



อินเทอร์เฟอริมิเตอร์ชนิดออปติกส์สำหรับการประยุกต์ด้านอุปกรณ์ตรวจวัด

SHORT COHERENCE INTERFEROMETER FOR SENSOR APPLICATIONS



ภูเบศร์ พิพิทธีรณการ

PHUBET PHIPHITHIRANKARN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

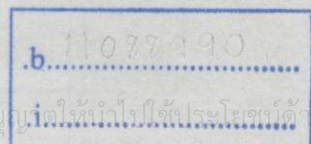
พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-327-7

เลขหมู่.....

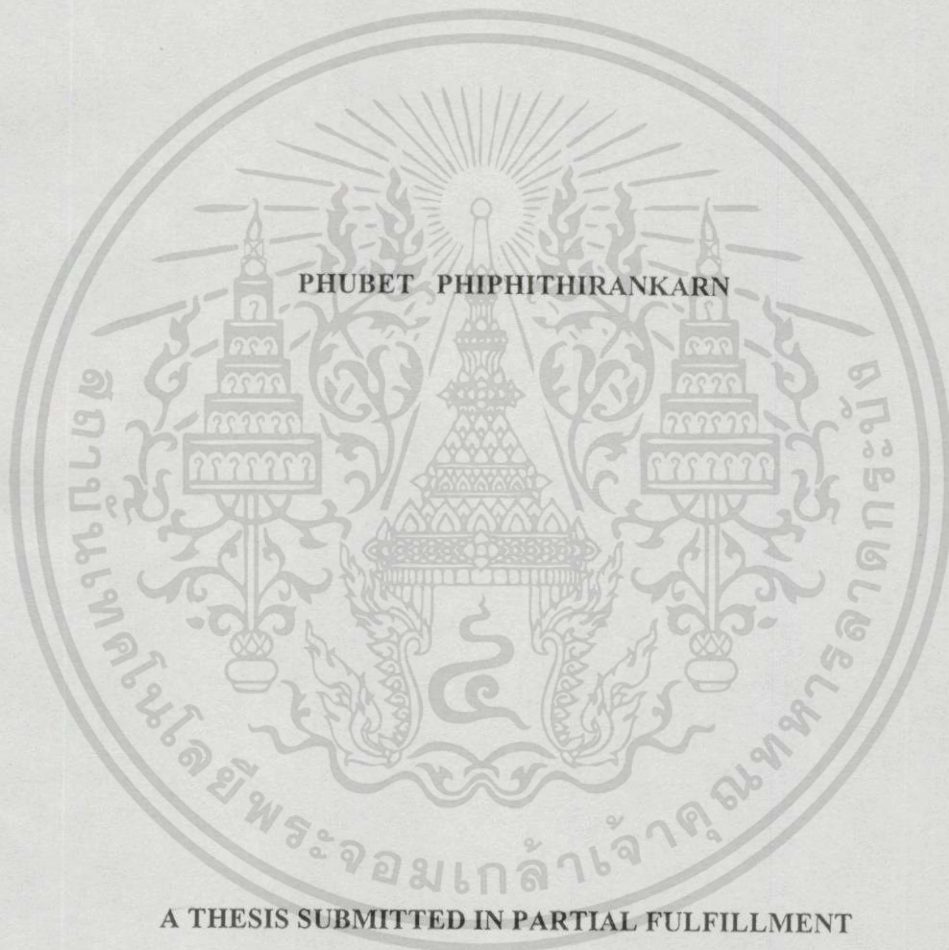
เลขทะเบียน 40118

วัน, เดือน, ปี 16 ส.ค. 2544



สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SHORT COHERENCE INTERFEROMETER FOR SENSOR APPLICATIONS**



**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**

**2001**

**ISBN 974-648-327-7**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2001**

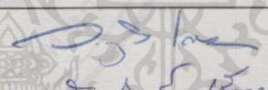
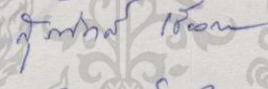
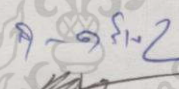
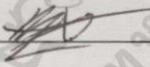
**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ อินเทอร์เน็ตโรมิเตอร์ชนิดออปติคัลสำหรับการประยุกต์ด้านอุปกรณ์  
ตรวจวัด  
SHORT COHERENCE INTERFEROMETER FOR SENSOR  
APPLICATIONS  
ชื่อนักศึกษา นายภูเบศร์ พิพิธหิรัญการ  
รหัสประจำตัว 40065007  
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์  
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | ลายมือชื่อ   |
|--------------------------|--|
| ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาถัดดา   |  |
| ดร.สุรศักดิ์ เชียงกา     |  |
| รศ.สุวรรณ คูสำราญ        |  |
| รศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน      |  |

