักษณะที่ 1

$$E_y = -H_x \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon_1}} = E_n \frac{J_n\left(\frac{u r}{a}\right)}{J_n(u)} \cos(n\varphi), \quad r < a \quad (3.130ก)$$

$$E_y = -H_x \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon_2}} = E_n \frac{K_n\left(\frac{w r}{a}\right)}{K_n(w)} \cos(n\varphi), \quad r > a \quad (3.130ข)$$

$$E_x = 0, \quad H_y = 0 \quad (3.130ค)$$

ลักษณะที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลของเอกสารนี้ไปยังที่อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

$$E_y = -H_x \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon_1}} = E_n \frac{J_n\left(\frac{u r}{a}\right)}{J_n(u)} \sin(n\varphi), \quad r < a \quad (3.131ก)$$

$$E_y = -H_x \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_2}} = E_n \frac{K_n\left(\frac{w}{a}r\right)}{K_n(w)} \sin(n\varphi) \quad , \quad r > a \quad (3.131\text{ข})$$

$$E_x = 0 \quad , \quad H_y = 0 \quad (3.131\text{ค})$$

ลักษณะที่ 3

$$E_x = H_y \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_1}} = E_n \frac{J_n\left(\frac{u}{a}r\right)}{J_n(u)} \cos(n\varphi) \quad , \quad r < a \quad (3.132\text{ก})$$

$$E_x = H_y \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_2}} = E_n \frac{K_n\left(\frac{w}{a}r\right)}{K_n(w)} \cos(n\varphi) \quad , \quad r > a \quad (3.132\text{ข})$$

$$E_y = 0 \quad , \quad H_x = 0 \quad (3.131\text{ค})$$

ลักษณะที่ 4

$$E_x = H_y \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_1}} = E_n \frac{J_n\left(\frac{u}{a}r\right)}{J_n(u)} \sin(n\varphi) \quad , \quad r < a \quad (3.133\text{ก})$$

$$E_x = H_y \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_2}} = E_n \frac{K_n\left(\frac{u}{a}r\right)}{K_n(u)} \sin(n\varphi) \quad , \quad r > a \quad (3.133\text{ข})$$

$$E_y = 0 \quad , \quad H_x = 0 \quad (3.133\text{ค})$$

จากสมการเหล่านี้สามารถแสดงลักษณะการกระจายความเข้มแสงบริเวณแกนของใยแก้วนำแสงแสดงดังรูปที่ 3.13 – 3.16 โดยรูปเหล่านี้คือลักษณะของโหมด LP_{11} , LP_{12} , LP_{21} และ LP_{22} ซึ่งมีจำนวนโหมดที่แตกต่างกันโดยสามารถสังเกตลักษณะของโหมดเหล่านี้ได้ด้วยการนำฉากรับภาพมารับภาพของโหมดแสงที่บริเวณเอาต์พุตของใยแก้วนำแสง

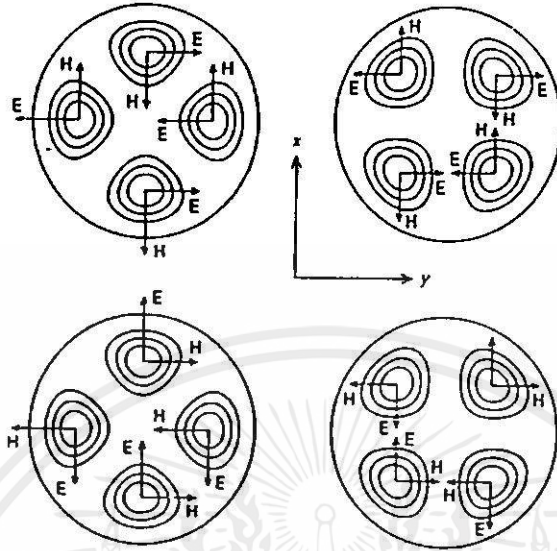
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



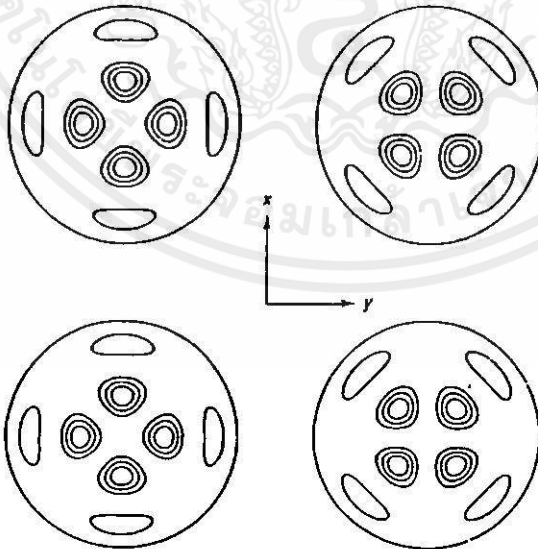
รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะของโหมด LP_{11}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.14 แสดงลักษณะของโหมด LP_{12}



รูปที่ 3.15 แสดงลักษณะของโหมด LP_{21}



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.16 แสดงลักษณะของโหมด LP_{22}

3.3 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการเคลื่อนที่ของคลื่นในใยแก้วนำแสง โดยได้เริ่มจากการวิเคราะห์ การเคลื่อนที่ของคลื่นภายในท่อนำคลื่นแบบระนาบเพื่อเป็นพื้นฐานการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของ คลื่นในใยแก้วนำแสง ซึ่งได้เริ่มต้นจากสมการคลื่นเชิงลาตักขณะของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในใยแก้วนำแสงได้ โดยอาศัยเงื่อนไขขอบเขตของใยแก้วนำแสงซึ่งทำให้ได้สมการ ลักขณะเฉพาะซึ่งไม่สามารถหาคำตอบได้ด้วยวิธีปกติจึงต้องอาศัยวิธีการสร้างกราฟขึ้น คำตอบที่ ได้จากสมการลักขณะเฉพาะนี้เป็นคำตอบแบบไม่ต่อเนื่องซึ่งจะนำไปสู่การศึกษาลักขณะของสนาม ไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแต่ละโหมด และจำนวนโหมดที่สามารถเคลื่อนที่อยู่ภายในใยแก้วนำ แสงได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

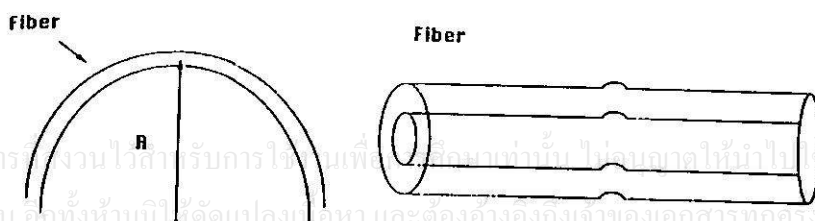
บทที่ 4

การตรวจวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสง

แสงแต่ละโหมดซึ่งเคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงจะมีค่าคงที่การเคลื่อนที่เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวแตกต่างกันออกไป ซึ่งทำให้ลักษณะของแสงแต่ละโหมดแตกต่างกันตามไปด้วยดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 และอาศัยลักษณะการเลี้ยวเบนของแสงหรือการกระจายความเข้มแสงจากเกรตติงซึ่งนำไปสู่การหาสมการเลี้ยวเบนของเกรตติง พบว่าแสงแต่ละโหมดหรือความยาวคลื่นเลี้ยวเบนด้วยมุมที่แตกต่างกันดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 จากหลักการดังกล่าวประกอบกับทฤษฎีเกี่ยวกับการโค้งงอ (Bending) ของใยแก้วนำแสงซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทนี้สามารถนำมาศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสงได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการโค้งงอของใยแก้วนำแสง

แสงซึ่งเคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงจะเกิดการสูญเสียความเข้มหรือกำลังของแสงขึ้น โดยมีผลจากปัจจัยเหล่านี้คือ การดูดกลืนแสงของวัสดุในใยแก้วนำแสงซึ่งได้แก่แกนและแคลคดิง การสะท้อนของรังสีของแสง และการโค้งงอของใยแก้วนำแสงก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ความเข้มของแสงลดลง โดยการสูญเสียความเข้มแสงนี้จะเกิดขึ้นกับโหมดแสงอันดับสูง (Highest-Order Mode) บริเวณแกนของใยแก้วนำแสงและแล้วจะสูญเสียไปบริเวณแคลคดิง การโค้งงอของใยแก้วนำแสงซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียความเข้มของแสงนี้สามารถเกิดขึ้นได้จากแรง ความร้อน ความดัน และการสั่นสะเทือน เป็นต้น ซึ่งเป็นผลให้เกิดความเครียดของโครงสร้างใยแก้วนำแสงขึ้น โดยกลไกที่ทำให้เกิดการโค้งงอนี้จะถูกยึดติดกับใยแก้วนำแสง นอกจากนี้ยังทำให้ลักษณะโครงสร้างเรขาคณิตของใยแก้วนำแสงเปลี่ยนแปลงไปและเกิดการเปลี่ยนแปลงของโหมดของแสงซึ่งเคลื่อนที่อยู่ การโค้งงอที่กล่าวมาข้างต้นนี้มีขนาดเล็กมาก (Microbending) และยังเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับการโค้งงอที่พบทั่วไปเช่น การโค้งงอภายในม้วนใยแก้วนำแสง และการโค้งงอใยแก้วนำแสงตามตัวอาคารซึ่งเป็นการโค้งงอที่มีรัศมีความโค้งมาก (Macrobending) แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะการโค้งงอที่มีรัศมีความโค้งมาก และรัศมีความโค้งน้อย

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหแสงกับรัศมีของใยแก้วนำแสงซึ่งเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$n^2(r) = n_1^2 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right] \quad (4.1)$$

เมื่อ $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} = \frac{(NA)^2}{2n_1^2}$ ซึ่งก็คือความแตกต่างดัชนีหักเหแสงของแกนและแคลดดิ้ง

α คือรัศมีของแกน n_1 คือดัชนีหักเหแสงบริเวณแกน n_2 คือดัชนีหักเหแสงบริเวณแคลดดิ้ง NA คือนิวเมอริคัลอะเพอเจอร์ และ $\alpha = 2$ สำหรับใยแก้วนำแสงชนิดเกรดอินเด็กซ์ $\alpha = \infty$ สำหรับใยแก้วนำแสงชนิดสเต็ปอินเด็กซ์

โหมดแสงภายในใยแก้วนำแสงจะถูกบรบกวนจากกลไกซึ่งทำให้ใยแก้วนำแสงโค้งงอโดยอาจจะเกิดขึ้นกับบริเวณความยาวคลื่น (Spatial Wavelength, Λ) สัมพันธ์กับค่าคงที่การเคลื่อนที่ β ของแต่ละโหมดแสงดังนี้

$$\beta' - \beta = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (4.2)$$

โดยความแตกต่างของค่าคงที่ของการเคลื่อนที่หรือระยะห่างระหว่างโหมดแสงอันดับที่ m และ $m+1$ หาได้จากสมการด้านล่างนี้

$$\Delta\beta_m = \frac{2}{a} \left(\frac{\alpha\Delta}{\alpha+2} \right)^{1/2} \left(\frac{m}{M} \right)^{(\alpha-2)/(\alpha+2)} \quad (4.3)$$

เมื่อ M^2 เป็นจำนวนโหมดทั้งหมดซึ่งเคลื่อนที่ภายในใยแก้วนำแสงดังต่อไปนี้

$$M^2 = \left(\frac{\alpha}{\alpha+2} \right) (n_0 k a)^2 \Delta \quad (4.4)$$

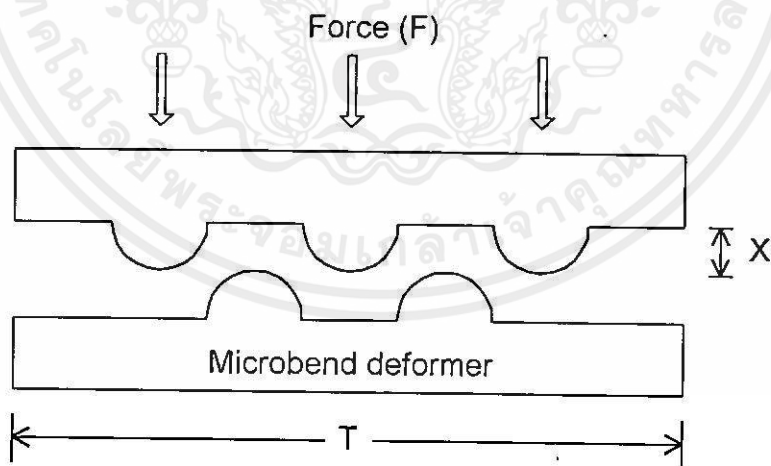
โดย $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ คือค่าคงที่ของการเคลื่อนที่ในอากาศซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น λ ในกรณีของใยแก้วนำแสงชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ $\alpha = \infty$ มีความแตกต่างของค่าคงที่การเคลื่อนที่ดังนี้ [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\beta_{m+1} - \beta_m = \frac{2\sqrt{\Delta}}{a} \left(\frac{m}{M} \right) \quad (4.5)$$

จากสมการ (4.5) นี้พบว่าระยะห่างระหว่างโหมดแสงที่อยู่ใกล้กันจะขึ้นกับความแตกต่างดัชนีหักเหแสง จำนวนของโหมดแสง และรัศมีของใยแก้วนำแสง ผลจากการโค้งงอจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างโหมดซึ่งอยู่ใกล้กันตามสมการ (4.5) โดยถ้ามีจำนวนโหมดเคลื่อนที่อยู่ได้มากจะทำให้ระยะห่างระหว่างโหมดแสงมีค่าลดลง แต่ถ้ามีจำนวนโหมดเคลื่อนที่อยู่ได้น้อยจะทำให้ระยะห่างระหว่างโหมดแสงมีค่ามากขึ้น นอกจากนี้สมการ (4.5) ยังมีความสัมพันธ์กับทฤษฎีในบทที่ 3 กล่าวคือค่าคงที่การเคลื่อนที่ของแสงแต่ละโหมดจะเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ u และ w ซึ่งสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ v หรือความถี่นอร์มอลไลซ์นั่นเองตามสมการ (3.81) ซึ่งใช้ในการหาลักษณะของสนามไฟฟ้าและจำนวนโหมด ดังนั้นเมื่อระยะห่างระหว่างโหมดแสงเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้คำตอบของสมการลักษณะเฉพาะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยนั่นคือการเปลี่ยนแปลงของลักษณะของสนามไฟฟ้านั่นเองซึ่งทำการตรวจวัดได้ด้วยอุปกรณ์รับแสง เนื่องจากการสูญเสียความเข้มแสงจากการโค้งงอจะเกิดขึ้นกับโหมดแสงอันดับสูง ($m = M$) ภายในแกนไปยังแคลคูลิงความยาวคลื่นซึ่งสูญเสียจากการโค้งงอหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\Lambda = \frac{\pi a}{\sqrt{\Delta}} = \sqrt{2} \frac{\pi a n_0}{NA} \quad (4.6)$$



รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะของเซนซิงยูนิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าการณีใดๆ เนื่องจากการโค้งงอของใยแก้วนำแสงเกิดขึ้นได้จากสิ่งแวดล้อมต่างๆ ดังได้กล่าวมาแล้ว
 ข้างต้น ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาการโค้งงอของใยแก้วนำแสงที่เกิดขึ้นจากแรงภายนอกกระทำต่อ

กลไกเพื่อให้เกิดการโค้งงอซึ่งก็คือเซนซิงยูนิตเป็นผลให้เกิดการขจัดขึ้น สำหรับการศึกษาความเป็นไปได้อันการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสงจะแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือความไว (Sensitivity) ในการโค้งงอของใยแก้วนำแสงแสดงได้โดย $\frac{\Delta T}{\Delta X}$ และอีกส่วนหนึ่งคือการออกแบบกลไกในการโค้งงอ (Mechanical Design) หรือเซนซิงยูนิตแสดงได้โดย $\frac{\Delta X}{\Delta F}$ ดังรูปที่ 4.2 เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [13]

$$\frac{\Delta T}{\Delta F} = \frac{\Delta T}{\Delta X} \frac{\Delta X}{\Delta F} \quad (4.7)$$

เมื่อ T คือความยาวของใยแก้วนำแสง F คือแรงที่กระทำต่อเซนซิงยูนิต และ X คือการเปลี่ยนรูปร่างของใยแก้วนำแสงเทียบกับแกนปกติ (Deformation of the Fiber Normal to its Axis) ในส่วนแรกของสมการ (4.7) คือความไวในการโค้งงอหรือ $\frac{\Delta T}{\Delta X}$ จะมีค่าสูงหรือมีความไวมากโดยขึ้นอยู่กับค่านิวเมอริคัลอะเพอร์เจอร์ที่มีค่าน้อย จำนวนการโค้งงอของใยแก้วนำแสงที่มีค่ามากหรือจำนวนลูกกระนาบของเซนซิงยูนิตมากนั่นเอง และยังขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนที่มีค่ามากเมื่อเทียบกับแคลคูลิง ในส่วนที่สองของการออกแบบเซนซิงยูนิตหรือ $\frac{\Delta X}{\Delta F}$ ซึ่งก็คือการเปลี่ยนรูปร่างของใยแก้วนำแสงเมื่อได้รับแรงกระทำ เพื่อให้การออกแบบเครื่องมือมีประสิทธิภาพดีที่สุดนั้นจะขึ้นอยู่กับ เส้นผ่านศูนย์กลางของใยแก้วนำแสงที่มีค่าน้อย จำนวนการโค้งงอที่เกิดขึ้นไม่มาก และต้องเกิดการรบกวนต่อแสงซึ่งเคลื่อนที่ภายในใยแก้วนำแสงมากๆ นั่นเอง

ตัวอย่างหนึ่งซึ่งมีผลต่อความไวในการตรวจวัดการขจัดจะขึ้นอยู่กับความยาวในการโค้งงอของใยแก้วนำแสงดังนี้

$$\frac{\Delta T}{\Delta X} \propto l^q \quad (4.8)$$

เมื่อ l เป็นความยาวในการโค้งงอของใยแก้วนำแสง และ $0 \leq q \leq 1$ สำหรับใยแก้วนำแสงที่แจ็กเก็ต (Jacket) มีความสมบูรณ์ในการดักคลื่นแสงจะมี $q = 1$ จากสมการ (4.8) นี้ความไวของเซนซิงยูนิตจะขึ้นอยู่กับความยาวในการโค้งงอของใยแก้วนำแสงแบบเชิงเส้น

4.2 เสถียรภาพการวัดการขจัดเนื่องจากความร้อน

โดยทั่วไปแล้วเฟสของแสง $\phi = \phi(l, T, \lambda)$ ขึ้นอยู่กับความยาวของทางเดินแสง ความยาวคลื่น และความร้อน แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้แหล่งกำเนิดแสงและความยาวของใยแก้ว

นำแสงคงที่จะได้ว่า $\varphi = \varphi(T)$ สำหรับการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อน ΔT ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวทางเดินแสงหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของใยแก้วนำแสง และดัชนีหักเหแสงเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นเฟสของแสงที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทางเดินแสงเปลี่ยนแปลงหาได้จากความสัมพันธ์ $\varphi = \beta l$ เมื่อ β เป็นเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปต่อทางเดินแสง และจากความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ k หรือค่าคงที่ในการเคลื่อนที่ในอากาศ $\beta = kn$ เมื่อ n เป็นดัชนีหักเหแสงเขียนความสัมพันธ์ระหว่างเฟสที่เปลี่ยนไปกับความร้อนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta T}\right) &= \frac{d\varphi}{dT} \\ &= \frac{d(\beta l)}{dT} \\ &= l \frac{d\beta}{dT} + \beta \frac{dl}{dT} \\ &= l \frac{d\left(\frac{2\pi n}{\lambda}\right)}{dT} + \left(\frac{2\pi n}{\lambda}\right) \frac{dl}{dT} \\ \left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta T}\right) &= \frac{2\pi}{\lambda} \left[n \left(\frac{dl}{dT}\right) + l \left(\frac{dn}{dT}\right) \right] \end{aligned} \quad (4.9)$$

สำหรับใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดี่ยว จากสมการ (4.9) ซึ่งเป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงเฟสของแสงเนื่องจากความร้อนที่ใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดี่ยวได้รับ ซึ่งพบว่าใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดี่ยวเกิดการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงในแต่ละแนวแกนเท่ากัน (Symmetry) ดังนั้นเมื่อใยแก้วนำแสงได้รับความร้อนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความยาวทางเดินของแสงในแต่ละโหมคเท่านั้น

4.3 อุปกรณ์ทางแสงและอิเล็กทรอนิกส์

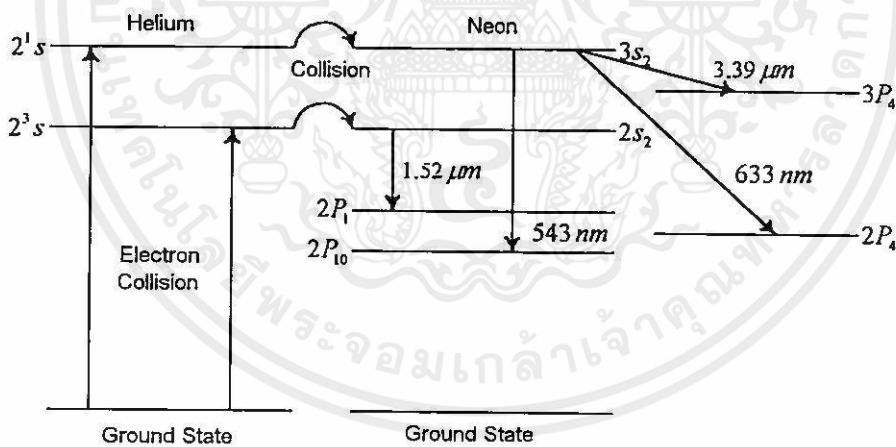
ในส่วนของอุปกรณ์ทางแสงและอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ที่สำคัญได้แก่ เลเซอร์ฮีเลียมนีออน เกรตติง และพินโฟโตไดโอด (pin-Photodiode) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.3.1 เลเซอร์ฮีเลียมนีออน

เลเซอร์ฮีเลียมนีออนเป็นเลเซอร์ประเภทแรกในกลุ่มแก๊สเลเซอร์ที่ถูกสร้างขึ้น โดยการสร้างเลเซอร์ครั้งแรกนั้นจะให้แสงขนาดความยาวคลื่น 1,153 นาโนเมตร แต่ต่อมาได้มีนักวิจัยหลายคนได้พบว่าเลเซอร์ฮีเลียมนีออนยังสามารถให้แสงซึ่งเป็นสีแดงที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตรและที่ความยาวคลื่นนี้เองที่มีความสำคัญเพราะว่ามีกำลังขนาดหลายมิลลิวัตต์ แต่ต่อมาเลเซอร์

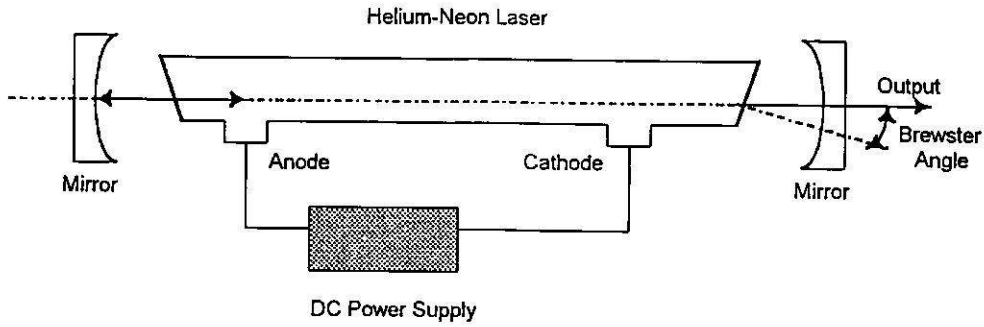
สารกึ่งตัวนำที่ให้แสงสีแดงได้มีการผลิตขึ้นซึ่งมีราคาถูกกว่า อีกทั้งยังมีขนาดเล็กกว่าและไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟที่มีความต่างศักย์สูงเหมือนที่ใช้กับเลเซอร์ฮีเลียมนีออน แต่เลเซอร์สารกึ่งตัวนำเหล่านี้ก็ไม่สามารถมาทดแทนเลเซอร์ฮีเลียมนีออนได้เพราะว่าเลเซอร์ฮีเลียมนีออนเป็นแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ที่ดีกว่า ทั้งยังมีคุณภาพของลำแสงสูงกว่า ให้ความยาวคลื่นที่แน่นอนและราคาไม่แพงนักเพราะประกอบได้ง่ายไม่ยุ่งยากกับการนำมางาน อีกทั้งไม่ชำรุดได้ง่ายเนื่องจากการไม่คงที่ของแหล่งจ่ายไฟ ด้วยสาเหตุเหล่านี้เลเซอร์ชนิดนี้จึงได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางจนกระทั่งปัจจุบัน

การทำงานของเลเซอร์ชนิดนี้ทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าในระดับมิลลิแอมแปร์ที่ประมาณ 10 กิโลโวลต์เข้าไปภายในหลอดเลเซอร์ซึ่งบรรจุก๊าซที่ผสมกันระหว่างฮีเลียมและนีออน ทำให้เกิดอิเล็กตรอนและไอออนเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วชนกันไปมาเพิ่มขึ้นตลอดเวลา โดยอะตอมของฮีเลียม(Helium) จะไม่อยู่ในสภาวะปกติเมื่อชน(Collision)กับอะตอมของนีออน(Neon) โดยอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานต่ำสุด (Ground State) จะถูกกระตุ้นไปยังระดับพลังงาน 2^1s และ 2^3s หลังจากนั้นอิเล็กตรอนที่ระดับนี้จะคายพลังงานโดยการชนเข้ากับอะตอมของนีออนที่อยู่ในสภาวะปกติ จึงทำให้อะตอมของนีออนมีพลังงานสูงขึ้นไปสู่ระดับ $3s_2$ และ $2s_2$ ในการกลับสู่สภาวะปกติของนีออนจะคายพลังงานออกมาในรูปของแสงได้หลายความยาวคลื่นด้วยกันดังรูปที่ 4.3 [14] แต่อัตราการคายพลังงานที่ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตรจะสูงกว่าความยาวคลื่นอื่น



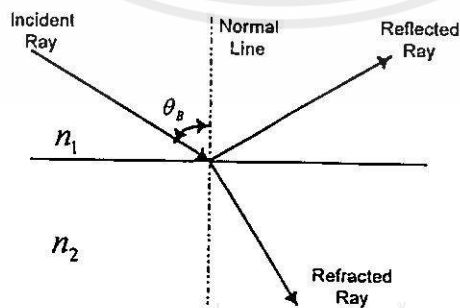
รูปที่ 4.3 แสดงแผนภาพระดับพลังงานของเลเซอร์ฮีเลียมนีออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างภายในของเลเซอร์ฮีเลียมนีออน

โครงสร้างภายในของเลเซอร์ฮีเลียมนีออนแสดงดังรูปที่ 4.4 ประกอบไปด้วยขั้วแคโทด (Cathode) และแอโนด (Anode) ทำหน้าที่ในการป้อนพลังงานจากภายนอกโดยทำให้เกิดสนามไฟฟ้าแรงสูงที่ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟดีซี (DC Power Supply) ทำให้อิเล็กตรอนและไอออนแตกตัวภายในหลอด (Tube) ที่บรรจุก๊าซอยู่ทำให้เกิดเลเซอร์ขึ้นดังที่กล่าวมาแล้วในย่อหน้าที่ผ่านมา พลังงานที่คายออกมาในรูปของแสงนี้ถูกทำให้มีความเข้มสูงขึ้นโดยการสะท้อนกลับไปมาระหว่างกระจก (Mirror) ทั้งสองด้านของหลอด โดยทั่วไปแล้วกระจกเงาที่ใช้นี้จะเคลือบด้วยสารไดอิเล็กตริกบางๆ จำนวนหลายชั้นซึ่งทำให้การสะท้อนที่ค่าสูงมากกว่าร้อยละ 99 ของแสงที่ตกกระทบ และที่ปลายข้างหนึ่งของหลอดแก้วจะตัดให้เอียงเป็นมุมที่เรียกว่ามุมบริวสเตอร์ (Brewster Angle) กล่าวคือเป็นมุมตกกระทบที่ทำให้แสงสะท้อนเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นแสดงดังรูปที่ 4.5 เมื่อมีแสงไม่โพลาไรซ์ตกกระทบกับรอยต่อของสองตัวกลางโดยทำมุมบริวสเตอร์แล้วแสงสะท้อนจะเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นส่วนแสงหักเหจะเป็นแสงที่เกือบจะเป็นโพลาไรซ์เชิงเส้น จากกฎของสเนลในสมการ (2.2) เมื่อมุมสะท้อน $\theta_{reflect}$ รวมกับมุมหักเห $\theta_{refract}$ เท่ากับ 90° แล้วจะหามุมบริวสเตอร์ θ_B ได้ดังนี้ [15]



รูปที่ 4.5 แสดงมุมบริวสเตอร์เพื่อทำให้แสงเลเซอร์เป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น

$$\theta_B = \tan^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (4.10)$$

เมื่อ n_2 เป็นดัชนีหักเหแสงของตัวกลางที่ 2 และ n_1 เป็นดัชนีหักเหแสงของตัวกลางที่ 1 จากหลักการดังกล่าวนี้จึงทำให้แสงที่ได้จากเลเซอร์ฮีเลียมนีออนเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น ในการวัดคุณภาพของแสงโพลาไรซ์นั้นจะอาศัยพารามิเตอร์การวัดคุณภาพของลำแสงโพลาไรซ์ (Extinction Ratio, ER) ซึ่งเป็นการวัดคุณภาพของลำแสงโพลาไรซ์เมื่อหมุนโพลาไรซ์จนกระทั่งสามารถวัดความเข้มแสงได้มากที่สุดจากนั้นหมุนโพลาไรซ์เซอร์ตั้งฉากหรือทำมุม 90° จนกระทั่งได้ความเข้มแสงน้อยที่สุดแล้วเขียนความสัมพันธ์ของกำลังการสูญเสียได้ดังสมการ

$$ER = \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \quad (4.11)$$

เมื่อ P_{\max} คือกำลังของแสงมากที่สุดที่วัดได้และ P_{\min} คือกำลังของแสงน้อยที่สุดที่วัดได้ ดังนั้นคุณภาพของลำแสงโพลาไรซ์สามารถบอกได้จากพารามิเตอร์นี้หรือมีความแตกต่างของกำลังแสงที่มากที่สุดและน้อยที่สุดได้อย่างชัดเจน ค่าความแตกต่างระหว่างกำลังของแสงทั้งสองนี้มีค่ามากขึ้นนั่นคือคุณภาพของลำแสงโพลาไรซ์ดีนั่นเอง

4.3.1.1 โหมดของแสงเลเซอร์

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าลำแสงเลเซอร์จะเคลื่อนที่กลับไปมาระหว่างกระจกเงาทั้งสองด้านซึ่งมีลักษณะเป็นออปติคัลเรโซเนเตอร์ (Optical Resonator) แบบแฟบริ-เพอโรต์ (Fabry-Perot) ทำให้แสงเลเซอร์ที่ผ่านออกมามีความถี่ต่างๆ ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของเรโซเนเตอร์ในกรณีนี้จึงทำให้เกิดโหมดแสงซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แบบด้วยกันคือ โหมดตามยาว (Longitudinal Modes หรือ Axial Modes) ซึ่งเป็นการแสดงโหมดในลักษณะของเปลือกครีของความยาวคลื่น ในส่วนของแบบที่สองคือโหมดตามขวาง (Transverse Modes) เป็นการแสดงลักษณะของโหมดในรูปของการกระจายความเข้มแสงตามลักษณะของลำแสง โดยทั่วไปจะแทนได้ด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electromagnetic Wave, TEM) ตัวอย่างเช่น TEM_{00} ซึ่งเป็นแบบโหมดเดียวที่พบมากที่สุด และแบบหลายโหมดเช่น TEM_{01} , TEM_{10} และ TEM_{11} เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 4.6 และเมื่อโหมดตามขวางของเลเซอร์ถูกนำเข้าไปยังใยแก้วนำแสงและพิจารณาในกรณีของวิกกีโกดิงจะทำให้โหมดตามขวางของแสงเลเซอร์นี้เรียกว่าโหมดโพลาไรซ์เชิงเส้นซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3

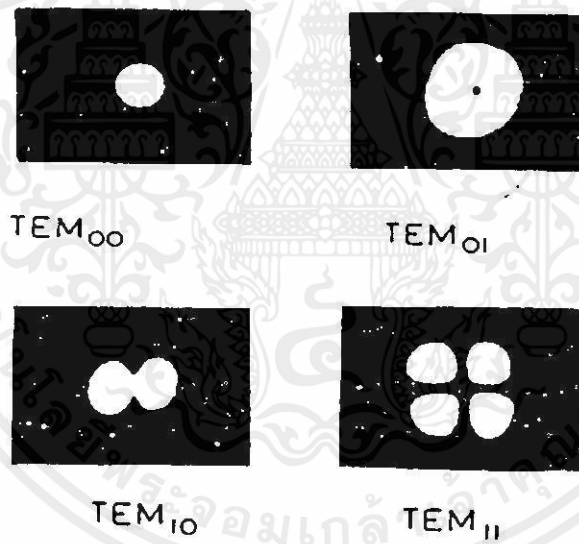
เนื่องจากเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบโหมดเดียว TEM_{00} มีลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าแบบเกาส์เซียน (Gaussian) ดังนี้

$$E(x, y) = E_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w^2}\right) \quad (4.12)$$

เมื่อ x และ y เป็นตำแหน่งของลำแสงเลเซอร์ในแต่ละแนวแกนและ w แทนความกว้างของลำแสงในทิศการเคลื่อนที่ z มีสมการเป็น

$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{2z}{r} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.13)$$

โดย r คือรัศมีความโค้งของกระจกเงาและ w_0 คือความกว้างของลำแสงเลเซอร์ที่ตำแหน่ง $z = 0$ หรือเรียกว่าเวสต์ (Waist) ซึ่งที่ตำแหน่งนี้เองลำแสงเลเซอร์มีความกว้างน้อยที่สุด



รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะของโหมดตามขวาง TEM_{00} TEM_{01} TEM_{10} และ TEM_{11}

4.3.2 เกรตติง

เกรตติงเป็นอุปกรณ์ทางแสงซึ่งทำให้แสงที่ตกกระทบกับเกรตติงเลี้ยวเบนออกเป็นความยาวคลื่นต่างๆ ที่สอดคล้องกับสมการของเกรตติงดังกล่าวมาแล้วในบทที่ 2 โดยเกรตติงชิ้นแรกได้ถูกสร้างขึ้นโดยนักดาราศาสตร์ชาวอเมริกันชื่อเดวิด ริทเทนเฮาส์ (David Rittenhouse) ในปี ค.ศ. 1785 [16] เกรตติงที่สร้างขึ้นนี้กว้างเพียงครึ่งนิ้วและมีช่องเปิดจำนวน 53 ช่อง ต่อมาในปี ค.ศ. 1821 เฟรานซ์โฮเฟอร์ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับเกรตติงเพื่อใช้ในงานสเปกโตรสโคปิค แต่เกรตติงที่

สร้างขึ้นประสบความสำเร็จมากที่สุดโดยนักฟิสิกส์ชาวอเมริกันชื่อ เอช เอ โรว์แลนด์ (H. A. Rowland) แต่ในทุกวันนี้เกรตติงได้สร้างขึ้นโดยการใช้เพชรขัดลงบนฟิล์มอะลูมิเนียมหรือทองที่เคลือบอยู่บนแก้ว โดยก่อนหน้านี้อาจต้องขัดผิวให้เรียบเป็น $\frac{\lambda}{10}$ ของความยาวคลื่นแสงสีเขียว ในปัจจุบันการสร้างเกรตติงได้พัฒนาให้มีจำนวนของช่องเปิดของเกรตติงถึง 3,600 เส้นต่อมิลลิเมตร โดยที่มีระยะห่างสม่ำเสมอและมีความลึกเท่ากัน

เกรตติงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ เกรตติงชนิดส่งผ่านและชนิดสะท้อน ในเกรตติงชนิดส่งผ่านแสงที่ตกกระทบจะเคลื่อนที่ผ่านช่องเปิดเป็นจำนวนมากออกไป สำหรับเกรตติงชนิดสะท้อนบริเวณผิวหน้าที่ใช้สะท้อนแสงจะถูกเคลือบด้วยวัสดุที่มีการสะท้อนแสงดีมากเช่น แมกนีเซียมฟลูออไรด์ ลิเทียมฟลูออไรด์ อะลูมิเนียม เป็นต้น และแสงสะท้อนเหล่านี้จะเป็นไปตามสมการเกรตติงเช่นเดียวกับเกรตติงชนิดส่งผ่าน

ในส่วนของวิธีการผลิตเกรตติงนั้นโดยทั่วไปมี 2 วิธีด้วยกันคือ การสร้างเกรตติงจากต้นแบบ (Grating Replica) และการสร้างเกรตติงด้วยวิธีการแทรกสอดของแสง 2 ลำ (Interference Grating) สำหรับการสร้างเกรตติงจากต้นแบบนี้มีสาเหตุเนื่องจากเกรตติงที่ใช้เป็นต้นแบบมีค่าใช้จ่ายสูงและผลิตได้ลำบากเพื่อที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยต่างๆ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเทคนิคการสร้างเกรตติงจากต้นแบบซึ่งมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่า ในการผลิตนั้นจะเริ่มจากเกรตติงต้นแบบจะถูกเคลือบด้วยวัสดุที่สามารถลอกออกได้ง่ายหลังจากนั้นจะเคลือบด้วยอะลูมิเนียมด้วยวิธีการพิเศษ ต่อจากนั้นจะเคลือบด้วยเรซิน (Resin) เป็นขั้นสุดท้าย เมื่อเสร็จขั้นตอนทั้งสามแล้วจึงนำทั้งสามชั้นออกจากต้นแบบ ในการผลิตด้วยวิธีนี้จะช่วยรักษาเกรตติงต้นแบบไม่ให้เสียหายง่ายและในการผลิตเกรตติงอันต่อไปจะอาศัยต้นแบบอันแรกนี้ ซึ่งทำได้โดยการนำต้นแบบนี้ไปวางบนแก้วหรือซิลิกาหลอมและเคลือบด้วยอะลูมิเนียมที่มีการสะท้อนแสงดีมาก เกรตติงที่ได้จากวิธีการนี้ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน สำหรับวิธีการผลิตเกรตติงด้วยการแทรกสอดของแสงสองลำซึ่งเป็นเกรตติงที่ใช้ในงานวิจัยนั้น ได้อาศัยลำแสงเลเซอร์สองลำทำให้เกิดริ้วการแทรกสอดขึ้นเป็นแถบมืดสว่างบนแผ่นแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มโฟโตเรซิส (Photoresist) ซึ่งฟิล์มนี้มีความสามารถเปลี่ยนคุณสมบัติไปตามการกระจายความเข้มของแสงที่ตกกระทบบนฟิล์ม จึงทำให้ได้เกรตติงชนิดส่งผ่านที่มีระยะระหว่างช่องเปิดบนเกรตติง ซึ่งก็คือระยะระหว่างแถบมืดสว่างของการแทรกสอดหาได้จากสมการต่อไปนี้

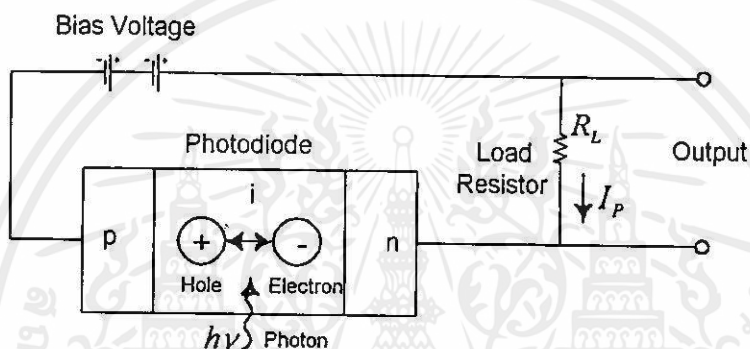
$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (4.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ d เป็นระยะห่างระหว่างช่องเปิด λ คือความยาวคลื่นแสงที่ทำให้เกิดการแทรกสอด และ 2θ เป็นมุมระหว่างลำแสงสองลำที่มีการแทรกสอดกัน เกรตติงที่ได้จากวิธีการนี้จะทำได้ง่ายกว่าและมีความสมบูรณ์ของเกรตติงสูงกว่าจึงทำให้ได้สเปกตรัมที่ดีกว่านั่นเอง

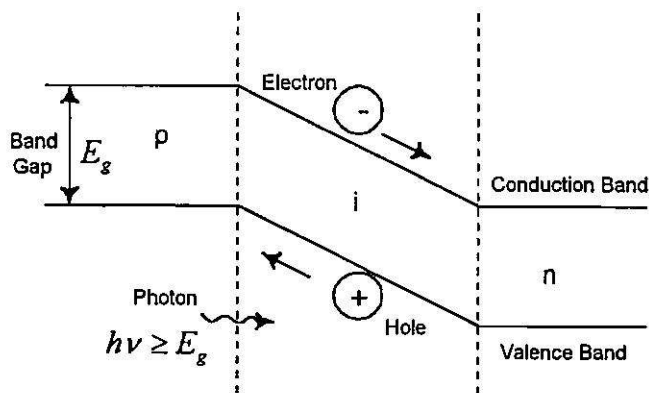
4.3.3 พินโฟโตไดโอด

เมื่อแสงเคลื่อนที่ออกจากใยแก้วนำแสงแล้วอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่ตรวจวัดสัญญาณแสงนี้คือ อุปกรณ์รับแสงนี้ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ในงานวิจัยได้ใช้อุปกรณ์รับแสงคือ พินโฟโตไดโอดซึ่งเป็นอุปกรณ์รับแสงประเภทสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงรูปแบบโครงสร้างของพินโฟโตไดโอดและการไบแอสให้พินโฟโตไดโอด

จากรูปประกอบด้วยบริเวณที่เป็น p และ n ของสารกึ่งตัวนำที่ถูกค้นด้วยบริเวณที่เป็น อินทรินซิก (Intrinsic, i) ที่บริเวณนี้มีการเจือสาร n ลงไปเล็กน้อยจึงเท่ากับเป็นการเพิ่มโอกาสให้ พินโฟโตไดโอดมีกระแสภายนอกไหลมากขึ้นนั่นเอง ในการทำงานโดยทั่วไปต้องไบแอสกลับให้กับพินโฟโตไดโอด เมื่อมีโฟตอนมาตกกระทบที่บริเวณอินทรินซิกโดยมีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างของพลังงาน (Band-Gap Energy) ของสารกึ่งตัวนำจึงมีผลทำให้อิเล็กตรอนจากวาเลนซ์แบนด์ (Valence Band) ถูกกระตุ้นขึ้นไปสู่คอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) จากขบวนการนี้จะได้คู่ของอิเล็กตรอนและโฮล (Electron-Hole Pairs) เกิดขึ้นซึ่งเรียกว่าพาหะโฟโต (Photocarriers) แสดงดังรูปที่ 4.8 โดยปกติแล้วพาหะโฟโตจะเกิดขึ้นที่บริเวณอินทรินซิกซึ่งเป็นบริเวณที่แสงตกกระทบและใช้ในการดูดกลืนพลังงานโฟตอนโดยที่บริเวณนี้เองจะมีสนามไฟฟ้าความเข้มสูงเนื่องมาจากการแยกกันระหว่างโฮลและอิเล็กตรอนจนทำให้เกิดการสะสมขึ้นและเคลื่อนที่ได้เมื่อมีการไบแอสย้อนกลับ จากขบวนการเหล่านี้จึงเกิดกระแสไหลภายนอกซึ่งเรียกว่ากระแสโฟโต (Photo Current)