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 13 มิถุนายน 2544 เวลา 14.00 น. เป็นต้นไป  
สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬารามวลย์ลักษณะ ชั้น 3 ห้อง 307

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว  
(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัครชู)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
วันที่ ๑๑ เดือน มิถุนายน พ.ศ. ๒๕๔๔

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

อินเตอร์ฟิรอมิเตอร์ชนิดออปติคัลสำหรับการประยุกต์  
ด้านอุปกรณ์ตรวจวัด

นักศึกษา

นายภูเบศร์ พิพิธธีรฤการ

รหัสประจำตัว

40065007

ปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

พ.ศ.

2544

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ. ดร. ปรีชา ยูพาพิน

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและประยุกต์ใช้ไมเคิลสันอินเตอร์ฟิรอมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดโดยมีเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตรเป็นแหล่งกำเนิดแสง จากหลักการแทรกสอดชนิดแบ่งแอมพลิจูดของไมเคิลสันอินเตอร์ฟิรอมิเตอร์จะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างทางเดินของแสงหรือความเข้มแสงกับปริมาณที่ต้องการตรวจวัด เนื่องจากเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่ใช้ให้แสงที่มีความยาวอาพันธ์ยาวซึ่งไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงในระบบตรวจวัดอย่างละเอียด ดังนั้นจึงอาศัยเทคนิคการสแกนเบ็ดโหมคโดยจัดให้แสงเลเซอร์เดินทางในใยแก้วนำแสงหลายโหมคชนิดสเตปอินเด็กซ์ความยาวค่าหนึ่ง จะทำให้แสงเอาต์พุตมีความยาวอาพันธ์สั้นลง เมื่อหาความยาวที่เหมาะสมของใยแก้วนำแสงจะได้แสงเลเซอร์ที่มีความยาวอาพันธ์เหมาะสมที่จะใช้เป็นแสงอินพุตให้กับไมเคิลสันอินเตอร์ฟิรอมิเตอร์สำหรับการตรวจวัดอย่างละเอียดต่อไป จากผลการทดลองพบว่าความยาวที่เหมาะสมของใยแก้วนำแสงที่ใช้คือ 1 เมตร ซึ่งจะให้ความยาวอาพันธ์ของแสงลดลง 40.86 % นอกจากนี้ในงานวิจัยยังได้ประยุกต์ใช้ไมเคิลสันอินเตอร์ฟิรอมิเตอร์ศึกษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นทางแสงของวัสดุโพร่งใสและศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรง โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างทางเดินของแสงกับแรงที่กระทำกับวัสดุ

|                       |  |
|-----------------------|--|
| <b>Thesis Title</b>   | Short Coherence Interferometer for Sensor Applications |
| <b>Student</b>        | Mr. Phubet Phiphithirankarn                            |
| <b>Student ID.</b>    | 40065007   |
| <b>Degree</b>         | Master for Science                                     |
| <b>Programme</b>      | Applied Physics  |
| <b>Year</b>           | 2001   |
| <b>Thesis Advisor</b> | Assoc. Prof. Dr. Preecha Yupapin                       |

### ABSTRACT

This work is the study of conventional Michelson interferometer that the high precision measurement of displacement and force sensor application can be realized. The principle of the system using a highly coherent light beam from a linearly polarized single mode He-Ne laser, with wavelength of 632.8 nm is proposed. The interference fringe pattern of the conventional interferometer is changed by optical path difference (OPD) of two coherent beams or physical parameters that are measured. He-Ne laser used is a highly coherent light source, where the scramble mode technique is presented to reduce the laser beam coherent length. The highly coherent light is launched into a length of a step index multimode fiber before entering into the interferometric system, then the recovery signal is observed. Results have shown that the coherent length of output light is reduced i.e. shorten by 40.86 %. The appropriate coherent length in this work was occurred correspond to fiber length of 1 meter. In applications, the feasibility study of force sensor and photoelastic material characterization can be realized.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีเพราะความช่วยเหลือจาก รศ. ดร. ปรีชา บุพาพิน ซึ่ง  
เป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ท่านคอยแนะนำให้คำปรึกษาทั้งทางด้านวิชาการและเทคนิคต่างๆ  
ในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนให้ความเอาใจใส่และคอยกระตุ้นให้ข้าพเจ้าขยันทำงานวิจัยเรื่อยมา  
จนงานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ข้าพเจ้ารู้สึกทราบซึ่งเป็นอย่างยิ่งและขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ วิทยาเขต  
ประสานมิตร และภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ต่างๆ แก่ข้าพเจ้าจนทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ได้ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบซึ่งเป็น  
อย่างยิ่ง

ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ แนะนำและให้คำปรึกษาต่างๆ ในระหว่างที่  
ข้าพเจ้าทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ผลบุญอันพึงเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่บิดาและมารดาซึ่งเป็น  
ที่รักยิ่งของข้าพเจ้า

ภูเบศร์ พิพิธหิรัญการ

# สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                 | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                              | II   |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                 | III  |
| สารบัญ.....  | IV   |
| สารบัญตาราง.....                                     | IX   |
| สารบัญรูป.....                                       | X    |
| บทที่ 1 บทนำ.....                                    | 1    |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....                | 1    |
| 1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                       | 1    |
| 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....                     | 5    |
| 1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....                              | 6    |
| 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....                | 6    |
| บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย..... | 7    |
| 2.1 ความเป็นมาของแสง.....                            | 7    |
| 2.2 หลักการเบื้องต้นทางแสง.....                      | 9    |
| 2.2.1 ค่าดัชนีหักเห.....                             | 9    |
| 2.2.2 กฎการสะท้อน.....                               | 11   |
| 2.2.3 กฎการหักเหหรือกฎของสเนลล์.....                 | 11   |
| 2.2.4 มุมวิกฤติ.....                                 | 12   |
| 2.2.5 การสะท้อนกลับหมดภายใน.....                     | 14   |
| 2.2.6 หลักของฮอยเกนส์.....                           | 14   |
| 2.3 หลักการซ้อนทับของคลื่น.....                      | 15   |
| 2.4 การทดลองสลิตคู่ของยัง.....                       | 20   |
| 2.5 หลักการของโฟโตอิลาสติก.....                      | 24   |
| 2.5.1 ความหวังสัมบูรณ์.....                          | 24   |
| 2.5.2 การหักเหสองแนว.....                            | 25   |
| 2.5.3 ความหวังสัมพัทธ์.....                          | 25   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| 2.5.4 การแทรกสอดที่เกิดจากปรากฏการณ์การหักเหสองแนว.....                     | 26   |
| 2.5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มกับความเค้น.....                           | 29   |
| 2.6 สรุป.....   | 30   |
| บทที่ 3 อุปกรณ์และหลักการทำงานเบื้องต้น.....                                | 31   |
| 3.1 รายชื่อของวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....                          | 31   |
| 3.2 โยแก้วนำแสง.....  | 32   |
| 3.2.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของโยแก้วนำแสง.....                                  | 32   |
| 3.2.2 ลักษณะของแสงที่แพร่กระจายในโยแก้วนำแสง.....                           | 33   |
| 3.2.3 มุมรองรับแสง.....   | 34   |
| 3.2.4 ผลต่างค่าดัชนีหักเหสัมพัทธ์.....                                      | 35   |
| 3.2.5 นิวมอริคัลอะเพอร์เจอร์.....   | 35   |
| 3.2.6 ความถี่นอร์มอลไลซ์หรือวี - นัมเบอร์.....                              | 36   |
| 3.2.7 ชนิดของโยแก้วนำแสง.....   | 37   |
| 3.2.7.1 โยแก้วนำแสงชนิดสเต็ปอินเด็กซ์.....                                  | 37   |
| 3.2.7.2 โยแก้วนำแสงชนิดเกรดอินเด็กซ์.....                                   | 38   |
| 3.2.8 การกระจาย.....  | 39   |
| 3.2.8.1 การกระจายเชิงความยาวคลื่น.....                                      | 41   |
| 3.2.8.1.1 การกระจายเชิงวัสดุ.....   | 41   |
| 3.2.8.1.2 การกระจายเชิงท่อนำคลื่นหรือการกระจายเชิง<br>โครงสร้าง.....        | 42   |
| 3.2.8.2 การกระจายเชิงโหมด.....  | 44   |
| 3.2.8.2.1 การกระจายเชิงโหมดในโยแก้วนำแสงหลาย<br>โหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์..... | 44   |
| 3.2.8.2.2 การกระจายเชิงโหมดในโยแก้วนำแสงหลาย<br>โหมดชนิดเกรดอินเด็กซ์.....  | 46   |
| 3.2.8.3 การกระจายทั้งหมดในโยแก้วนำแสงหลายโหมด.....                          | 47   |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| 3.3 เลเซอร์.....  | 48   |
| 3.3.1 ความเป็นมาของเลเซอร์.....   | 48   |
| 3.3.2 ระบบเลเซอร์.....  | 48   |
| 3.3.3 หลักการเกิดแสงเลเซอร์.....  | 49   |
| 3.3.4 คุณสมบัติของแสงเลเซอร์.....                                       | 52   |
| 3.3.5 โหมดของแสงเลเซอร์.....  | 53   |
| 3.3.5.1 โหมดตามยาวหรือโหมดตามแกน.....                                   | 54   |
| 3.3.5.2 โหมดตามขวาง.....  | 56   |
| 3.4 เลเซอร์ก๊าซ.....  | 59   |
| 3.5 เลเซอร์ฮีเลียมนีออน.....  | 59   |
| 3.5.1 โครงสร้างภายในของเลเซอร์ฮีเลียมนีออน.....                         | 59   |
| 3.5.2 หลักการเกิดแสงเลเซอร์ของเลเซอร์ฮีเลียมนีออน.....                  | 60   |
| 3.6 ออปติก.....   | 63   |
| 3.6.1 ออปติกตามเวลาและออปติกบางส่วน.....                                | 65   |
| 3.6.2 ออปติกตามตำแหน่ง.....   | 70   |
| 3.7 สรุป.....   | 73   |
| บทที่ 4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....                                      | 74   |
| 4.1 ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์.....                                   | 74   |
| 4.1.1 หลักการ.....  | 74   |
| 4.1.2 การทดลอง.....   | 80   |
| 4.2 การวัดระยะทางด้วยไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์.....                  | 82   |
| 4.2.1 หลักการ.....  | 82   |
| 4.2.2 การทดลอง.....   | 82   |
| 4.3 การลดความยาวอาพันธ์ของแหล่งกำเนิดแสงด้วยเทคนิคการสแกรมเบิลโหมด..... | 84   |
| 4.3.1 หลักการ.....  | 84   |
| 4.3.2 การทดลอง.....   | 85   |