รูปที่ 4.8 แสดงการไหลของอิเล็กตรอนในรอยต่อของพินโฟโตไดโอด

พิจารณาอุ้งของอิเล็กตรอนและโฮลเหล่านี้จะเคลื่อนที่อย่างค่อนเนื่องภายในสารกึ่งตัวนำซึ่งมีระยะทางเป็น L_n หรือ L_p ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ โดยมีระยะทางที่เคลื่อนที่ไปนี้เรียกว่าความยาวการแพร่ (Diffusion Length) โดยมีเวลาที่อิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นใหม่อีกครั้งนี้เรียกว่าช่วงชีวิตของพาหะ (Carrier Lifetime) เขียนได้เป็น τ_n และ τ_p ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวการแพร่กับช่วงชีวิตของพาหะคือ

$$L_n = (D_n \tau_n)^{1/2} \quad \text{และ} \quad L_p = (D_p \tau_p)^{1/2} \quad (4.15)$$

เมื่อ D_n และ D_p คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮล โดยกำลังของแสงที่ถูกดูดกลืนในสารกึ่งตัวนำจะมีค่าเป็น

$$P(x) = P_0 (1 - e^{-\alpha_s(\lambda)x}) \quad (4.16)$$

เมื่อ $\alpha_s(\lambda)$ คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption Coefficient) ที่ความยาวคลื่น λ P_0 คือกำลังของแสงที่ตกกระทบสารกึ่งตัวนำ และ $P(x)$ คือกำลังของแสงที่ถูกดูดกลืนในระยะทาง x โดยที่สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่นำมาสร้างเป็นโฟโตไดโอดจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมีช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งานจำกัดแตกต่างกันออกไปเช่น แกลเลียมอาเซนายด์ (GaAs) สามารถใช้งานได้ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 600 ถึง 900 นาโนเมตร ซิลิคอน (Si) ใช้งานได้ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 400 ถึง 1,000 นาโนเมตร การหาความยาวคลื่นตัดออฟ λ_c ซึ่งก็คือความยาวคลื่นยาวที่สุดที่สามารถใช้งานได้จะถูกกำหนดด้วยช่องว่างพลังงาน E_g ของสารกึ่งตัวนำถ้า E_g มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ดังนั้น λ_c จะมีหน่วยเป็นไมโครเมตรดังนี้

$$\lambda_c (\mu m) = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g (ev)} \quad (4.17)$$

ความยาวคลื่นคัทออฟจะมีค่าเท่ากับ 1.06 ไมโครเมตรสำหรับซิลิคอนและ 1.6 ไมโครเมตรสำหรับเจอร์มานเนียม (Ge) ถ้าที่บริเวณการแพร่ของอิเล็กตรอนมีความกว้าง w ดังนั้น จากสมการ (4.16) จะได้กำลังของแสงที่ถูกดูดกลืนเป็น

$$P(w) = P_0 (1 - e^{-\alpha_s(\lambda)w}) \quad (4.18)$$

ถ้าให้ความสามารถในการหักเห (Reflectivity, R_f) ที่แสงตกกระทบผิวหน้าของโฟโตไดโอดมีกระแสโฟโต I_p การดูดกลืนกำลังของแสงตามสมการ (4.18) จะถูกกำหนดโดย

$$I_p = \frac{q}{h\nu} P_0 (1 - e^{-\alpha_s w}) (1 - R_f) \quad (4.19)$$

เมื่อ P_0 คือกำลังของแสงที่ตกกระทบบนโฟโตไดโอด q คือประจุของอิเล็กตรอนและ $h\nu$ เป็นพลังงานโฟตอน การทำงานของโฟโตไดโอดซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของโฟโตไดโอดแต่ละตัวจะแสดงได้ด้วยค่าการตอบสนองต่อแสง \mathcal{R} ซึ่งเกี่ยวข้องกับสัมประสิทธิ์ควอนตัม η ดังนี้

$$\mathcal{R} = \frac{I_p}{P_0} = \frac{\eta q}{h\nu} \quad (4.20)$$

จากสมการนี้แสดงให้เห็นว่าค่าการตอบสนองต่อแสงจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างกระแสโฟโตกับกำลังของแสงที่ตกกระทบ นั่นคือถ้ากำลังของแสงที่ตกกระทบมีขนาดเล็กแต่สามารถทำให้เกิดกระแสโฟโตได้มากจะทำให้ค่าการตอบสนองต่อแสงสูงนั่นเอง

4.3.3.1 สัญญาณรบกวนของพินโฟโตไดโอด

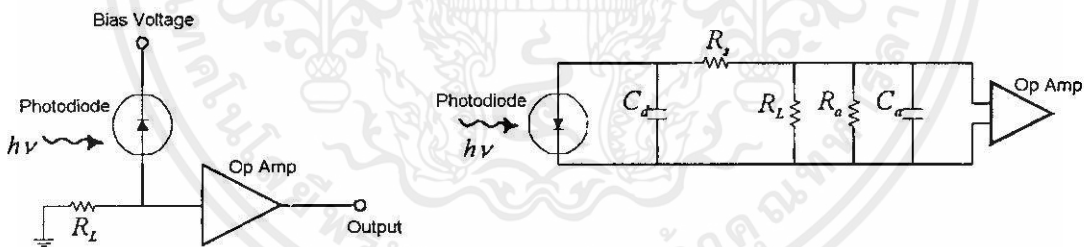
ในงานวิจัยนี้โฟโตไดโอดจะถูกใช้ในการตรวจวัดแสงจากโหมคของแสงต่างๆ ที่มีกำลังของแสงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เพื่อให้การตรวจวัดแสงจากโหมคของแสงต่างๆ ทำได้ดีจึงต้องอาศัยอุปกรณ์รับแสงที่ประกอบด้วยส่วนของพินโฟโตไดโอดและส่วนของการขยายสัญญาณขนาดเล็กซึ่งมีผลทำให้เกิดสัญญาณรบกวนขึ้นโดยสามารถอธิบายได้ด้วยอัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio, $\frac{S}{N}$)

$$\frac{S}{N} = \frac{\text{กำลังของสัญญาณแสงที่ทำให้เกิดกระแสโฟโต}}{\text{สัญญาณรบกวนของฟิโนโตไดโอด + สัญญาณรบกวนจากการขยายสัญญาณ}} \quad (4.21)$$

จากสมการนี้แสดงให้เห็นว่าแหล่งกำเนิดของสัญญาณรบกวนเกิดจากสองส่วนด้วยกันคือ สัญญาณรบกวนจากฟิโนโตไดโอดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแต่ละครั้งผ่านรอยต่อของฟิโนโตไดโอดและสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความร้อนของวงจรรขยายสัญญาณ ดังนั้นเพื่อให้การตรวจวัดสัญญาณรบกวนเล็กๆ ได้จึงต้องสร้างให้อุปกรณ์รับแสงให้มีค่า S/N สูงนั่นเอง ซึ่งค่าที่สูงนี้เกิดได้ด้วย 2 กรณีคือ กรณีแรกฟิโนโตไดโอดจะต้องมีประสิทธิภาพควอนตัมที่สูงในการตรวจวัดสัญญาณแสง กรณีที่สองคือสัญญาณรบกวนจากฟิโนโตไดโอดและสัญญาณรบกวนจากวงจรรขยายจะต้องมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ในทางทฤษฎีแล้วค่า S/N ที่น้อยที่สุดที่ความสามารถในการตรวจวัดสัญญาณแสงยังคงทำได้คือ $\frac{S}{N} = 2$

4.3.3.2 แหล่งกำเนิดของสัญญาณรบกวน

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงแหล่งกำเนิดของสัญญาณรบกวนภายในอุปกรณ์รับแสงแล้วนั้น ในหัวข้อนี้จะวิเคราะห์แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนดังกล่าวอย่างละเอียดโดยอาศัยวงจรการใช้งานของฟิโนโตไดโอดแสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงรูปแบบการใช้งานของฟิโนโตไดโอดและวงจรสมมูล

จากรูปวงจรการใช้งานของฟิโนโตไดโอดที่สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูล (Equivalent Circuit) ได้ซึ่งภายในโฟโตไดโอดจะเสมือนมีความต้านทานขนาดเล็ก R_s ต่ออนุกรมอยู่และมีความจุไฟฟ้ารวม C_p ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ ในการใช้งานจะต่อความต้านทานภาระ (Load Resistor, R_L) เพื่อป้องกันการเสียหายของโฟโตไดโอด ในส่วนของการขยายสัญญาณนั้นจะประกอบไปด้วยความจุไฟฟ้าอินพุต C_o และความต้านทาน R_o เนื่องจากความต้านทาน R_s มีค่าน้อยกว่าความต้านทาน R_L มากดังนั้นในการคำนวณจะละทิ้งความต้านทาน R_s ได้

ถ้าสัญญาณจากเอาต์พุตของใยแก้วนำแสงถูกมอดูเลตแทนได้ด้วย $P(t)$ และรับด้วยพินโฟโตไดโอดจะเกิดกระแสโฟโต $i_{ph}(t)$ ตามความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$i_{ph}(t) = \frac{\eta q}{h\nu} P(t) \quad (4.22)$$

จากสมการนี้กระแสโฟโตที่ถูกมอดูเลตซึ่งเกิดจากกระแสโฟโตขณะยังไม่มีการมอดูเลต I_p ดังนั้นกระแสโฟโต $i_{ph}(t)$ จะสามารถหาสัญญาณกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Signal) $\langle i_s^2 \rangle$ ได้เป็น

$$\langle i_s^2 \rangle = \langle i_{ph}^2(t) \rangle \quad (4.23)$$

จากสมการที่ (4.21) ได้ทราบแล้วว่าสัญญาณรบกวนเกิดจากสองส่วนด้วยกันต่อไปนี้กล่าวถึงส่วนแรกคือสัญญาณรบกวนจากพินโฟโตไดโอดประกอบไปด้วยสัญญาณรบกวนควอนตัม (Quantum Noise หรือ Shot Noise) สัญญาณรบกวนกระแสมืด (Dark-Current Noise) ที่เกิดขึ้นภายในสารกึ่งตัวนำและสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการรั่วไหลที่พื้นผิว (Surface Leakage Current Noise) สัญญาณรบกวนควอนตัมเกิดจากลักษณะทางธรรมชาติของคู่อิเล็กตรอนและโฮลเมื่อมีการเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่ไม่สม่ำเสมอเมื่อมีสัญญาณแสงตกกระทบบนพินโฟโตไดโอด สัญญาณรบกวนควอนตัมกำลังสองเฉลี่ย $\langle i_Q^2 \rangle$ ที่แบนด์วิดท์ (Bandwidth, B) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าเฉลี่ยของกระแสโฟโต I_p เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\langle i_Q^2 \rangle = 2qI_p B \quad (4.24)$$

เมื่อ B คือแบนด์วิดท์ของส่วนขยายสัญญาณ ในส่วนของสัญญาณรบกวนกระแสมืดเกิดจากการไหลของกระแสผ่านวงจรวินแอสเมื่อไม่มีสัญญาณแสงตกกระทบบนพินโฟโตไดโอดโดยจะหาค่ากำลังสองเฉลี่ยของกระแสมืด $\langle i_{dark}^2 \rangle$ ได้ดังนี้

$$\langle i_{dark}^2 \rangle = 2qI_D B \quad (4.25)$$

เมื่อ I_D คือกระแสมืดขณะยังไม่มีการมอดูเลต สำหรับสัญญาณรบกวนจากพินโฟโตไดโอดชนิดสุดท้ายคือสัญญาณรบกวนจากรั่วไหลที่พื้นผิวของสารกึ่งตัวนำซึ่งขึ้นอยู่กับความไม่

f

สมบรูณ์ของรอยต่อสารกึ่งตัวนำ ความต่างศักย์ที่ใช้ไบแอส และพื้นที่ของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นสามารถหาค่ากำลังสองเฉลี่ยของกระแสรั่วไหลที่พื้นผิว $\langle i_{leak}^2 \rangle$ ได้ดังนี้

$$\langle i_{leak}^2 \rangle = 2qI_L B \quad (4.26)$$

เมื่อ I_L กระแสรั่วไหลที่พื้นผิว จากสัญญาณรบกวนของโฟโตไดโอดทั้งสามชนิดนี้สามารถหาค่ากำลังสองเฉลี่ยรวมของโฟโตไดโอด $\langle i_{photodiode}^2 \rangle$ ได้เป็น

$$\begin{aligned} \langle i_{photodiode}^2 \rangle &= \langle i_Q^2 \rangle + \langle i_{dark}^2 \rangle + \langle i_{leak}^2 \rangle \\ &= 2qB(I_P + I_D + I_L) \end{aligned} \quad (4.27)$$

แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนในส่วนที่สองเกิดจากวงจรขยายสัญญาณนั้นพบว่าความต้านทานของออปแอมป์ (Op-Amp) มีค่าสูงกว่าความต้านทานภาระมากจึงทำให้สัญญาณรบกวนของการขยายสัญญาณเกิดจากความร้อนขึ้นอยู่กับความต้านทานภาระ R_L เท่านั้น โดยเกิดขึ้นมาจากอิเล็กตรอนภายในตัวต้านทานมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาเนื่องจากความร้อน ซึ่งสามารถหาค่ากำลังสองเฉลี่ยของกระแสที่เกิดจากความร้อน $\langle i_T^2 \rangle$ ได้ดังนี้

$$\langle i_T^2 \rangle = \frac{4k_B T B}{R_L} \quad (4.28)$$

เมื่อ k_B คือค่าคงที่โบลซ์มานส์ (Boltzman's Constant) และ T คืออุณหภูมิของความต้านทานภาระ สัญญาณรบกวนชนิดนี้สามารถลดลงได้โดยการเพิ่มความต้านทานภาระให้มีค่ามากขึ้นแต่ก็จะมีผลต่อแบนด์วิดท์ในการขยายสัญญาณของอุปกรณ์รับแสงตามสมการ (4.28) จากสมการ (4.21), (4.23), (4.27) และ (4.28) สามารถหาอัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวนได้ดังนี้

$$\frac{S}{N} = \frac{\langle i_{ph}^2(t) \rangle}{2qB(I_P + I_D + I_L) + \frac{4k_B T B}{R_L}} \quad (4.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการพิจารณาสัญญาณรบกวนที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดนั้นจะเห็นว่าสัญญาณรบกวนจากความร้อนมีผลต่ออัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวนมากที่สุดโดยมีค่าในอันดับสิบนานาโอแอมป์ ส่วนสัญญาณรบกวนอื่น ๆ มีค่าในอันดับไม่ถึงหนึ่งนาโนแอมป์

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับการโค้งงอของใยแก้วนำแสง ซึ่งแบ่งออกเป็นการโค้งงอที่มีรัศมีมีความโค้งมาก และการโค้งงอที่มีรัศมีมีความโค้งน้อย โดยการโค้งงอที่มีรัศมีมีความโค้งน้อยนี้เกิดขึ้นจากสิ่งแวดล้อมหลายชนิดด้วยกัน แต่บทนี้กล่าวเฉพาะการโค้งงอจากแรงภายนอกกระทำเท่านั้น ผลจากการโค้งงอนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างโหมดแสงซึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างดัชนีหักเหแสง รัศมีของใยแก้วนำแสง และจำนวนโหมดซึ่งเคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสง นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงเสถียรภาพการวัดการขจัดเนื่องจากความร้อนโดยความร้อนนั้นทำให้เฟสของแสงเปลี่ยนแปลงไปซึ่งมีผลทำให้ความยาวทางเดินของแสงในแต่ละโหมดเปลี่ยนแปลงไปเท่านั้น ซึ่งมีผลต่อระยะห่างระหว่างโหมดแสงดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 และในที่สุดท้ายของบทนี้นั้นได้กล่าวถึงอุปกรณ์ทางแสงและอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วยเส้นใยแก้วนำแสงโดยได้แบ่งขั้นตอนของการศึกษาวิจัยออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้คือ ขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วยเส้นใยแก้วนำแสง ขั้นตอนที่สองเป็นการศึกษาถึงเสถียรภาพและคุณสมบัติฮิสเทอรีซิสของระบบทดลอง

5.1 การออกแบบระบบทางแสง

การออกแบบระบบทางแสงในการทดลองสำหรับใช้ในงานวิจัยแสดงไว้ดังรูปที่ 5.1 โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนของสัญญาณอินพุต ส่วนของเซ็นเซอร์ (Sensor) และใยแก้วนำแสง และส่วนสุดท้ายคือส่วนรับสัญญาณแสง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.1 แสดงระบบและเครื่องมือทดลองในการศึกษาความเป็นไปได้ของการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสง
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ลิขสิทธิ์ห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1 ส่วนอินพุต

ส่วนอินพุตประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ชนิดโพลาไรเซชันเชิงเส้น ซีโอปเปอร์ทำหน้าที่มอดูเลตแสงจากแหล่งกำเนิด และอุปกรณ์ป้อนแสงเข้าสู่ใยแก้วนำแสงคือเลนส์วัตถุที่มีค่านิวเมอริคัลอะเพอร์เจอร์เท่ากับ 0.25 วางอยู่ระหว่างใยแก้วนำแสงและแหล่งกำเนิดแสง สำหรับการป้อนแสงเข้าสู่ใยแก้วนำแสงนั้นใช้ไมโครบล็อก(Microblock) ในการปรับระยะทั้งสามมิติ จนกระทั่งได้สัญญาณป้อนเข้าสู่ใยแก้วนำแสงสูงสุดโดยปฏิบัติอย่างเดียวกันทั้งใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวและชนิดหลายโหมดดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงส่วนอินพุตในการป้อนแสงจากเลเซอร์ฮีเลียมนีออนเข้าสู่ใยแก้วนำแสง

5.1.2 ส่วนเซนซิงยูนิตและใยแก้วนำแสง

ในส่วนนี้ประกอบด้วยใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวและหลายโหมดโดยทำการทดลองต่อเนื่องกันไปซึ่งมีขนาดของแกน 5/125 และ 50/125 ไมโครเมตรตามลำดับ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งผ่านแสงจากแหล่งกำเนิดแสง สำหรับอุปกรณ์ที่สำคัญอีกชิ้นหนึ่งในภาคนี้คือเซนซิงยูนิต ซึ่งทำได้โดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงวางลงบนเซนซิงยูนิต โดยที่ปลายทั้งสองข้างของเซนซิงยูนิตนี้จะใช้สกรูเพื่อยึดใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดเพื่อไม่ให้เลื่อนไปมาขณะทำการทดลอง โดย

หน้าที่หลักของเซนซิงยูนิตนี้คือทำให้แสงที่เคลื่อนที่อยู่ในใยแก้วนำแสงมีความเร็วหรือมีค่าดัชนีหักเหสัมพัทธ์เปลี่ยนไปอันเนื่องมาจากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่มากระทำบริเวณเซนซิงยูนิตนั้นเช่น การขจัดหรือการเคลื่อนที่ขึ้นลงของเซนซิงยูนิต แรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิต และความร้อน เป็นต้น ในการวัดระยะการขจัดนี้จะใช้ไมโครมิเตอร์ซึ่งมีความละเอียด 10 ไมโครเมตรโดยปรับทิศทางให้อยู่ในแนวตั้งเพื่อกดเซนซิงยูนิตให้เลื่อนขึ้นลงเป็นระยะต่างๆ ดังรูปที่ 5.3 ส่วนในการให้ความร้อนแก่เซนซิงยูนิตนั้นจะอาศัยแหล่งกำเนิดความร้อนคือฮีตติงกัน (Heating Gun) และทำการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์ชนิดตัวเลข โดยการติดตั้งหัววัดเข้าไปภายในเซนซิงยูนิตซึ่งเจาะช่องไว้แล้ว ในการวัดแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิตนั้นจะใช้มวลขนาดต่างๆ วางบนเซนซิงยูนิต.



รูปที่ 5.3 แสดงส่วนเซนซิงยูนิตและใยแก้วนำแสงพร้อมทั้งชุดไมโครมิเตอร์ใช้สำหรับวัดการขจัดของเซนซิงยูนิต

5.1.3 ส่วนรับแสง

สำหรับส่วนรับแสงนี้ประกอบไปด้วยอุปกรณ์นำแสงออกจากใยแก้วนำแสงเข้าสู่เลนส์วัตถุ เกรตติงชนิดส่งผ่าน อุปกรณ์รับแสงและชุดไมโครมิเตอร์ สำหรับอุปกรณ์นำแสงออกจากใยแก้วนำแสงเข้าสู่เลนส์นี้ประกอบไปด้วยที่ยึดใยแก้วนำแสงซึ่งสามารถปรับระยะโฟกัสได้ และเลนส์วัตถุที่มีค่านิ้วเมอร์ริตลอะเพอร์เจอร์เท่ากับ 0.25 โดยหน้าที่หลักของอุปกรณ์นำแสงออกจากใยแก้วนำแสงนี้คือนำแสงออกจากใยแก้วนำแสงและเพื่อจัดให้แสงที่ออกจากใยแก้วนำแสงมีความ

เข้มแสงสูงสุด ในส่วนรับแสงนี้เมื่อจัดให้แสงมีความเข้มแสงสูงสุดแล้วก็จะใช้เกรตติงชนิดส่งผ่าน ซึ่งวางอยู่ระหว่างอุปกรณ์นำแสงออกจากใยแก้วนำแสงกับอุปกรณ์รับแสง โดยเกรตติงชนิดส่งผ่านที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความละเอียด 1209 เส้นต่อมิลลิเมตร มีหน้าที่ในการแยกโหมดแสงต่างกันที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสง ในส่วนของอุปกรณ์รับแสงประกอบด้วยวงจรรับแสงและแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า เพื่อทำหน้าที่รับความเข้มแสงโหมดต่างๆ จากการแยกด้วยเกรตติงชนิดส่งผ่านเข้าไปแปลงและขยายเป็นสัญญาณไฟฟ้าก่อนนำไปแสดงผลด้วยออสซิลโลสโคป วงจรนี้ได้ใช้โฟโตไดโอดแบบพิเศษรุ่น BPW 21 เป็นอุปกรณ์รับแสง ซึ่งข้อดีของโฟโตไดโอดนี้คือสามารถตอบสนองต่อแสงสีแดงได้ดี(ภาคผนวก ข.) โดยเหมาะกับการวัดกำลังแสงน้อยๆ และมีพื้นที่รับแสงได้มากจึงช่วยลดปัญหาเรื่องการบดบังแสงได้ดี โฟโตไดโอดนี้ต่อเข้ากับภาคขยายสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ประกอบด้วยวงจรถ่ายและมิกซ์จรรองสัญญาณรบกวนประกอบอยู่ในส่วนนี้ด้วย ส่วนสัญญาณเอาต์พุตของภาคนี้จะนำไปแสดงผลด้วยออสซิลโลสโคปต่อไป อุปกรณ์ชิ้นสุดท้ายของส่วนรับแสงนี้คือชุดไมโครมิเตอร์ซึ่งมีความละเอียด 10 ไมโครเมตร โดยอุปกรณ์รับแสงที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะถูกยึดติดกับชุดไมโครมิเตอร์นี้เพื่อทำหน้าที่ตรวจวัดโหมดของแสงซึ่งถูกแยกด้วยเกรตติงชนิดส่งผ่าน ชุดไมโครมิเตอร์จะใช้สำหรับเลื่อนอุปกรณ์รับแสงในแนวของการเกิดโหมดแสงดังแสดงในรูปที่ 5.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าในรูปแบบใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 5.4 แสดงส่วนรับแสงและเครื่องมือของระบบการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัด
ด้วยใยแก้วนำแสง

5.2 การศึกษาการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสง

ในการศึกษาการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสงนั้นได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางมากในปัจจุบัน สำหรับการศึกษาวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสงซึ่งเป็นแนวคิดใหม่เพื่อนำมาทำเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดการขจัด และไม่มี ความซับซ้อนของระบบการวัดการขจัด โดยอาศัยหลักการแยกโหมดของแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงด้วยเกรตติงชนิดส่งผ่าน

5.2.1 การศึกษาการแยกโหมดแสงด้วยเกรตติงชนิดส่งผ่าน

เกรตติงชนิดส่งผ่านที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีหน้าที่หลักคือ ทำการแยกโหมดของแสงต่างกันที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสง ดังนั้น หัวข้อนี้จึงเป็นการทดลองเพื่อศึกษาหลักการแยกโหมดของแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวและหลายโหมด โดยการแยกโหมดของแสงนั้นจะเป็นไปตามสมการของเกรตติง

5.2.1.1 การทดลอง

ในการทดลองได้ป้อนแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนเข้าสู่อุปกรณ์ป้อนแสงเข้าสู่ใยแก้วนำแสงโดยใช้ไมโครบิล็อกในการปรับระยะทั้งสามมิติ จนกระทั่งสัญญาณแสงเข้าสู่ในแก้วนำแสงด้วยความเข้มแสงสูงสุด ที่ตอนปลายของใยแก้วนำแสงจะยึดด้วยอุปกรณ์นำแสงออกจากใยแก้วนำแสงซึ่งสามารถปรับระยะโฟกัสได้ เมื่อจัดระบบการทดลองจนกระทั่งได้ความเข้มแสงสูงสุดแล้วจะนำเกรตติงชนิดส่งผ่านมาวางในแนวทางเดินของแสง สำหรับลักษณะของโหมดแสงที่แยกด้วยเกรตติงชนิดส่งผ่านนี้จะแสดงให้เห็นได้ด้วยจากรับแสงหรืออุปกรณ์รับแสง นอกจากนี้ในการทดลองยังได้มีการทดลองเปลี่ยนระยะระหว่างเกรตติงชนิดส่งผ่านกับอุปกรณ์รับแสง และสังเกตการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง

5.2.2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง

จากโครงสร้างของใยแก้วนำแสงที่ประกอบด้วยวัสดุที่มีดัชนีหักเหในส่วนแกนและแคลคดิงที่แตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจากสิ่งแวดล้อมภายนอกใยแก้วนำแสงจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแนวทางการเคลื่อนที่ของโหมดแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงได้ตามสมการ (4.5) ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของแรงภายนอกที่กระทำต่อเซนซิงยูนิตซึ่งส่งผลให้ดัชนีหักเหสัมพัทธ์ระหว่างแกนและแคลคดิงเปลี่ยนแปลงไป ในการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหสัมพัทธ์นี้จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสง ซึ่งจะทำได้ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิตกับการเปลี่ยนแปลงโหมดของแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงซึ่งสามารถแยกด้วยเกรตติงชนิดส่งผ่านได้ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในการศึกษาหลักการแยก

โหมคของแสงด้วยเกรตติงชนิดส่งผ่าน โดยการศึกษาหัวข้อนี้จะเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่าง โยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดี่ยวและหลายโหมค

หัวข้อนี้นอกจากจะเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิตกับการเปลี่ยนแปลงของโหมคแสงที่เคลื่อนที่ในโยแก้วนำแสงแล้ว ยังเป็นการศึกษากำลังแยกและขีดจำกัดของแรงที่สามารถใช้ในงานวิจัยอีกด้วย

5.2.2.1 การทดลองหาค่ากำลังแยกและขีดจำกัดของแรง

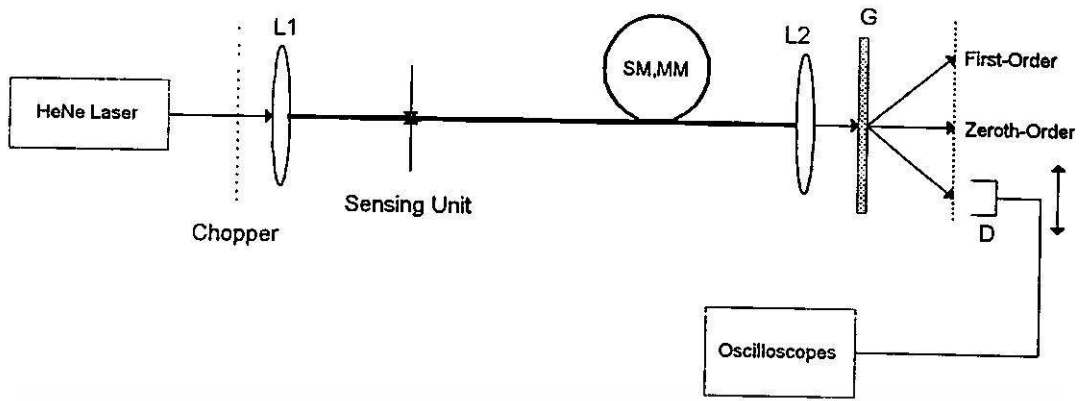
การทดลองนี้ได้จัดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 โดยก่อนการทดลองจะต้องทำการป้อนแสงเข้าสู่โยแก้วนำแสงโดยปรับไมโครบล็อกเพื่อให้สัญญาณแสงมีความเข้มของแสงสูงสุดก่อนการทดลองทุกครั้ง สำหรับการทดลองนี้ได้ใช้เส้นโยแก้วนำแสงยาว 6 เมตร ส่วนตำแหน่งของเซนซิงยูนิตจะวางห่างจากปลายโยแก้วนำแสงข้างหนึ่งเป็นระยะ 1 เมตร ที่ตำแหน่งนี้ โยแก้วนำแสงจะถูกยึดกับเซนซิงยูนิตเพื่อป้องกันการเลื่อนของโยแก้วนำแสงขณะทำการทดลอง จากนั้นทดลองเลื่อนตำแหน่งของอุปกรณ์รับแสงด้วยไมโครมิเตอร์ที่อันดับการเลี้ยวเบนที่ 1 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงกับระยะห่างของโหมคแสงทั้งสองหรือตำแหน่งของอุปกรณ์รับแสงนั่นเอง โดยความสัมพันธ์นี้จะใช้เป็นความสัมพันธ์อ้างอิง ต่อจากนั้นทดลองเพิ่มมวลขนาด 10 , 50 , 100 , 200 , 300 , 400 และ 500 กรัม ลงบนเซนซิงยูนิต เมื่อเพิ่มมวลทราน้ำหนักแต่ละครั้งจะทำการเลื่อนตำแหน่งของอุปกรณ์รับแสงด้วยไมโครมิเตอร์ที่อันดับการเลี้ยวเบนที่ 1 เพื่อหาระยะห่างของโหมคแสงเปรียบเทียบกับระยะห่างของโหมคแสงอ้างอิง โดยมวลทราน้ำหนักน้อยที่สุดที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างโหมคแสงทั้งสองจะเป็นค่ากำลังแยกของแรงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ในส่วนของขีดจำกัดของแรงที่ใช้ในงานวิจัยนี้หาได้จากมวลมากที่สุดซึ่งทำให้เซนซิงยูนิตที่ทำให้โยแก้วนำแสงโค้งงอได้ตามรัศมีความโค้งของเซนซิงยูนิตนั่นเอง

5.2.2.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนแปลงของโหมค

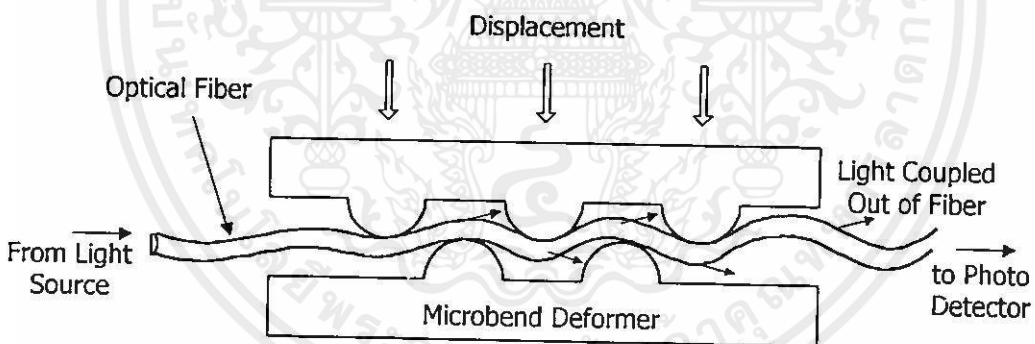
แสง

การทดลองนี้ได้จัดอุปกรณ์การทดลองเช่นเดียวกับกับการทดลองหาค่ากำลังแยกและขีดจำกัดของแรง จากการทดลองที่กล่าวมาแล้วข้างต้นทำให้ทราบช่วงของน้ำหนักที่สามารถใช้ในงานวิจัยได้ ดังนั้นการทดลองนี้จะใช้มวลทราน้ำหนักขนาด 100 , 200 , 300 , 400 และ 500 กรัม โดยแต่ละครั้งที่เพิ่มมวลจะทดลองเลื่อนตำแหน่งของอุปกรณ์รับแสงด้วยไมโครมิเตอร์ที่อันดับการเลี้ยวเบนที่ 1 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิตกับการเปลี่ยนแปลงของโหมคแสงที่เคลื่อนที่ในโยแก้วนำแสงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 แสดงการจัดอุปกรณ์การทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิตกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง โดยเมื่อแสงจากเลเซอร์ฮีเลียมนีออนเคลื่อนที่ผ่านช็อบเปอร์แล้วถูกรวมแสงด้วยเลนส์ L1 เข้าไปในใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว (SM) และหลายโหมด (MM) ในระหว่างที่แสงเคลื่อนที่อยู่นั้นจะถูกแรงภายนอกกระทำบนเซนซิงยูนิตทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงแล้วจึงเคลื่อนที่ออกจากใยแก้วนำแสงโดยผ่านเลนส์ L2 และแล้วโหมดของแสงจะถูกแยกด้วยเกรตติง G ในอันดับการเลี้ยวเบนที่ 0 (Zeroth-Order) และ 1 (First-Order) แล้วถูกแสดงผลด้วยออสซิลโลสโคป



รูปที่ 5.6 แสดงใยแก้วนำแสงถูกแรงกระทำบนเซนซิงยูนิตทำให้เกิดการขจัด (Displacement) ใยแก้วนำแสงมีการเปลี่ยนรูปร่างตามรัศมีความโค้ง (Microbend Deformer) และแสงจากแหล่งกำเนิด (From Light Source) เกิดการหักเหออกจากใยแก้วนำแสง (Light Reflected Out of Fiber) ขณะที่มีส่วนหนึ่งเคลื่อนที่ไปยังอุปกรณ์รับแสง (Photodetector)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

5.2.3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการขจัดกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องขออนุญาตก่อนนำเนื้อหาไปใช้

ผลจากการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมภายนอกที่มีต่อใยแก้วนำแสงเช่น แรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิตทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสง ในหัวข้อนี้จะ

ทำการศึกษความสัมพันธ์ระหว่างการจัดที่เกิดจากแรงกระทำบนเซนซิงยูนิตกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสง หัวข้อนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนดังนี้คือ ส่วนแรกจะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิตกับการจัด ส่วนที่สองทำการศึกษความสัมพันธ์ระหว่างการจัดของเซนซิงยูนิตกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสง โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบกันระหว่างใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวและใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด

5.2.3.1 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการจัดของเซนซิงยูนิต

การทดลองนี้ได้จัดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 5.5 และ 5.6 โดยใช้ใยแก้วนำแสงยาว 6 เมตร ส่วนตำแหน่งของเซนซิงยูนิตจะวางห่างจากปลายใยแก้วนำแสงข้างหนึ่งเป็นระยะ 1 เมตร เช่นเดียวกับการทดลอง 5.2.2.1 จากทดลองหาค่ากำลังแยกและขีดจำกัดของแรงที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งทำให้สามารถหามวลทรานส์มิทติ้งน้ำหนักรวมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้คือ 100 , 200 , 300 , 400 และ 500 กรัม การทดลองหาความสัมพันธ์นั้นเริ่มจากวางมวลทรานส์มิทติ้งบนเซนซิงยูนิตทีละขนาด การเพิ่มมวลทรานส์มิทติ้งทำให้เกิดการจัดของเซนซิงยูนิตขึ้น จากนั้นเลื่อนไมโครมิเตอร์ซึ่งจัดให้อยู่ในแนวตั้งจนสัมผัสกับเซนซิงยูนิตทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการจัดของเซนซิงยูนิตได้

5.2.3.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างการจัดกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง

การทดลองนี้ได้จัดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 5.5 และ 5.6 ผลจากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการจัดของเซนซิงยูนิต ซึ่งทำให้ทราบการจัดของเซนซิงยูนิตค่าต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองนี้ โดยเมื่อใช้ไมโครมิเตอร์ที่จัดให้อยู่ในแนวตั้งกดเซนซิงยูนิตเป็นระยะการจัดแต่ละค่านั้น แล้วเลื่อนตำแหน่งของอุปกรณ์รับแสงด้วยไมโครมิเตอร์ที่อันดับการเลี้ยวเบนที่ 1 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการจัดของเซนซิงยูนิตกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงได้

5.2.4 การศึกษาเสถียรภาพในการวัดการจัดเนื่องจากความร้อน

ดังที่ได้มีการศึกษามาแล้วในหัวข้อข้างต้น จากการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมภายนอก ใยแก้วนำแสงต่างๆ จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงตามสมการ (4.5) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงเนื่องจากการได้รับแรงภายนอกกระทำต่อเซนซิงยูนิต และการจัดของเซนซิงยูนิตนั้น แต่สิ่งแวดล้อมภายนอกไม่ได้มีเฉพาะแรงที่ทำให้เกิดการจัดของเซนซิงยูนิตเท่านั้น สิ่งแวดล้อมภายนอกที่สำคัญอีกตัวแปรหนึ่งคือ ความร้อน ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาเสถียรภาพของระบบการทดลองเนื่องจาก

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยศึกษาเปรียบเทียบกันระหว่างใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดี่ยวและใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมค

5.2.4.1 การทดลอง

ในการทดลองนี้ได้จัดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 5.7 โดยใช้ใยแก้วนำแสงยาว 6 เมตร ส่วนตำแหน่งของเซนซิงยูนิตจะวางห่างจากปลายใยแก้วนำแสงเป็นระยะ 1 เมตร โดยในการทดลองจะให้ความร้อน 25, 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียสจากแหล่งกำเนิดความร้อน ในการวัดอุณหภูมินั้นจะใช้เทอร์โมมิเตอร์ชนิดตัวเลข โดยติดตั้งหัววัดเข้าไปภายในเซนซิงยูนิตซึ่งได้เจาะช่องสำหรับหัววัดไว้แล้ว โดยเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิแต่ละค่านั้นจะทดลองเลื่อนตำแหน่งของอุปกรณ์รับแสงด้วยไมโครมิเตอร์ที่อันดับการเลี้ยวเบนที่ 1 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจับกับการเปลี่ยนแปลงของโหมคแสงต่อไป



รูปที่ 5.7 แสดงการจัดอุปกรณ์การทดลองศึกษานสัถยรภาพของระบบการวัดการขจัดเน้ดงจากความร้อน

5.2.5 การศึกษาคุณสมบัติการมีอัสเตอร์จิสของระบบการทดลอง

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการขจัดของเซนซิงยูนิต แรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิต และการศึกษาถึงเสถียรภาพของระบบเนื่องจากความร้อนกับการเปลี่ยนแปลงของโหมคแสงที่ได้ตั้งที่ทำการศึกษามาแล้วในหัวข้อข้างต้น ซึ่งเป็นการทดลองเพิ่มปริมาณต่างๆ เท่านั้น ดังนั้นในการ

ศึกษาหัวข้อนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติการมีอิสระของระบบการทดลอง โดยคุณสมบัตินี้เป็นปรากฏการณ์ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ 2 ปริมาณ ที่จะขึ้นอยู่กับการเพิ่มและลดปริมาณใดปริมาณหนึ่ง ซึ่งในหัวข้อนี้จะศึกษาการมีอิสระระหว่างการจัดของเซนซิงยูนิตกับการเปลี่ยนแปลงของโหมคแสง การมีอิสระจากแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิตกับการเปลี่ยนแปลงของโหมคแสง และการมีอิสระของอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงของโหมคแสงตามลำดับ

5.2.5.1 การทดลอง

การทดลองนี้ได้จัดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 5.5, 5.6, และ 5.7 ตามลำดับ จากการศึกษาในหัวข้อที่ 5.2.1 5.2.3 และ 5.2.4 นั้น การทดลองในหัวข้อนี้จะทำการทดลองเช่นเดียวกันเพียงแต่เมื่อเพิ่มปริมาณต่างๆ เสร็จแล้วจะทำการลดปริมาณเหล่านั้นลงจนกระทั่งค่าเริ่มต้นอีกครั้งหนึ่ง โดยจะทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสามกับการเปลี่ยนแปลงของโหมคแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงเช่นเดียวกัน

5.3 สรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบระบบทางแสงที่ใช้ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการจัดด้วยใยแก้วนำแสงโดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนอินพุต ส่วนเซนซิงยูนิตและใยแก้วนำแสง และส่วนสุดท้ายของการออกแบบระบบทางแสงคือส่วนรับแสง นอกจากนี้ยังกล่าวถึงขั้นตอนการศึกษาการวัดการจัดด้วยใยแก้วนำแสงซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือส่วนแรกเป็นการศึกษาหลักการแยกโหมคของแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงทั้งชนิดโหมคเดี่ยวและหลายโหมคด้วยเกรตติงชนิดส่งผ่าน ในส่วนนี้ยังศึกษาผลจากสิ่งแวดล้อมภายนอกใยแก้วนำแสงที่มีผลต่อโหมคของแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงเช่นการจัดของเซนซิงยูนิต แรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิต และการศึกษาเสถียรภาพของระบบการทดลองเนื่องจากความร้อน โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบกันระหว่างใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดี่ยวและหลายโหมค ในส่วนสุดท้ายของขั้นตอนการศึกษาการวัดการจัดด้วยใยแก้วนำแสงนั้นจะเป็นการศึกษาคุณสมบัติการมีอิสระของระบบการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ผลของงานวิจัย

บทนี้จะแสดงผลการทดลองจากการศึกษาตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 โดยจะแสดงเป็นขั้นตอนดังนี้คือ ผลการออกแบบระบบทางแสง การแยกโหมดของแสงด้วยเกรตติงชนิดส่งผ่าน ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง ความสัมพันธ์ระหว่างการจำกัดกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง เสถียรภาพในการวัดการจำกัดเนื่องจากความร้อน และคุณสมบัติการมีฮิสเตอร์ิซิสของระบบการทดลอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

6.1 การออกแบบระบบทางแสง

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาระบบการทดลองที่มีเสถียรภาพมากที่สุดสำหรับใช้ในงานวิจัย โดยในการทดลองได้ศึกษาเป็นลำดับขั้นในแต่ละส่วนดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 5.1 ซึ่งรายละเอียดในแต่ละส่วนในระบบทางแสงดังต่อไปนี้

6.1.1 ส่วนอินพุต

ในส่วนอินพุตเมื่อได้ทดลองป้อนแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนเข้าสู่ใยแก้วนำแสงผ่านอุปกรณ์ป้อนแสงซึ่งก็คือเลนส์วัตถุ และได้ใช้ไมโครบล็อกในการปรับระยะในแนวแกนทั้งสามมิติเพื่อให้แสงเข้าสู่ใยแก้วนำแสงพบว่าความเข้มของแสงที่เข้าสู่ใยแก้วนำแสงจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของใยแก้วนำแสงทั้งสามมิติ ดังนั้นก่อนทำการทดลองจึงต้องทำการจัดแนวของลำแสงจากแหล่งกำเนิดแสงให้ผ่านเลนส์วัตถุที่ตำแหน่งกึ่งกลางเลนส์ก่อน หลังจากนั้นจึงปรับไมโครบล็อกเป็นลำดับถัดมาเพื่อให้ได้ความเข้มของแสงสูงสุด นอกจากนี้ความเข้มของแสงที่เข้าสู่ใยแก้วนำแสงยังขึ้นอยู่กับ การตัดเส้นใยแก้วนำแสงอีกด้วย โดยก่อนการป้อนแสงเข้าสู่ใยแก้วนำแสงจึงควรตัดปลายใยแก้วนำแสงให้ได้ฉากและต้องเรียบ ในส่วนนี้ยังพบว่าการป้อนแสงเข้าสู่ใยแก้วนำแสงชนิด โหมดเดียวทำได้ยากกว่าใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดมากซึ่งเกิดขึ้นจากรัศมีของแกนใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวมีขนาดเล็กมากกว่าชนิดหลายโหมดนั่นเอง

6.1.2 ส่วนเซนซิงยูนิตและใยแก้วนำแสง

ส่วนของเซนซิงยูนิตซึ่งมีหน้าที่หลักคือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหสัมพัทธ์ระหว่างแกนและแคลคดิงของใยแก้วนำแสงโดยการทำให้ใยแก้วนำแสงเกิดการโค้งงอ โดยการทดลองได้สร้างเซนซิงยูนิตโดยใช้วัสดุหลายชนิดเช่น อะลูมิเนียม ไม้ และพลาสติก เป็นต้น จากการทดลองใช้เซนซิงยูนิตเหล่านี้ปรากฏว่าเซนซิงยูนิตที่ทำขึ้นจากอะลูมิเนียมมีน้ำหนักมาก

เกินไปจึงทำให้ไม่สามารถใช้ในการศึกษาการวัดการขจัดได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้เซนซิงยูนิตที่สร้างขึ้นจากไม้ และพลาสติก ในการศึกษาความเป็นไปได้การวัดการขจัด โดยเซนซิงยูนิตที่สร้างขึ้นนี้มีลักษณะดังรูปที่ 6.1

รูปที่ 6.1 แสดงลักษณะของเซนซิงยูนิตที่ใช้ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัด

6.1.3 ส่วนรับแสง

ส่วนรับแสงนี้ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 5.1.3 ในการทดลองพบว่า หลังจากแยกโหมคของแสงเอาต์พุตด้วยเกรตติงชนิดส่งผ่าน และจัดให้แสงมีความเข้มสูงสุดแล้วนั้น เมื่อนำอุปกรณ์รับแสงมาตรวจวัดโหมคของแสงที่อันดับการเลี้ยวเบนต่างๆ ปรากฏว่าเกิดสัญญาณรบกวนและเกิดการกระเพื่อมของสัญญาณเนื่องมาจากการสั่นสะเทือนของระบบการทดลอง เนื่องจากสัญญาณที่ตรวจวัดได้นั้นมีค่าน้อยอยู่ในระดับมิลลิโวลต์ ซึ่งสังเกตได้จากออสซิลโลสโคป ดังนั้นในการทดลองจึงได้ปรับปรุงเสถียรภาพของระบบการทดลองใหม่โดยการจัดระบบการทดลองทั้งหมดไว้บนฐานวางระบบการทดลองที่มีขนาดใหญ่กว่าเดิมและที่ฐานวางระบบการทดลองนี้มีอุปกรณ์ป้องกันสั่นสะเทือน ในส่วนของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นได้แก้ปัญหาโดยการติดตั้งสายดินให้แก่ระบบการทดลองและทำการปรับปรุงวงจรขยายสัญญาณและวงจรกรองสัญญาณภายในอุปกรณ์รับแสง หลังจากได้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นตามที่กล่าวมาแล้วนั้น ปรากฏว่าสามารถลดสัญญาณรบกวนได้มีค่า 1 มิลลิโวลต์โดยก่อนการปรับปรุงนั้นสัญญาณรบกวนมีค่า 5 มิลลิโวลต์ถึง 10 มิลลิโวลต์ สำหรับปัญหาการสั่นสะเทือนนั้นได้พบว่าสามารถสังเกตสัญญาณจากออสซิลโลสโคปได้ดีขึ้นเช่นกัน

6.2 ผลการศึกษาการแยกโหมคของแสงด้วยเกรตติงชนิดส่งผ่าน

จากหัวข้อ 5.2.1 ซึ่งเป็นการศึกษาหลักการแยกโหมคของแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสง ดังนั้นในหัวข้อ 6.2 นี้จึงนำเสนอผลการศึกษาดังกล่าว

จากการทดลองการแยกโหมคแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดี่ยวด้วยเกรตติงชนิดส่งผ่านพบว่ารูปแบบของการเลี้ยวเบนเป็นไปตามสมการของเกรตติง โดยมีจำนวนโหมคแสงที่เคลื่อนที่ภายในใยแก้วนำแสงได้เพียงสองโหมค เนื่องจากเกิดโหมคแสงซึ่งแยกเป็นสองโหมคที่อันดับการเลี้ยวเบนที่ 1 นอกจากนี้เมื่อทดลองเปลี่ยนระยะระหว่างเกรตติงชนิดส่งผ่านกับอุปกรณ์รับแสงปรากฏว่า ระยะที่เปลี่ยนไปจะทำให้ความเข้มของแสงในแต่ละโหมคและระยะห่างของแสงทั้งสองโหมคเปลี่ยนแปลงไปด้วยโดยเมื่อระยะห่างระหว่างเกรตติงชนิดส่งผ่านกับอุปกรณ์รับแสงมากขึ้นจะทำให้ความเข้มแสงในแต่ละโหมคลดน้อยลงแต่ระยะห่างของแสงทั้งสองโหมคมีค่าเพิ่มขึ้น จากการทดลองนี้ทำให้สามารถทราบระยะระหว่างเกรตติงกับอุปกรณ์รับแสงที่ใช้ โดยจะเลือกระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ทั้งสองชนิดเป็นระยะ 10 เซนติเมตรเพราะว่าที่ระยะห่างนี้ยังคงมีความเข้มของแสงเพียงพอที่จะใช้ในการตรวจวัดโดยโหมคแสงทั้งสองมีสัญญาณวัดได้เท่ากับ 6.8 มิลลิโวลต์และ 3 มิลลิโวลต์ตามลำดับ และมีระยะห่างระหว่างโหมคแสงทั้งสองเท่ากับ 1500 ไมโครเมตร ส่วนสาเหตุที่ไม่ใช้ระยะห่างของเกรตติงกับอุปกรณ์รับแสงมากกว่านี้เนื่องจากสัญญาณที่วัดได้จะมีค่าลดน้อยลงจนไม่สามารถตรวจวัดได้และถ้าใช้ระยะห่างของอุปกรณ์ทั้งสองน้อยกว่านี้จะทำให้โหมคแสงทั้งสองอยู่ใกล้กันเกินไปทำให้ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของโหมคแสงทั้งสองไม่ได้

ในส่วนของการทดลองแยกโหมคแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมคด้วยเกรตติงชนิดส่งผ่านรูปแบบการเลี้ยวเบนเป็นไปตามสมการเกรตติงเช่นเดียวกัน พบว่าโหมคแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงนั้น เกิดโหมคแสงขึ้นเป็นจำนวนมากเมื่อฉายากระทบรับ แต่เมื่อนำเกรตติงชนิดส่งผ่านมาวางขวางทางเดินแสงปรากฏว่าพบเพียงโหมคแสงสองโหมคเกิดขึ้นที่อันดับการเลี้ยวเบนที่ 1 เท่านั้น สาเหตุที่เกรตติงสามารถแยกโหมคแสงได้เพียงสองโหมคคือน่าจะเกิดจากกำลังแยกของเกรตติงชนิดส่งผ่านที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีไม่เพียงพอที่จะแยกโหมคแสงอื่นๆ ที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงได้อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของโหมคแสงนั้นสามารถสังเกตได้จากสองโหมคแสงนี้ และเมื่อทดลองเปลี่ยนระยะห่างระหว่างเกรตติงชนิดส่งผ่านกับอุปกรณ์รับแสงเช่นเดียวกับใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดี่ยวปรากฏว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงและระยะระหว่างโหมคแสงทั้งสองเช่นเดียวกัน จากการทดลองนี้ทำให้สามารถทราบระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ทั้งสองที่ใช้ในงานวิจัยนี้โดยจะเลือกระยะห่างอุปกรณ์ทั้งสองเท่ากับ 10 เซนติเมตร ด้วยเหตุผลเดียวกับใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดี่ยวโดยโหมคแสงทั้งสองมีสัญญาณเอาต์พุต 145 มิลลิโวลต์และ 45 มิลลิโวลต์ตามลำดับ โดยมีระยะห่างระหว่างโหมคแสงทั้งสองเท่ากับ 800 ไมโครเมตร

6.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง

จากการทำการทดลองในหัวข้อ 5.2.2 ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 หัวข้อนั้น แต่เนื่องจากการทดลองทั้งสองหัวข้อมีความเกี่ยวข้องต่อเนื่องกันดังนั้นในหัวข้อ 6.3 นี้จึงจะนำเสนอผลการศึกษาทั้งสองหัวข้อรวมกันดังนี้

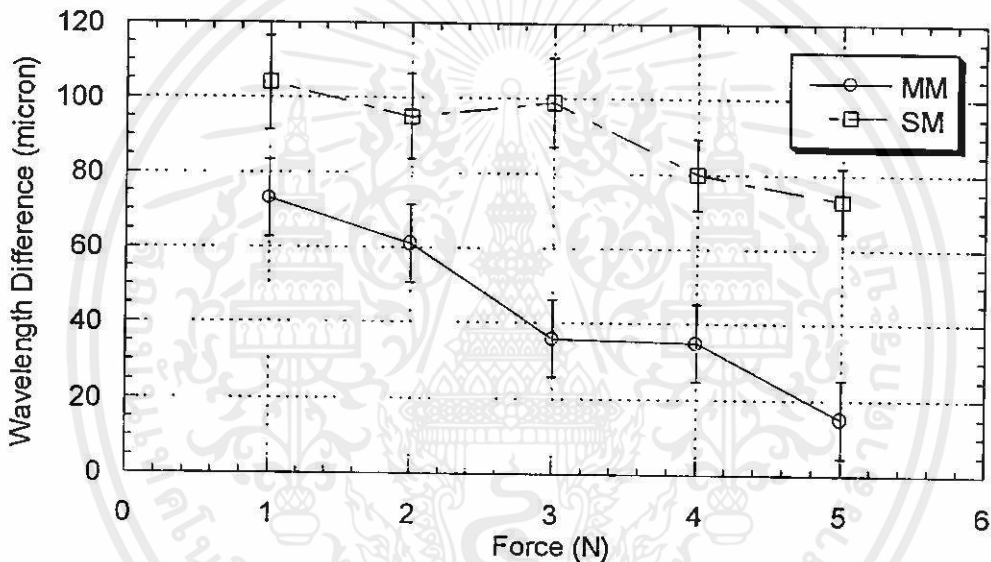
จากการทดลองหาค่ากำลังแยกและขีดจำกัดของแรงในหัวข้อ 5.2.2.1 จากผลการทดลองปรากฏว่าขนาดของแรงที่น้อยที่สุดหรือกำลังแยกของแรงนั้นมีขนาด 1 นิวตัน และขนาดของแรงที่มากที่สุดที่สามารถใช้ในงานวิจัยนี้ได้คือ 5 นิวตัน ทำให้สรุปได้ว่าช่วงของแรงที่สามารถใช้ในงานวิจัยนี้ได้คือแรงขนาด 1 นิวตันถึง 5 นิวตัน โดยการวัดใช้ระยะห่างระหว่างเกรตติงชนิดส่งผ่านกับอุปกรณ์รับแสงเท่ากับ 10 เซนติเมตร ส่วนผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงในหัวข้อ 5.2.2.2 นั้น อาศัยผลจากการทดลองหาค่ากำลังแยกและขีดจำกัดของแรงโดยได้ใช้แรงขนาด 1 , 2 , 3 , 4 และ 5 นิวตันตามลำดับ พบว่าแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิตทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงโดยเมื่อขนาดของแรงที่กระทำต่อเซนซิงยูนิตมากขึ้นมีแนวโน้มทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงน้อยลงในไอแก้วนำแสงทั้งสองชนิดแสดงได้ดังรูปที่ 6.2 ในส่วนของระยะห่างระหว่างโหมดแสงขณะยังไม่มีแรงกระทำบนเซนซิงยูนิตซึ่งใช้เป็นความสัมพันธ์อ้างอิงนั้น พบว่าเมื่อใช้ไอแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวระยะห่างระหว่างโหมดแสงมีค่ามากกว่าระยะห่างระหว่างโหมดแสงเมื่อใช้ไอแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดซึ่งเป็นไปตามสมการ (4.5) แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนโหมดของแสงที่เคลื่อนที่ในไอแก้วนำแสงมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ระยะระหว่างโหมดแสงทั้งสองมีค่าน้อยลงแสดงได้ดังรูปที่ 6.3 และ 6.4 และตารางที่ 6.1 นอกจากนี้ยังพบอีกว่านอกจากแรงกระทำบนเซนซิงยูนิตที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงแล้วยังมีผลต่อสัญญาณเอาต์พุตในแต่ละโหมด โดยไอแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวมีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเอาต์พุตของแสงน้อยกว่าไอแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดเมื่อใช้แรงกระทำขนาดเท่ากันดังรูปที่ 6.5 และรูปที่ 6.6

6.3.1 วิธีการหาการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง

จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงนั้น ทำให้ทราบว่าเมื่อแรงที่กระทำต่อเซนซิงยูนิตเพิ่มขึ้นการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงจะมีค่าลดลง ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการหาการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงดังนี้

พิจารณารูปที่ 6.7 โดยให้แกนอนคือตำแหน่งของอุปกรณ์รับแสงและแกนตั้งคือความเข้มแสง ในการทดลองหัวข้อ 6.3 เมื่อสามารถหาระยะห่างโหมดแสงขณะยังไม่มีแรงกระทำต่อเซนซิงยูนิตได้โดยใช้อุปกรณ์รับแสงเลื่อนเพื่อหาค่าตำแหน่งความเข้มแสงสูงสุดของโหมดแรก กำหนดให้เป็น D_{1max} ต่อจากนั้นเลื่อนอุปกรณ์รับแสงเพื่อหาค่าตำแหน่งความเข้มแสงสูงสุดของโหมดที่สองกำหนดให้เป็น D_{2max} ระยะระหว่างโหมดแสงทั้งสองจะหาได้จาก $D_{2max} - D_{1max} = D$

ซึ่งค่า D คือระยะระหว่างโหนดแสงทั้งสองเมื่อยังไม่มีแรงกระทำต่อเซนซิงยูนิต หลังจากนั้นเมื่อนำมวลทราบนำหนักวางลงบนเซนซิงยูนิตและใช้อุปกรณ์รับแสงเลื่อนเพื่อหาตำแหน่งความเข้มแสงสูงสุดของโหนดแรกกำหนดให้เป็น d_{1max} ที่ตำแหน่งนี้พบว่ากรณีเมื่อไม่มีแรงกระทำและหลังจากมีแรงกระทำแล้วไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อใช้อุปกรณ์รับแสงเลื่อนเพื่อหาตำแหน่งความเข้มแสงสูงสุดของโหนดที่สองกำหนดให้เป็น d_{2max} พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นดังรูปที่ 6.7 ดังนั้นระยะระหว่างโหนดทั้งสองเมื่อมีแรงกระทำบนเซนซิงยูนิตหาได้จาก $d_{2max} - d_{1max} = d$ จากระยะระหว่างโหนดแสงกรณียังไม่มีแรงกระทำ (ใช้เป็นค่าอ้างอิง) และระยะระหว่างโหนดแสงกรณีมีแรงกระทำ จึงหาการเปลี่ยนแปลงของโหนดแสงได้จาก $D - d$ ซึ่งก็คือผลการทดลองดังตารางที่ 6.1 เป็นต้น

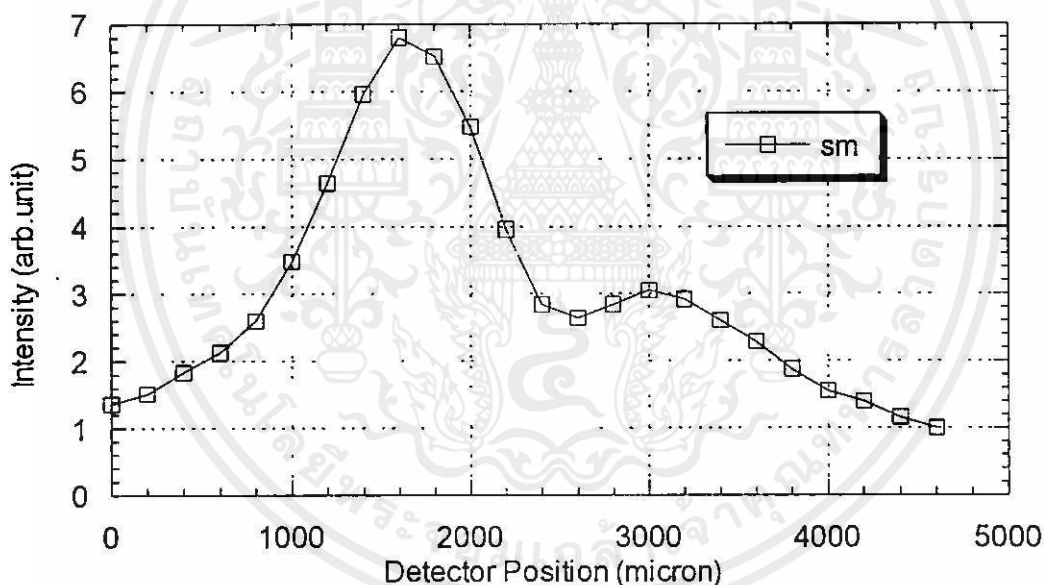


รูปที่ 6.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิตในหน่วยนิวตัน (Force, N) กับการแปลงของโหนดแสงในหน่วยไมโครเมตร (Wavelength Difference, micron) โดยเปรียบเทียบระหว่างใยแก้วนำแสงชนิดโหนดเดี่ยว (SM) และหลายโหนด (MM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

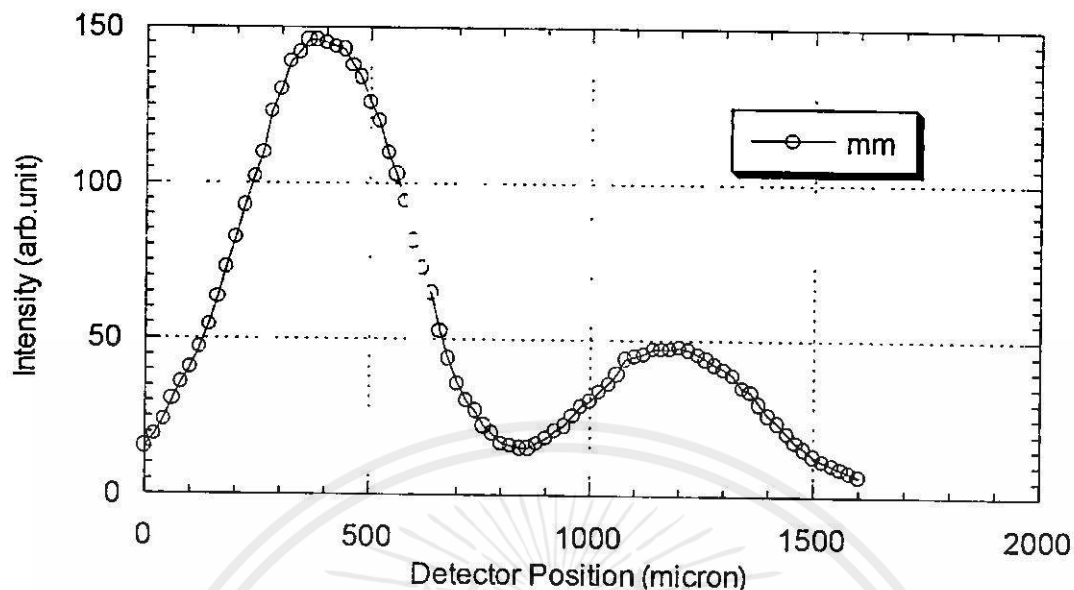
ตารางที่ 6.1 แสดงผลการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนแปลงของโหนดแสง โดยเปรียบเทียบระหว่างใยแก้วนำแสงชนิดโหนดเดี่ยว และใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหนด

แรง (นิวตัน)	การเปลี่ยนแปลงของโหนดแสง (ไมโครเมตร) เมื่อใช้ใยแก้วนำแสงชนิดโหนดเดี่ยว	การเปลี่ยนแปลงของโหนดแสง (ไมโครเมตร) เมื่อใช้ใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหนด
1	104 ± 1.91	73 ± 5.16
2	95 ± 1.26	61 ± 7.33
3	99 ± 4.13	36 ± 5.69
4	80 ± 2.59	35 ± 8.14
5	73 ± 2.76	15 ± 7.93

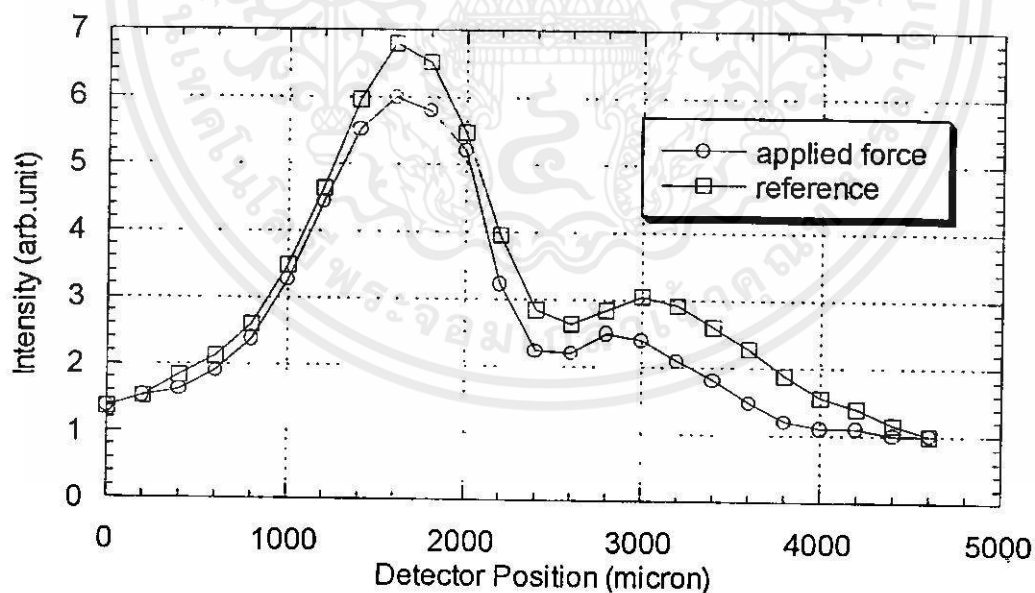


รูปที่ 6.3 แสดงระยะห่างระหว่างโหนดแสงหรือตำแหน่งของอุปกรณ์รับแสง (Detector Position) โดยใช้ใยแก้วนำแสงชนิดโหนดเดี่ยว (SM) เมื่อยังไม่มีแรงกระทำบนเซนซิงยูนิต

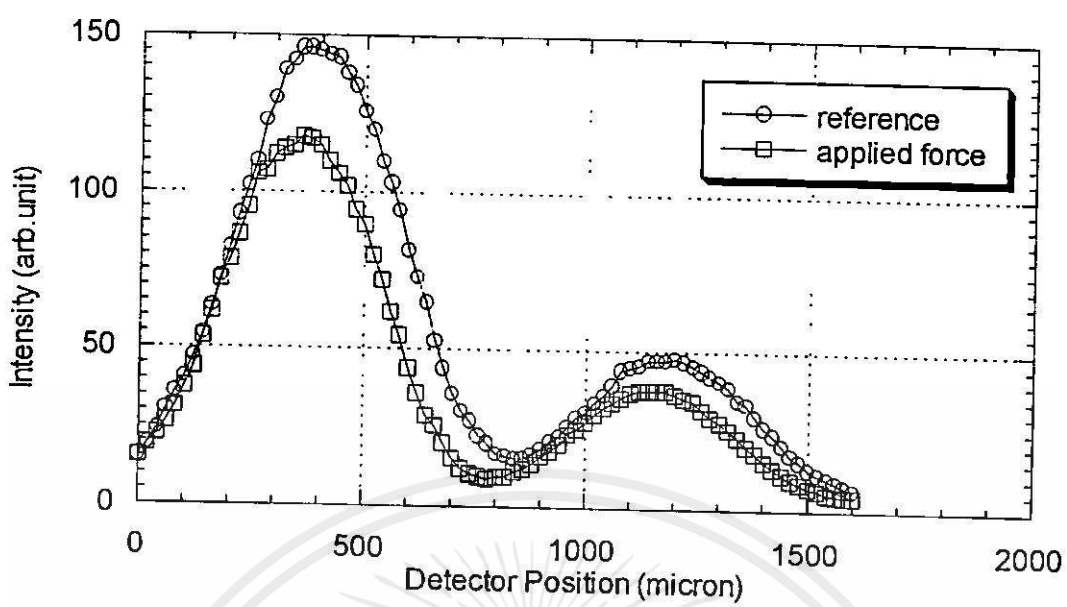
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



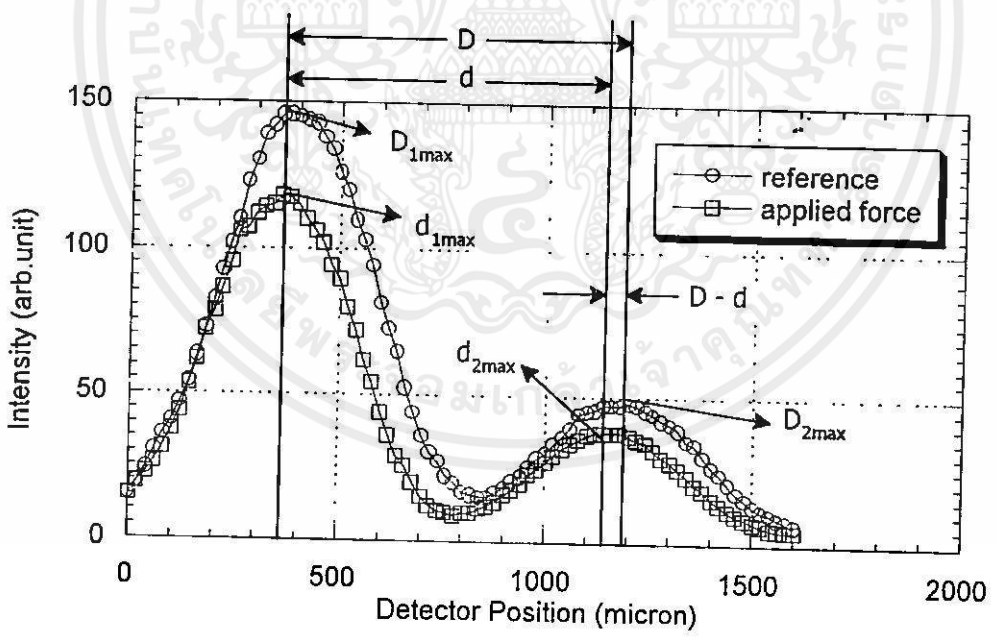
รูปที่ 6.4 แสดงระยะห่างระหว่างโหมดแสงหรือตำแหน่งของอุปกรณ์รับแสง (Detector Position) โดยใช้ใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด (MM)



รูปที่ 6.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงเมื่อใช้แรง (Applied Force) กระทำบนเซนซิงยูนิตนขนาด 5 นิวตันโดยเทียบกับขณะยังไม่มีแรงกระทำ (Reference) เมื่อใช้ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว



รูปที่ 6.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงเมื่อใช้แรงกระทำบนเซนซิงชนิดขนาด 5 นิวตัน โดยเทียบกับขณะยังไม่มีแรงกระทำเมื่อใช้ใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด



เอก รูปที่ 6.7 แสดงวิธีการหาค่าการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง โดยที่ค่า D และ d นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการขจัดกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง

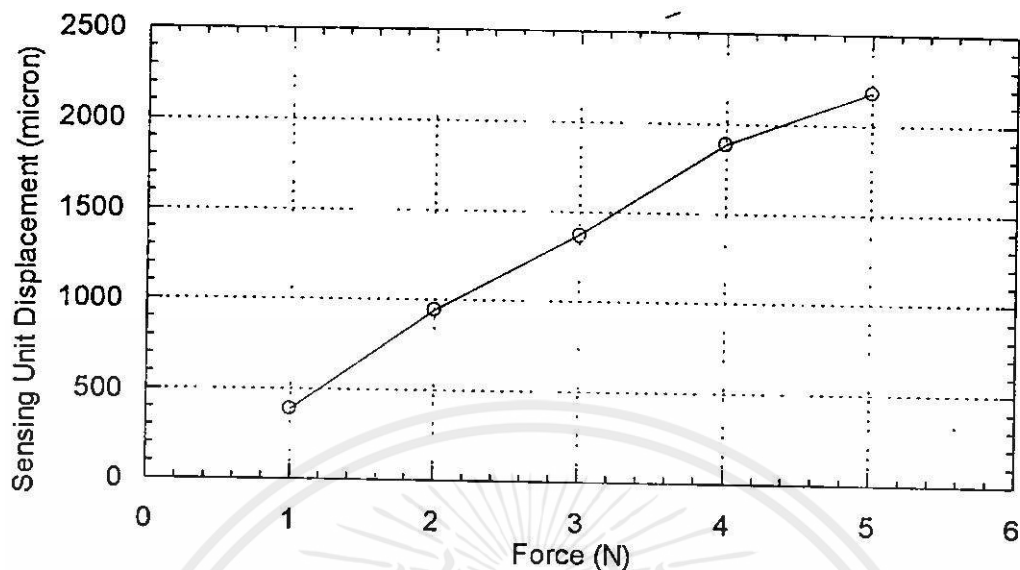
จากผลการทดลองในหัวข้อ 5.2.2.2 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงมีความสัมพันธ์กับแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิตดังรูปที่ 6.2 จากแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิตนี้ทำให้เกิดการขจัดของเซนซิงยูนิตขึ้น ซึ่งพบว่า การขจัดของเซนซิงยูนิตนี้มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงเช่นเดียวกัน

ส่วนผลการทดลองในหัวข้อ 5.2.3.1 ซึ่งเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการขจัดของเซนซิงยูนิต โดยการใช้แรงขนาด 1, 2, 3, 4 และ 5 นิวตันทำให้เกิดการขจัดของเซนซิงยูนิตขึ้น 5 ค่าซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 6.2 และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการขจัดของเซนซิงยูนิตได้ดังรูปที่ 6.8 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่ามีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น โดยค่าคงที่หรือความชันของกราฟนี้คาดว่าน่าจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของใยแก้วนำแสงแต่ละเส้น จากการทดลองใช้ไมโครมิเตอร์ซึ่งจัดให้อยู่ในแนวตั้งกดลงบนเซนซิงยูนิตในระหว่างการขจัดดังตารางที่ 6.2 นั้น พบว่าเมื่อระยะเวลาการขจัดของเซนซิงยูนิตมีค่าเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้การเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงมีค่าลดน้อยลงทำนองเดียวกับการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.9 และตารางที่ 6.3

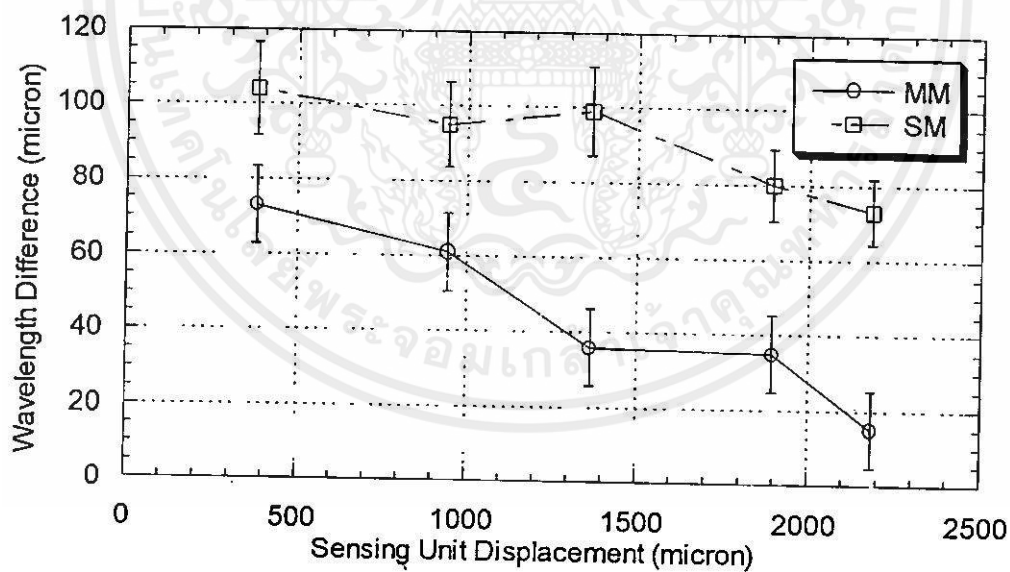
ตารางที่ 6.2 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิตกับการขจัด

แรง (นิวตัน)	การขจัดของเซนซิงยูนิต (ไมโครเมตร)
0	0 ± 10
1	385 ± 10
2	945 ± 10
3	1369 ± 10
4	1886 ± 10
5	2183 ± 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขจัดของเซนซิงยูนิต (Sensing Unit Displacement) กับแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิต



รูปที่ 6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขจัดของเซนซิงยูนิตกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง โดยเปรียบเทียบระหว่างใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว (SM) และหลายโหมด (MM) นำไปใช้

ตารางที่ 6.3 แสดงผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างการขจัดของเซนซิงยูนิตกับการเปลี่ยนแปลงของ โหมดแสง โดยใช้ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวและหลายโหมด

การขจัด (ไมโครเมตร)	การเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง (ไมโครเมตร) เมื่อใช้ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว	การเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง (ไมโครเมตร) เมื่อใช้ใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด
385	104 ± 1.91	73 ± 5.16
945	95 ± 1.26	61 ± 7.33
1369	99 ± 4.13	36 ± 5.69
1886	80 ± 2.59	35 ± 8.14
2183	73 ± 2.76	15 ± 7.93

6.5 ผลการศึกษาเสถียรภาพในการวัดการขจัดเนื่องจากความร้อน

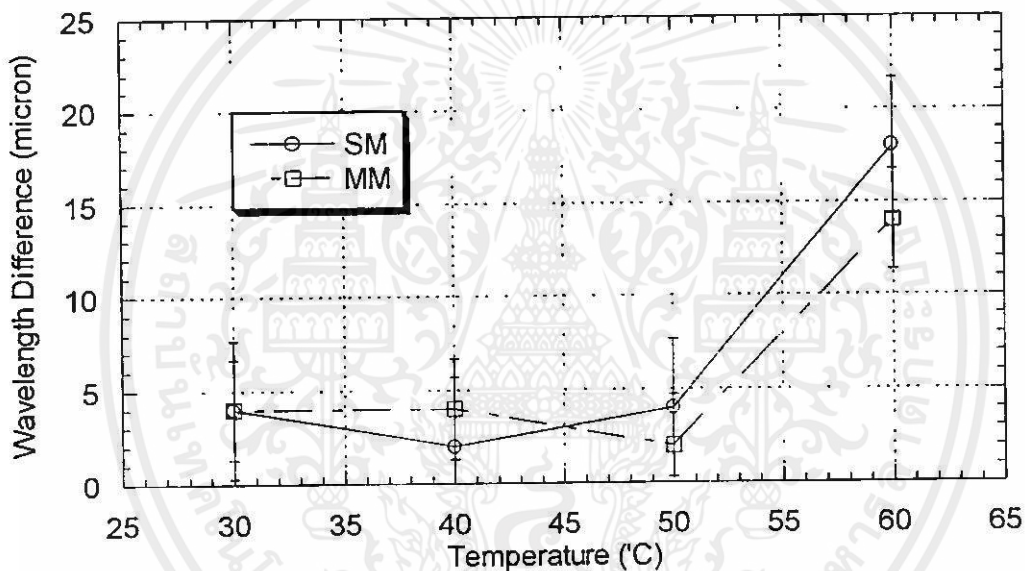
จากการทดลองในหัวข้อ 5.2.2 และ 5.2.3 ทั้งหมดนั้นทำให้ทราบว่า การเปลี่ยนแปลงของ โหมดแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมภายนอกเช่น แรง ที่กระทำต่อเซนซิงยูนิต และการขจัดของเซนซิงยูนิต แต่สิ่งแวดล้อมภายนอกที่สำคัญอีกปริมาณ หนึ่งคือความร้อน โดยในการทดลองได้ศึกษาเสถียรภาพของระบบการวัดการขจัดเนื่องจากความ ร้อนในช่วงอุณหภูมิของประเทศไทยเป็นสำคัญ

จากผลการทดลองตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงโดยใช้ระยะห่างของโหมด แสงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นค่าอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบกับเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่างๆ เช่น 30 , 40 , 50 และ 60 องศาเซลเซียสตามลำดับ พบว่าทั้งใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวและใย แก้วนำแสงชนิดหลายโหมดที่อุณหภูมิช่วง 25 ถึง 50 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงของโหมด แสงมีค่าน้อยมากจนเกือบคงที่แสดงดังตารางที่ 6.4 และรูปที่ 6.10 แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 60 องศาเซลเซียสพบว่าการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงขึ้น 14 ไมโครเมตรเมื่อเทียบกับระยะห่าง ของโหมดแสงอ้างอิงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสสำหรับใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด ในส่วน ของใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 60 องศาเซลเซียสนั้นเกิดการเปลี่ยน แปลงของโหมดแสงประมาณ 10 ไมโครเมตร ดังนั้นในการทดลองนี้จึงสรุปได้ว่าระบบการ ทดลองวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสงมีเสถียรภาพที่ดีในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 50 องศาเซลเซียสในใย แก้วนำแสงทั้งชนิดโหมดเดี่ยวและหลายโหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.4 แสดงผลการทดลองเสถียรภาพของระบบการทดลองเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความร้อน โดยใช้ใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดี่ยว และหลายโหมค

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	การเปลี่ยนแปลงของโหมคแสง (ไมโครเมตร) เมื่อใช้ใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดี่ยว	การเปลี่ยนแปลงของโหมคแสง (ไมโครเมตร) เมื่อใช้ใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมค
30	4 ± 1.05	4 ± 3.24
40	2 ± 1.12	4 ± 2.21
50	4 ± 1.18	2 ± 4.96
60	18 ± 2.98	14 ± 4.54



รูปที่ 6.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงของโหมคแสง โดยเปรียบเทียบระหว่างใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดี่ยว (SM) และหลายโหมค (MM)

6.6 ผลการศึกษาคุณสมบัติการมีอิสระเชิงสถิติของระบบการทดลอง

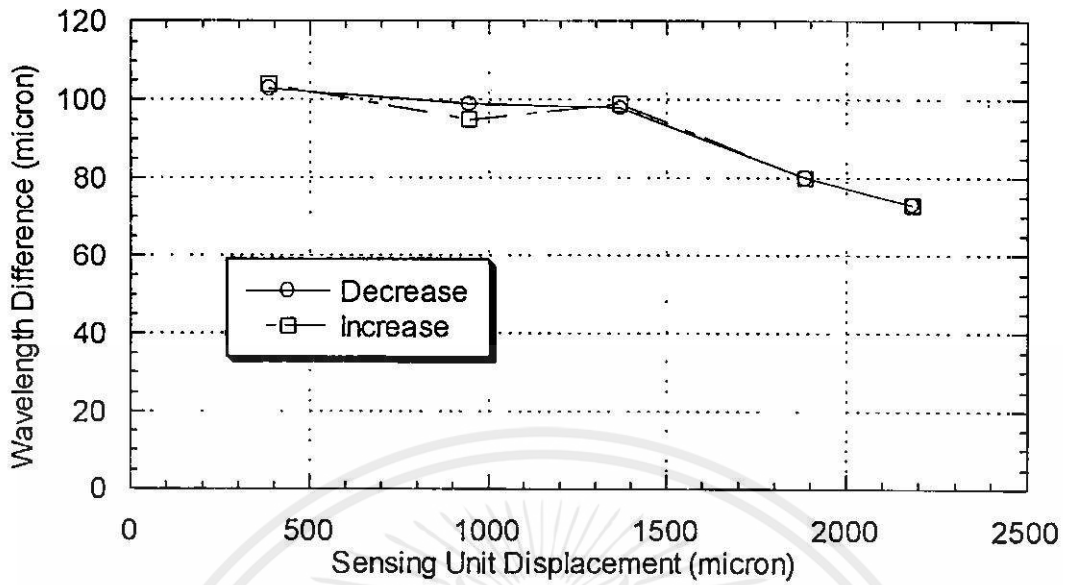
จากการทดลอง 5.2.2, 5.2.3 และ 5.2.4 ซึ่งเป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโหมคแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงเนื่องจากสิ่งแวดล้อมภายนอกกระทำต่อเซนซิงยูนิตคือ แรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิต การขจัดของเซนซิงยูนิตและความร้อน เป็นต้น แต่การศึกษาดังกล่าวได้ทดลองโดยการเพิ่มปริมาณทั้งสามเท่านั้น ซึ่งสังเกตได้จากความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของโหมคแสงดังผลการทดลองในหัวข้อ 6.3, 6.4 และ 6.5 แต่ในการใช้งานจริงนั้นปริมาณทั้งสามที่ตรวจวัดอาจจะไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเพิ่มขึ้นเท่านั้นแต่อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ลดลดลงด้วย

ผลการศึกษาคณสมบัติการมีอิสระรีซิสของระบบการทดลองวัดการขจัดของเซนซิงยูนิคกับการเปลี่ยนแปลงของโหมคแสงพบว่า ทั้งการใช้ใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดี่ยวและหลายโหมคเป็นตัวกลางปรากฏว่า เมื่อมีการเพิ่มและลดระยะการขจัดของเซนซิงยูนิคการเปลี่ยนแปลงของโหมคแสงยังคงมีลักษณะเดิมแสดงดังรูปที่ 6.11 และรูปที่ 6.12 หรือตารางที่ 6.5 และตารางที่ 6.6 เป็นต้น และเนื่องจากการขจัดของเซนซิงยูนิคกับแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิคมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นแสดงได้ดังรูปที่ 6.6 นั้น จึงทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำต่อเซนซิงยูนิคกับการเปลี่ยนแปลงของโหมคแสงมีคุณสมบัติความเป็นอิสระรีซิสเช่นเดียวกันดังตารางแสดงผลการทดลองที่ 6.7 และตารางที่ 6.8 หรือรูปที่ 6.13 และรูปที่ 6.14 ในส่วนของอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงของโหมคแสงนั้นพบว่าที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 45 องศาเซลเซียส ระบบการทดลองจะมีคุณสมบัติการมีอิสระรีซิสแต่ในช่วงอุณหภูมิ 45 ถึง 60 องศาเซลเซียสนั้น ระบบการทดลองมีแนวโน้มที่จะ ไม่มีคุณสมบัติการมีอิสระรีซิสแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 6.9 และตารางที่ 6.10 หรือรูปที่ 6.15 และรูปที่ 6.16

ตารางที่ 6.5 แสดงผลการทดลองการศึกษาคณสมบัติการมีอิสระรีซิสในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดี่ยว

การขจัด (ไมโครเมตร)	การเปลี่ยนแปลงของโหมคแสง (ไมโครเมตร) เมื่อใช้ใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดี่ยว เมื่อเพิ่มการขจัด	การเปลี่ยนแปลงของโหมคแสง (ไมโครเมตร) เมื่อใช้ใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดี่ยว เมื่อลดการขจัด
385	104 ± 1.91	103 ± 2.20
945	95 ± 1.26	99 ± 2.35
1369	99 ± 4.13	98 ± 2.99
1886	80 ± 2.59	80 ± 3.48
2183	73 ± 2.76	73 ± 2.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

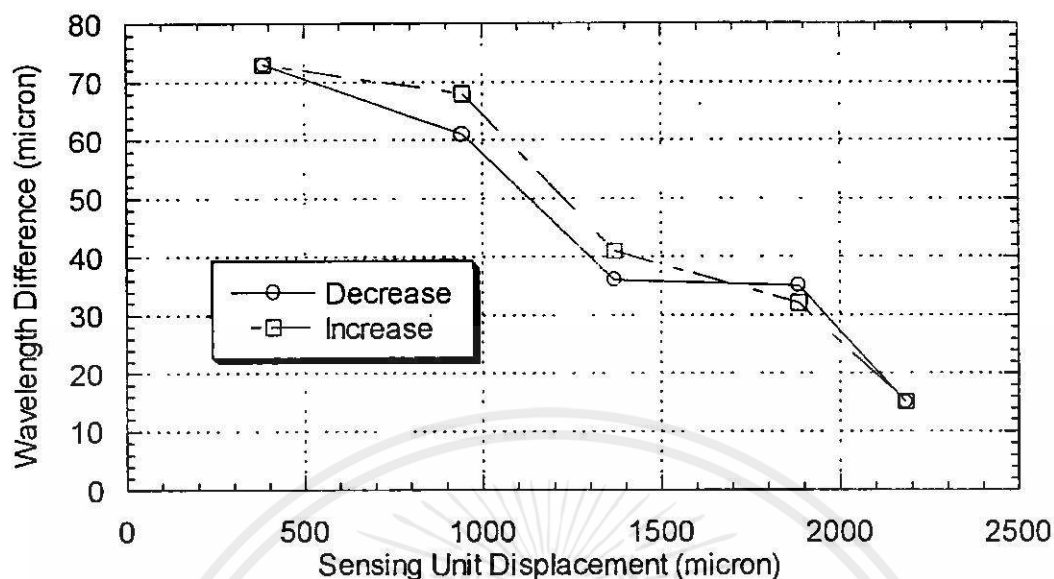


รูปที่ 6.11 แสดงคุณสมบัติการมีฮิสเตอร์ซิสในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดียว
เมื่อ Increase คือการเพิ่มการขจัด และ Decrease คือการลดการขจัด

ตารางที่ 6.6 แสดงผลการทดลองการศึกษาคุณสมบัติการมีฮิสเตอร์ซิสในการวัดการขจัดด้วยใยแก้ว
นำแสงชนิดหลายโหมค

การขจัด (ไมโครเมตร)	การเปลี่ยนแปลงของโหมคแสง (ไมโครเมตร) เมื่อใช้ใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมค เมื่อ เพิ่มการขจัด	การเปลี่ยนแปลงของโหมคแสง (ไมโครเมตร) เมื่อใช้ใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมค เมื่อลด การขจัด
385	73 ± 5.16	73 ± 3.59
945	61 ± 7.33	68 ± 4.70
1369	36 ± 5.69	41 ± 5.20
1886	35 ± 8.14	32 ± 4.82
2183	15 ± 7.93	15 ± 7.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

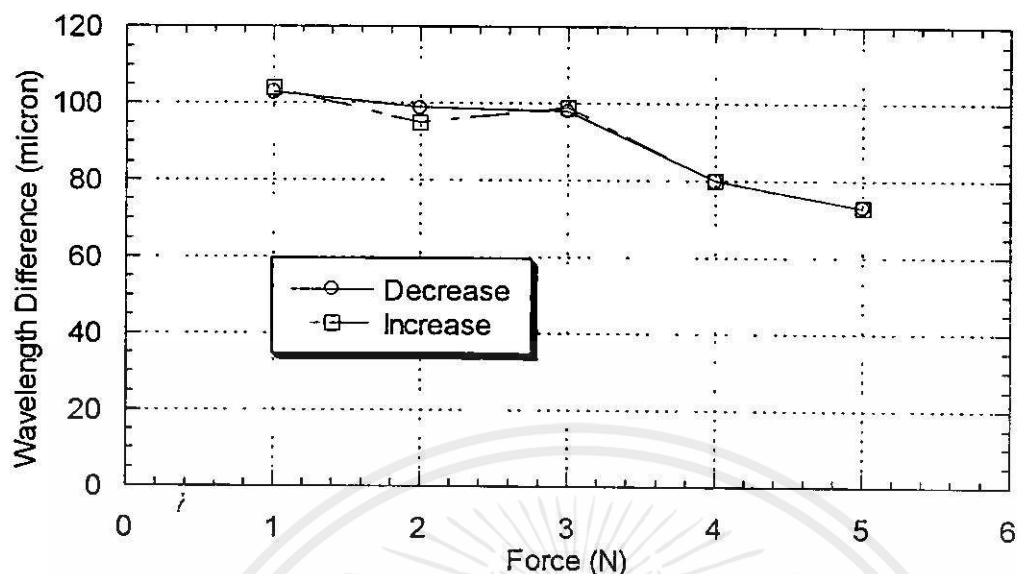


รูปที่ 6.12 แสดงคุณสมบัติการมีฮิสเตอรีซิสในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด เมื่อ Increase คือการเพิ่มการขจัด และ Decrease คือการลดการขจัด

ตารางที่ 6.7 แสดงผลการทดลองการศึกษาคุณสมบัติการมีฮิสเตอรีซิสของแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิคด้วยใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว

แรง (นิวตัน)	การเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง (ไมโครเมตร) เมื่อใช้ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว เมื่อเพิ่มแรง	การเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง (ไมโครเมตร) เมื่อใช้ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว เมื่อลดแรง
1	104 ± 1.91	103 ± 2.20
2	95 ± 1.26	99 ± 2.35
3	99 ± 4.13	98 ± 2.99
4	80 ± 2.59	80 ± 3.48
5	73 ± 2.76	73 ± 2.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

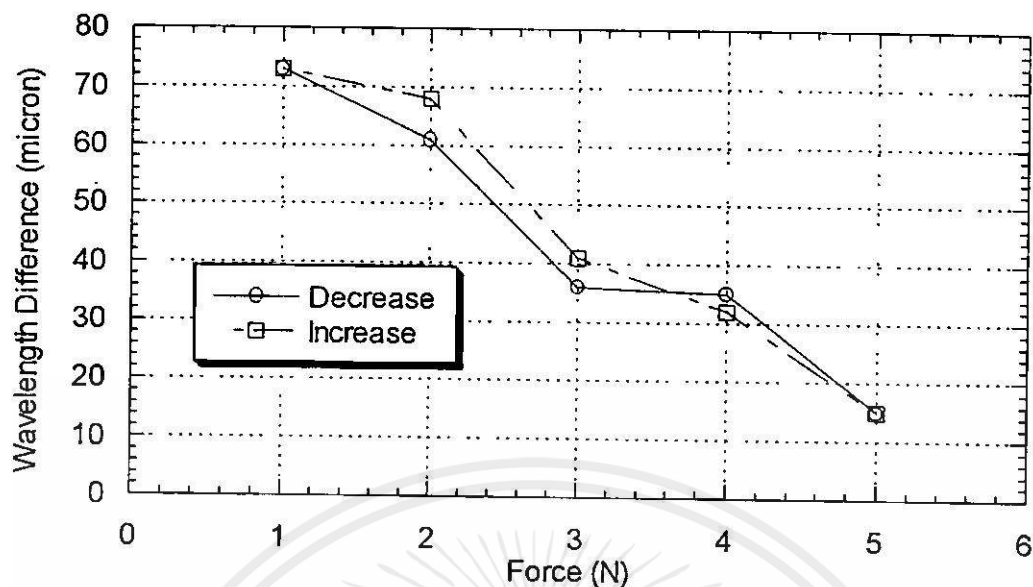


รูปที่ 6.13 แสดงคุณสมบัติการมีฮิสเตอร์ซิสมในการวัดแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิตด้วยใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว เมื่อ Increase คือการเพิ่มแรง และ Decrease คือการลดแรง

ตารางที่ 6.8 แสดงผลการทดลองการศึกษาคุณสมบัติการมีฮิสเตอร์ซิสมของแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิตด้วยใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด

แรง (นิวตัน)	การเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง (ไมโครเมตร) เมื่อใช้ใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด เมื่อเพิ่มแรง	การเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง (ไมโครเมตร) เมื่อใช้ใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด เมื่อลดแรง
1	73 ± 5.16	73 ± 3.59
2	61 ± 7.33	68 ± 4.70
3	36 ± 5.69	41 ± 5.20
4	35 ± 8.14	32 ± 4.82
5	15 ± 7.93	15 ± 7.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

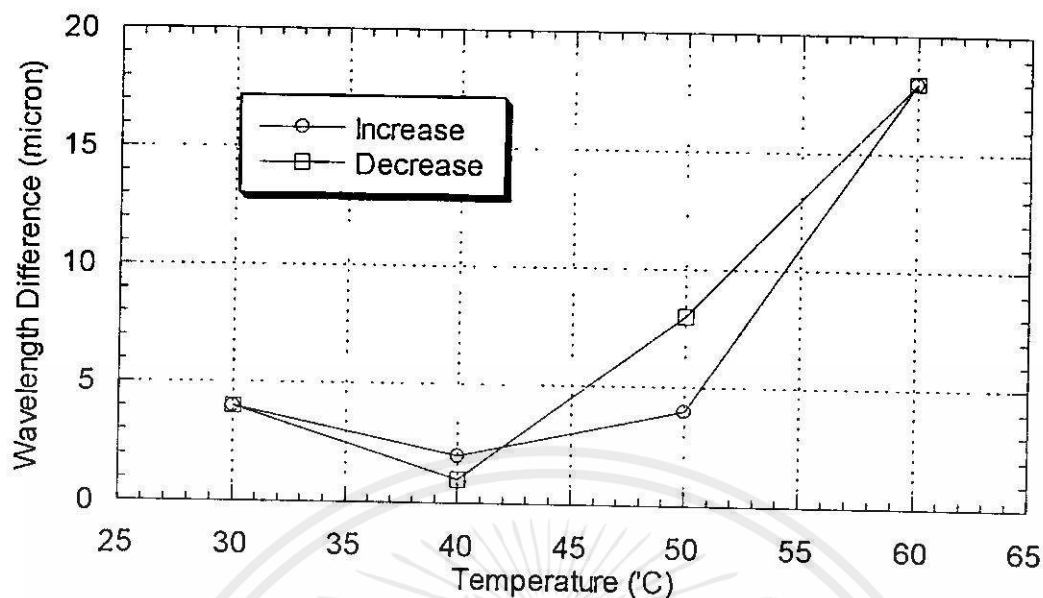


รูปที่ 6.14 แสดงคุณสมบัติการมีฮิสเตอร์ซิสในการวัดแรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิตด้วยใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด เมื่อ Increase คือการเพิ่มแรง และ Decrease คือการลดแรง

ตารางที่ 6.9 แสดงผลการทดลองการศึกษาคุณสมบัติการมีฮิสเตอร์ซิสของอุณหภูมิด้วยใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	การเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง (ไมโครเมตร) เมื่อใช้ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ	การเปลี่ยนแปลงของโหมดแสง (ไมโครเมตร) เมื่อใช้ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว เมื่อลดอุณหภูมิ
30	4 ± 1.05	4 ± 1.86
40	2 ± 1.12	1 ± 1.00
50	4 ± 1.18	8 ± 2.39
60	18 ± 2.98	18 ± 2.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

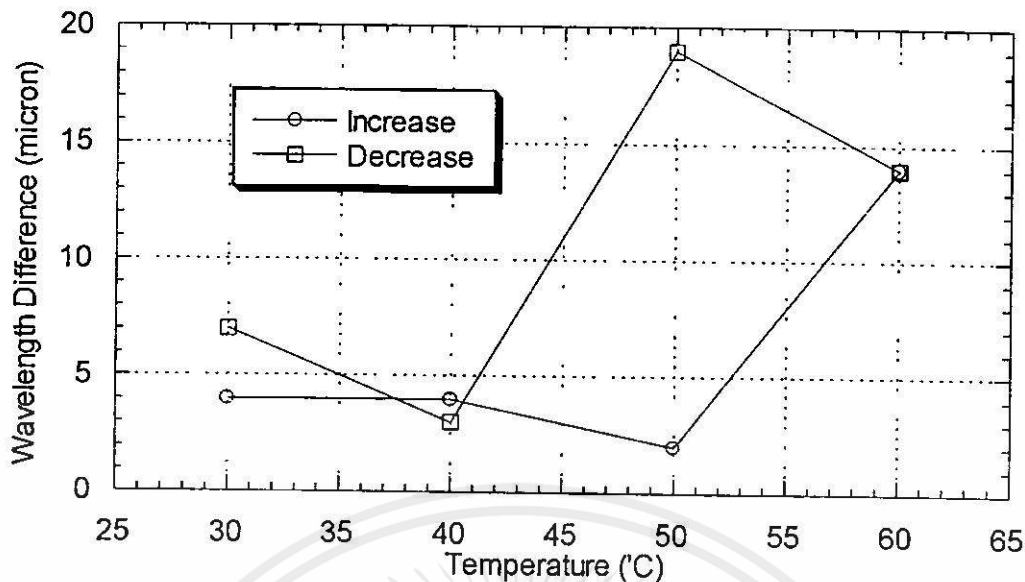


รูปที่ 6.15 แสดงคุณสมบัติการมีฮิสเตอร์ซิซของอุณหภูมิด้วยใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดี่ยว
เมื่อ Increase คือการเพิ่มอุณหภูมิ และ Decrease คือการลดอุณหภูมิ

ตารางที่ 6.10 แสดงผลการทดลองการศึกษาคุณสมบัติการมีฮิสเตอร์ซิซของอุณหภูมิด้วยใยแก้วนำ
แสงชนิดหลายโหมค

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	การเปลี่ยนแปลงของโหมคแสง (ไมโครเมตร) เมื่อใช้ใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมค เมื่อเพิ่ม อุณหภูมิ	การเปลี่ยนแปลงของโหมคแสง (ไมโครเมตร) เมื่อใช้ใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมค เมื่อลด อุณหภูมิ
30	4 ± 3.24	7 ± 2.25
40	4 ± 2.21	3 ± 4.29
50	2 ± 4.96	19 ± 5.30
60	14 ± 4.54	14 ± 4.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.16 แสดงคุณสมบัติการมีอิสระของอุณหภูมิด้วยใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด
เมื่อ Increase คือการเพิ่มอุณหภูมิ และ Decrease คือการลดอุณหภูมิ

6.7 สรุป

จากการทดลองในการศึกษาวิจัยนี้สรุปได้ว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจากสิ่งแวดล้อมภายนอกใยแก้วนำแสง จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงโดยสิ่งแวดล้อมภายนอกจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหสัมพัทธ์ระหว่างแกนและแคลดดิ้งของใยแก้วนำแสงซึ่งจะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงนั่นเอง สำหรับสิ่งแวดล้อมนอกที่กล่าวมาแล้วคือ แรงที่กระทำบนเซนซิงยูนิต การขจัดของเซนซิงยูนิตและความร้อน เป็นต้น โดยพบว่าช่วงของแรงที่สามารถใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาด 1 ถึง 5 นิวตัน มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงการขจัดของเซนซิงยูนิต 0 ถึง 2,183 ไมโครเมตร ซึ่งเมื่อการขจัดมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงมีค่าน้อยลงทั้งใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวและหลายโหมด นอกจากการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงแล้วยังพบอีกว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเอาต์พุตที่มีค่าลดลงเมื่อการขจัดของเซนซิงยูนิตเพิ่มขึ้นอีกด้วย ในส่วนของการศึกษาเสถียรภาพของระบบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสพบว่า ระบบการทดลองมีเสถียรภาพดีในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 45 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงประมาณ 60 องศาเซลเซียสนั้นจะทำให้โหมดแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงเปลี่ยนแปลงไปด้วยซึ่งจะส่งผลต่อการวัดการขจัด จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่างานวิจัยนี้มีความเป็นไปได้ในการนำไปวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสง

บทที่ 7

บทสรุปและแนวทางการพัฒนาต่อไป

7.1 บทสรุป

ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านใยแก้วนำแสงได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วทำให้อุปกรณ์ที่ใช้ใยแก้วนำแสงพัฒนาตามไปด้วยอย่างกว้างขวาง การใช้อุปกรณ์ตรวจวัดที่ทำด้วยใยแก้วนำแสงนี้ก็เป็นการพัฒนาหนึ่งซึ่งเป็นผลมาจากการพัฒนาเทคโนโลยีใยแก้วนำแสง โดยได้นำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณต่างๆ เช่น ความดัน อุณหภูมิ ระดับของของเหลว และความเร่ง เป็นต้น การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสงก็เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดอีกประเภทหนึ่งซึ่งได้มีการพัฒนารูปแบบ และเทคนิคมากขึ้นเพื่อให้กระทัดรัด เที่ยงตรง และมีประสิทธิภาพสูงขึ้นตลอดจนมีราคาถูกลงด้วย ทั้งนี้เพื่อตอบสนองต่อการใช้งานอย่างกว้างขวาง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสง ด้วยหลักการแยกโหมดของแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงด้วยเกรตติงกล่าวคือเมื่อมีการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกต่อใยแก้วนำแสงจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับโหมดแสง สิ่งแวดล้อมภายนอกที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้คือแรงที่กระทำต่อเซนซิงยูนิต การขจัดของเซนซิงยูนิตและการศึกษาเสถียรภาพของระบบการทดลองเนื่องจากความร้อน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสิ่งแวดล้อมภายนอกที่กล่าวมาข้างต้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสง และนอกจากนี้ยังทำการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติการมีฮิสเตอร์ซิสของระบบการทดลอง ซึ่งพบว่าระบบการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสงมีคุณสมบัติการมีฮิสเตอร์ซิส จากผลการทดลองเหล่านี้แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ในการนำไปวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสง

ระบบและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสงประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) ส่วนอินพุตประกอบไปด้วย ซ้อปเปอร์ แล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออน ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ชนิดโพลาไรซ์เชิงเส้น และอุปกรณ์ป้อนแสงเข้าสู่ใยแก้วนำแสงคือเลนส์วัตถุ สำหรับการป้อนแสงเข้าสู่ใยแก้วนำแสงได้ใช้ไมโครบล็อกในการปรับระยะในแนวแกนทั้งสามมิติ จนกระทั่งแสงเกือบทั้งหมดถูกป้อนเข้าสู่ใยแก้วนำแสง

2) ส่วนเซนซิงยูนิตและใยแก้วนำแสง ประกอบไปด้วยใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวและหลายโหมด โดยทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเคลื่อนที่ของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง ในส่วนนี้ยังประกอบไปด้วยเซนซิงยูนิตซึ่งทำหน้าที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงจากสิ่งแวดล้อมภายนอกในที่นี้คือ การขจัด แรง และความร้อน ซึ่งเป็นการศึกษาเสถียรภาพของระบบการทดลองเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ในการวัดอุณหภูมิของ

ส่วนเซนซิงยูนิตนั้นได้ใช้เทอร์โมมิเตอร์ชนิดตัวเลขโดยติดตั้งหัววัดเข้าไปภายในเซนซิงยูนิตซึ่งเจาะช่องไว้แล้ว

3) ส่วนรับแสง ประกอบไปด้วยอุปกรณ์นำแสงออกจากใยแก้วนำแสง เกรตติงชนิดส่งผ่านมีความละเอียด 1,209 เส้นต่อมิลลิเมตร ชุดไมโครมิเตอร์มีความละเอียด 10 ไมโครเมตรใช้สำหรับตรวจวัดการเลื่อนของโหนดของแสงหลังจากถูกแยกด้วยเกรตติงชนิดส่งผ่าน และอุปกรณ์รับแสงที่มีโฟโตไดโอดรุ่น BPW21 ประกอบอยู่ในวงจร ซึ่งสัญญาณที่วัดได้จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับออสซิลโลสโคปเพื่อประมวลผลต่อไป

ปัจจัยที่มีผลต่อการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสงเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ค้นแบบได้สำเร็จคือ

1) การเลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ชนิดโพลาไรซ์เชิงเส้น ซึ่งทำให้เกิดโหนดแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงชนิดโหนดเดียวได้ถึงสองโหนด จึงสามารถนำมาศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโหนดแสงเมื่อได้รับการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่กระทำต่อใยแก้วนำแสงได้

2) การเลือกใช้ระยะห่างระหว่างเกรตติงชนิดส่งผ่านกับอุปกรณ์รับแสงให้เหมาะสมโดยพิจารณาจากความเข้มแสงที่อุปกรณ์รับแสงสามารถตรวจวัดได้และระยะห่างระหว่างโหนดแสงทั้งสองที่ถูกแยกด้วยเกรตติงชนิดส่งผ่าน

3) การเลือกใช้เซนซิงยูนิตที่สร้างขึ้นจากพลาสติกและการออกแบบ ซึ่งมีน้ำหนักไม่มากเกินไปจนทำให้ใยแก้วนำแสงหมดสภาพความโค้งงอ จึงทำให้สามารถวัดการขจัดของเซนซิงยูนิต แรงที่กระทำต่อเซนซิงยูนิต การศึกษาเสถียรภาพของระบบการทดลองเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และการศึกษาคุณสมบัติการมีฮิสเตอร์ซิสของระบบการทดลองได้

4) การเลือกใช้เทคนิคการแยกโหนดแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงด้วยเกรตติงชนิดส่งผ่าน ซึ่งสามารถทำได้สะดวก ประหยัดเวลา และศึกษาผลการทดลองได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังมีระบบการทดลองที่ไม่ซับซ้อน

5) การใช้ไมโครมิเตอร์ซึ่งมีความละเอียด 10 ไมโครเมตรเพื่อทำการเลื่อนตำแหน่งของอุปกรณ์รับแสงในการตรวจวัดโหนดของแสงหลังจากถูกแยกด้วยเกรตติงชนิดส่งผ่าน

6) การเลือกใช้โฟโตไดโอดรุ่น BPW21 ซึ่งมีพื้นที่รับแสงกว้างและตอบสนองต่อแสงสีแดงได้ดีทำให้ลดปัญหาเนื่องจากการสูญเสียสัญญาณขณะทำการป้อนสัญญาณแสงเข้าสู่ภาครับแสงและสามารถป้องกันการรบกวนของสัญญาณแสงจากภายนอกได้เป็นอย่างดี

จากการพิจารณาผลการทดลองทั้งหมด สรุปได้ว่ามีความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสงเนื่องจาก โหนดแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วนำแสงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกคือ การขจัดของเซนซิงยูนิต แรงที่กระทำต่อเซนซิงยูนิตเมื่อใช้ใยแก้วนำแสงชนิดโหนดเดียวและหลายโหนดซึ่งพบสอดคล้องกับทฤษฎี โดยในการวัดการเปลี่ยน

แปลงของโหมคแสงได้เลือกกระยะระหว่างเกรดตติงชนิดส่งผ่านกับอุปกรณ์รับแสงให้มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง สำหรับการศึกษานี้เสถียรภาพของระบบการทดลองเนื่องจากความร้อนนั้นสรุปได้ว่าระบบการทดลองวัดการขจัดมีเสถียรภาพดีในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 50 องศาเซลเซียสเมื่อใช้ใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดี่ยวและหลายโหมค ส่วนการศึกษาคุณสมบัติการมีฮิสเตอร์ซิซของระบบการทดลองสรุปได้ว่าระบบการทดลองมีคุณสมบัติการมีฮิสเตอร์ซิซในการวัดการขจัดของเซนซิงยูนิต และแรงที่กระทำต่อเซนซิงยูนิต แต่ในการศึกษาคุณสมบัติการมีฮิสเตอร์ซิซของระบบการทดลองเนื่องจากอุณหภูมิพบว่ามีความสัมพันธ์ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 25 ถึง 50 องศาเซลเซียสในใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดี่ยวและหลายโหมค

7.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสง ในการทดลองเพื่อศึกษานั้นต้องนำอุปกรณ์ทางแสงและอุปกรณ์อื่นๆ ประกอบขึ้นเป็นระบบการทดลอง การศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสง ซึ่งปัญหาที่พบในส่วนของอุปกรณ์นี้คือ อุปกรณ์ทางแสงมีราคาค่อนข้างสูงเนื่องจากเทคโนโลยีทางด้านใยแก้วนำแสงและอุปกรณ์ตรวจวัดด้วยใยแก้วนำแสงภายในประเทศยังมีขอบเขตจำกัด จึงทำให้อุปกรณ์ต่างๆ มีราคาแพงมีผลทำให้การเลือกใช้อุปกรณ์ในการทดลองยังมีขอบเขตจำกัดตามไปด้วย ซึ่งต้องใช้อุปกรณ์อื่นๆ ที่สามารถใช้ทดแทนกันได้หรือเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับความต้องการมาทดแทน เช่น การเลือกใช้เลนส์วัตถุสำหรับนำแสงเข้าสู่ใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดี่ยวซึ่งมีค่านิวเมอริคัลอะเพอเจอร์เท่ากับ 0.25 แทนเลนส์วัตถุที่มีค่านิวเมอริคัลอะเพอเจอร์เท่ากับ 0.11 เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าในการสร้างเซนซิงยูนิตยังพบปัญหาไม่สามารถควบคุมการเลื่อนไปมาได้ลักษณะได้รับการกดด้วยไมโครมิเตอร์เป็นระยะการขจัดต่างๆ เนื่องจากเซนซิงยูนิตที่ใช้สร้างขึ้นจากการประกอบอุปกรณ์จากหลายแหล่งผลิตเข้าด้วยกัน นอกจากนี้ในระบบการทดลองการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดนี้สัญญาณทางแสงที่ตรวจวัดได้มีขนาดเล็กมากในระดับมิลลิโวลต์ซึ่งพบว่าในห้องปฏิบัติการวิจัยไม่ได้ต่อสายดินเข้ากับตัวอาคารทำให้มีสัญญาณรบกวนจึงมีผลต่อการตรวจวัดโหมคของแสงได้ ซึ่งเป็นขอบเขตจำกัดอันเนื่องมาจากการออกแบบตัวอาคาร ดังนั้นระบบการทดลองศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดดังกล่าวนี้ จึงใช้ได้สำหรับกรณีของการศึกษาเท่านั้นยังไม่สามารถนำไปทำการตรวจวัดได้อย่างสมบูรณ์

7.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป

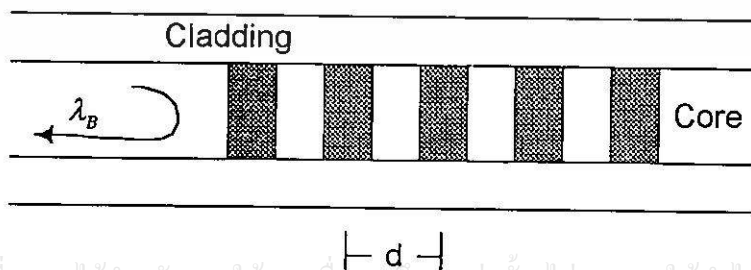
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดการขจัดด้วยใยแก้วนำแสงที่ได้เสนอไปแล้วยังมีข้อเสนอนะแนวทางเพื่อทำการปรับปรุงและพัฒนาดังต่อไปนี้คือ

ประการแรก ต้องปรับปรุงส่วนเซนซิงยูนิทให้มีประสิทธิภาพและความถูกต้องให้สูงขึ้นกว่านี้โดยเพิ่มอุปกรณ์บังคับทิศทางของเซนซิงยูนิทขณะกดด้วยไมโครมิเตอร์และแรงขนาดต่างๆ เพื่อป้องกันการเลื่อนไปมาขณะทำการทดลอง นอกจากนี้ในส่วนของการครีเอทีฟไอแคว้นาแสงที่บริเวณส่วนหัวและท้ายของเซนซิงยูนิทควรมีการออกแบบให้ครีเอทีฟไอแคว้นาแสงได้ดีกว่านี้เพื่อให้การกดเซนซิงยูนิทด้วยไมโครมิเตอร์มีความแน่นอนสมำเสมอ สำหรับความสามารถในการวัดช่วงของการขจัดและช่วงของแรงให้สามารถวัดการขจัดและแรงได้ในช่วงที่กว้างกว่านี้ควรออกแบบส่วนเซนซิงยูนิทให้มีน้ำหนักลดน้อยลงและอาจจะเพิ่มจำนวนของการโค้งงอให้กับเซนซิงยูนิทซึ่งจะมีผลทำให้โหมดแสงที่เคลื่อนที่ในไอแคว้นาแสงถูกรบกวนมากขึ้นนั่นเอง

ประการที่สอง ควรเลือกใช้เกรตติงชนิดส่งผ่านที่มีกำลังแยกของเกรตติงสูงๆ เพื่อให้การตรวจวัดโหมดของแสงหลังจากถูกแยกด้วยเกรตติงชนิดส่งผ่านเมื่อเซนซิงยูนิทถูกกดด้วยการขจัดและแรงขนาดต่างๆ ได้ง่ายขึ้น หรือประยุกต์ระบบการทดลองใหม่โดยอาศัยหลักการเดิมกล่าวคือใช้ไอแคว้นาแสงเกรตติง (Fiber Grating) [17] , [18] มาแทนไอแคว้นาแสงชนิดโหมดเดี่ยวและหลายโหมดซึ่งลักษณะของไอแคว้นาแสงเกรตติงแสดงดังรูปที่ 7.1 โดยบริเวณแกนจะถูกสร้างให้มีดัชนีหักเหแสงแตกต่างกันเป็นคาบ (Period, d) ทำให้มีลักษณะเหมือนเกรตติง เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดความยาวคลื่นต่างๆ เคลื่อนที่ผ่านบริเวณเกรตติงจะเกิดการเลี้ยวเบน โดยความยาวคลื่นที่เลี้ยวเบนนี้เป็นไปตามสมการต่อไปนี้คือ

$$\lambda_B = 2n_m d \quad (7.1)$$

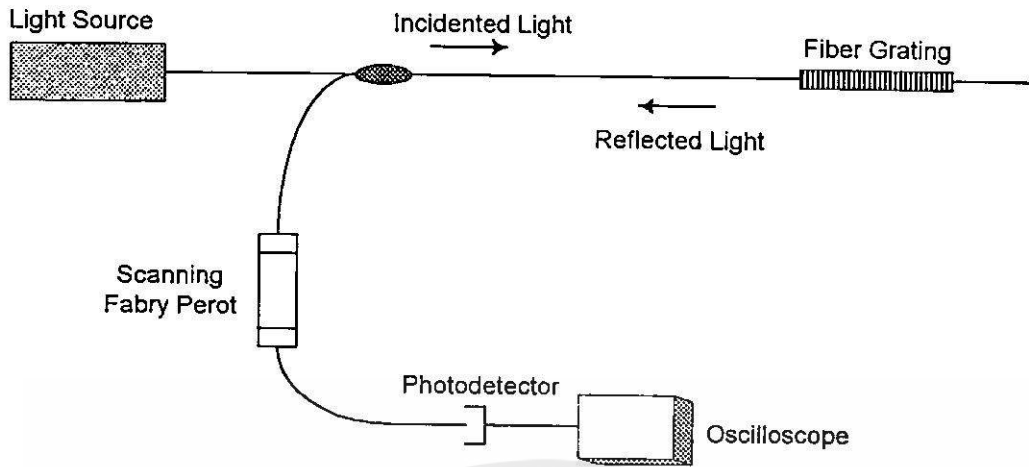
เมื่อ λ_B คือความยาวคลื่นของแบร์ริก (Bragg) n_m คือดัชนีหักเหแสงเฉลี่ยบริเวณแกน และ d คือคาบของเกรตติง จากสมการ (7.1) นี้แสดงให้เห็นว่าความยาวคลื่นที่เลี้ยวเบนจะสัมพันธ์กับคาบของเกรตติงและดัชนีหักเหแสง ดังนั้นแนวทางการพัฒนาต่อไปสามารถจัดระบบการทดลองใหม่ดังรูปที่ 7.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7.1 แสดงลักษณะของไอแคว้นาแสงเกรตติงเมื่อบริเวณแกนถูกสร้างขึ้นให้มีดัชนีหักเหแสง

แตกต่างกันเป็นคาบ d



รูปที่ 7.2 แสดงลักษณะระบบการทดลองเพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาต่อไป โดย Light Source คือ แหล่งกำเนิดแสง Incident Light คือแสงตกกระทบกับใยแก้วนำแสงเกรตติง (Fiber Grating) Reflected Light คือแสงที่เลี้ยวเบนจากเกรตติงที่สอดคล้องกับสมการ (7.1) และถูกตรวจวัดด้วยเฟบริเพอโรต์อินเตอร์เฟอริมิเตอร์ Photodetector คืออุปกรณ์รับแสง และแสดงผลด้วยออสซิลโลสโคป

จากรูปที่ 7.2 เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดถูกป้อนเข้าสู่ใยแก้วนำแสงเกรตติงซึ่งแสงความยาวคลื่นต่างๆ ที่เคลื่อนที่ไปนั้น เมื่อถึงบริเวณเกรตติงแสงความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับสมการ (7.1) เท่านั้นจะเลี้ยวเบนผ่านคู่ควมและตรวจวัดด้วยเฟบริเพอโรต์อินเตอร์เฟอริมิเตอร์ (Fabry-Perot Interferometer) ซึ่งจะใช้เป็นค่าอ้างอิง เมื่อใยแก้วนำแสงเกรตติงถูกสิ่งแวดล้อมภายนอกกระทบจน การขยายตัวของโลหะของสะพาน แรง และความร้อน เป็นต้น [19] มีผลทำให้คาบของเกรตติงหรือดัชนีหักเหแสงเปลี่ยนแปลงไปผลที่เกิดขึ้นคือความยาวคลื่นแสงที่เลี้ยวเบนเปลี่ยนแปลงไปด้วย ความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปนี้เมื่อนำมาเทียบกับค่าอ้างอิงทำให้หาความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งแวดล้อมนอกกับความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปได้ เนื่องจากการใช้ใยแก้วนำแสงเกรตติงนี้เองแนวทางการพัฒนาต่อไปอีกประการหนึ่งที่น่าจะศึกษาคือเรื่องการตรวจวัดระยะไกล (Remote Sensing) ด้วยใยแก้วนำแสงเกรตติงซึ่งผู้ตรวจวัดไม่จำเป็นต้องอยู่บริเวณที่ทำการวัดเพียงแต่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นอยู่ภายในห้องปฏิบัติการได้

ประการสุดท้าย งานวิจัยนี้ยังสามารถจำลองแบบ (Simulation) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ อีกทางหนึ่งโดยอาศัยการแปลงฟูริเยร์ (Fourier Transform) [20] ของแต่ละอุปกรณ์ในระบบการทดลอง โดยเริ่มจากสนามไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดเลเซอร์สี่เหลี่ยมที่ผ่านเลนส์โดยอาศัยฟังก์ชันของเลนส์ตามทฤษฎีทางแสง เมื่อสนามไฟฟ้าเคลื่อนที่ภายในใยแก้วนำแสงจะสามารถทราบลักษณะของสนามไฟฟ้าได้จากบทที่ 3 ระหว่างการเคลื่อนที่ภายในใยแก้วนำแสงนี้โหมดแสง

จะถูกรบกวนด้วยสิ่งแวดล้อมภายนอกซึ่งทำให้ดัชนีหักเหแสงเปลี่ยนแปลงไป ในการจำลองแบบ อาจทดลองกำหนดความแตกต่างดัชนีหักเหแสงค่าต่างๆ มีผลทำให้โหมดแสงเปลี่ยนแปลงไป เมื่อทำการจำลองแบบเช่นเดียวกันนี้จนครบทุกอุปกรณ์ซึ่งผลลัพธ์ของการจำลองแบบก็คือผลคูณของฟังก์ชันสนามไฟฟ้าและอุปกรณ์ต่างๆ ตามลำดับทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงโหมดแสงเมื่อมีสิ่งแวดล้อมมารบกวนต่อใยแก้วนำแสงได้

เทคโนโลยีทางด้านใยแก้วนำแสง อุปกรณ์ใยแก้วนำแสง และอุปกรณ์ตรวจวัดด้วยใยแก้วนำแสงนับวันจะมีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น ดังนั้น จึงต้องมีการพัฒนาและศึกษาค้นคว้าแนวคิดใหม่ในการทำเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดต่อไป รวมทั้งเผยแพร่ความรู้ และเทคโนโลยีด้านนี้ให้เป็นที่รู้จักกันแพร่หลายและสามารถนำมาใช้งานได้มีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งต้องมีการส่งเสริมให้มีการวิจัยและพัฒนาเพื่อผลิตขึ้นใช้เองได้ภายในประเทศ ซึ่งผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นแนวทางที่ดีต่อการพัฒนาเทคโนโลยีด้านการตรวจวัดด้วยใยแก้วนำแสงดังกล่าวให้เกิดขึ้นภายในประเทศในเวลาอันใกล้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] P.V.P Yupapin and S. Kusamran. "Photoelastic Material Characteristics Base On the Stress Induced Effect for Sensor Applications." *Smart Material Structure*. vol. 2, 1993. pp. 157-161.
- [2] P.V.P Yupapin, K. Weir, K.T.V. Grattan and A.W. Palmer. "An Optical Pressure Sensor Using a Low-Coherence Light Source with a Photoelastic Sensing Element." *Sensor and Actuators A*. vol. 36, 1993. pp. 105-111.
- [3] Y.N. Ning, K.T.V. Grattan, B.T. Meggitt and A.W. Palmer. "Characteristics of Laser Diodes for Interferometric Use." *Appl. Opt.* vol. 22, 1989. pp. 3657-3681.
- [4] D.N. Wang, Y.N. Ning, A.W. Palmer, K.T.V. Grattan and K. Weir. "An Alternative to White Light Interometric Sensing." *J. Lightwave Technol.* vol. 13, May 1995. pp. 961-966.
- [5] P.V.P. Yupapin, K. Weir, K.T.V. Grattan and A.W. Palmer. "A Study of Polarization Maintaining Fiber Characteristics with Applications to Force and Displacement Sensing" *J. Laser Applications*. vol. 7, 1995. pp. 89-97.
- [6] K. Weir, A.W. Palmer and K.T.V. Grattan. "Accurate Measurement of Small Displacement Using Optical Technologies." *Int. J. Optoelectronics*. vol. 9, no. 6, 1994. pp. 449-455.
- [7] Gerd Keiser. **Optical Fiber Communications**. second edition. New York : McGraw-Hill. 1992.
- [8] Raymond A. Serway. **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics**. third edition. United States of America : Saunder College Publishing. 1992.
- [9] Pedrotti, F.L. and L.S. Pedrotti. **Introduction to Optics**. second edition. Prentice Hall. 1993.
- [10] Einarsson, G.H. **Principles of Lightwave Communication**. England : John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [11] Newport Corporation. **Projects in Fiber Optics Applications Handbook**. CA : Newport Corporation. 1986.
- [12] W.V. Etten and J.V.D. Plaats. **Fundamentals of Optical Fiber Communications**. first edition. London : Prentice Hall. 1991.
- [13] E. Udd. **Fiber Optics Smart Structures**. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1995.

- [14] John Hawkes and Ian Latimer. **Lasers Theory and Practice**. first edition. London : Prentice Hall. 1989.
- [15] J. Wilson and J.F.B. Hawkes. **Optoelectronics an Introduction**. second edition. London : Prentice Hall. 1989.
- [16] Christopher Palmer. **Diffraction Grating Handbook**. third edition. New York : Richardson Grating Laboratory. 2000.
- [17] Andreas Othonos. "Fiber Bragg Gratings" *Rev. Sci. Instrum.* vol. 68, no. 12, December 1997. pp. 4309-4341.
- [18] Kenneth O. Hill and Gerald Meltz. "Fiber Bragg Grating Technology : Fundamentals and Overview." *J. Lightwave Technology*. vol. 15, no. 8, August 1997. pp. 1263-1276.
- [19] A.D. Kersey, Michael A. Davis, Heather J. Patrick, Michel LeBlans and K.P. Koo. "Fiber Grating Sensors." *J. Lightwave Technology*. vol. 15, no. 8, August 1997. pp. 1442-1462.
- [20] Anthony Vanderlugt. **Optical Signal Processing**. first edition. Canada : John Wiley & Sons, Inc., 1992.

ภาคผนวก ก.

แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลเซอร์ฮีเลียมนีออน

การหาแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงก็คือ ความเข้มของแสงต้องมีกำลังที่เหมาะสมเพื่อสามารถที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ได้ ความยาวคลื่นแสงที่ให้ออกมา รวมถึงเสถียรภาพในการใช้งานต้องดีพอควรซึ่งข้อมูลต่างๆ ของฮีเลียมนีออนเลเซอร์ที่ใช้มีดังต่อไปนี้

ข้อมูลจำเพาะของเลเซอร์ฮีเลียมนีออน

Laser Type :	Helium Neon
Class Laser :	II
Minimum Output :	0.5 <i>mV</i>
Wavelength :	632.8 <i>nm</i>
Beam Diameter :	0.48 <i>mm</i>
Beam Divergence :	1.70 <i>mrad</i>
Beam Pointing Stability :	< 0.10 <i>mrad</i> (25°)
Polarization :	linear (500:1)
Operating Current :	82 <i>mA</i>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

อุปกรณ์รับแสงพินโพโตไดโอด



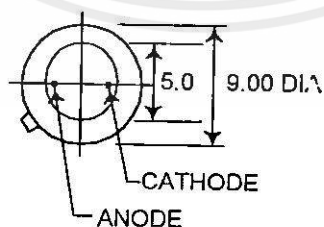
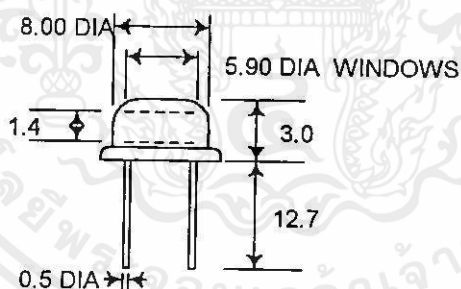
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BPW 21 พินโฟโตไดโอด

การเลือกใช้พินโฟโตไดโอดสำหรับงานวิจัยนี้ประการแรกต้องคำนึงถึงก็คือช่วงความยาวคลื่นที่ตอบสนองจะต้องมีความสัมพันธ์กับแหล่งกำเนิดแสงที่นำมาใช้งาน ตัวอย่างของข้อกำหนดทางเทคนิคสามารถดูได้จากข้อมูลด้านล่างดังนี้

ข้อมูลจำเพาะของพินโฟโตไดโอด รุ่น BPW 21

Peak spectral response :	560 nm
Wavelength range :	460-750 nm
Power dissipation :	250 mW max.
Sensivity (short circuit) :	7 nA/lux
Open circuit Volts (E = 1 k lux) :	280 mV
Dark current ($V_R = 5 V$) :	2 nA
Rise time ($I = 100 \mu A, R_L = 1 k$) :	3.5 μS
Junction capacitance ($V_R = 5 V$) :	170 pF



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์แสดงลักษณะรูปร่างของพินโฟโตไดโอด BPW 21 ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

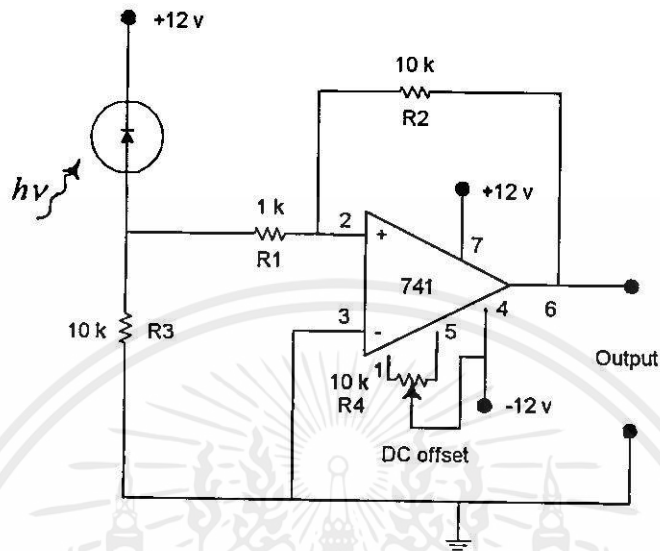
ภาคผนวก ก.

วงจรถิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในภาคผนวก ค. นี้จะกล่าวถึงวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ซึ่งก็คือวงจรรับสัญญาณแสงเพื่อทำหน้าที่ขยายสัญญาณแสงขนาดเล็กจากใยแก้วนำแสง โดยมีลักษณะดังนี้



วงจรรับสัญญาณแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในภาคผนวก ง. นี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ กล่าวคือเป็นงานวิจัยเรื่องอุปกรณ์อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดโดยการใช้อุปกรณ์รับแสงและเกรตติงเลี้ยวเบน (Optical Strain Sensor Using Position-Sensitive Detector and Diffraction Grating : Error Analysis) ซึ่งได้ตีพิมพ์ในวารสาร Optical Engineering ฉบับเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2543 หน้าที่ 1645 - 1651 โดยงานวิจัยนี้มีหลักการคือเมื่อนำเกรตติงติดกับชิ้นงานที่จะทำการตรวจวัดความเครียดและลำแสงเลเซอร์สีเลียมนีออนตกกระทบกับเกรตติง เมื่อชิ้นงานถูกทำให้เกิดความเครียดขึ้นจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงโดยในงานวิจัยนี้ทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงในอันดับการเลี้ยวเบนที่ 1 ด้วยอุปกรณ์รับแสงที่มีความไวสูงทำให้หาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงของโหมดแสงได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายสมน เพียงบางยาง เกิดเมื่อวันที่ 9 กันยายน 2518 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ วิทยาเขตประสาน มิตร เมื่อปีการศึกษา 2540 เข้าศึกษาต่อในระดับวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปีการศึกษา 2540



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้