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|  |     |
|--|-----|
| 4.4 การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์เป็น<br>อุปกรณ์ตรวจวัดแรงและประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์ศึกษาคุณสมบัติ<br>ความยืดหยุ่นทางแสงของวัสดุโปร่งใส.....   | 87  |
| 4.4.1 หลักการ.....   | 87  |
| 4.4.2 การทดลอง.....  | 89  |
| 4.4.3 การทดลองการหาเวลาคลายตัวของวัสดุทดสอบ.....   | 90  |
| 4.5 สรุป.....  | 92  |
| บทที่ 5 ผลของงานวิจัยและการวิเคราะห์ผล.....  | 93  |
| 5.1 ผลการศึกษาระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย.....  | 93  |
| 5.2 ผลการวัดระยะทางด้วยไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์.....   | 97  |
| 5.3 ผลการลดความยาวอาพันธ์ของแหล่งกำเนิดแสงด้วยเทคนิคการสแกรมเบิลโหมด..   | 101 |
| 5.4 ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์เป็น<br>อุปกรณ์ตรวจวัดแรงและประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์ศึกษาคุณสมบัติ<br>ความยืดหยุ่นทางแสงของวัสดุโปร่งใส..... | 108 |
| 5.5 สรุป.....  | 116 |
| บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.....  | 118 |
| 6.1 บทสรุป.....  | 118 |
| 6.1.1 การศึกษาระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย.....  | 118 |
| 6.1.2 การวัดระยะทางด้วยไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์.....   | 119 |
| 6.1.3 การลดความยาวอาพันธ์ของแหล่งกำเนิดแสงด้วยเทคนิค<br>การสแกรมเบิลโหมด.....  | 119 |
| 6.1.4 การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์<br>เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรงและประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์<br>ศึกษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นทางแสงของวัสดุโปร่งใส..... | 120 |
| 6.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น.....  | 121 |
| 6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการดำเนินงานวิจัยต่อ.....   | 122 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| เอกสารอ้างอิง.....  | 124  |
| ภาคผนวก.....  | 125  |
| ภาคผนวก ก. รายละเอียดเพิ่มเติมของอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย..... | 126  |
| ประวัติผู้เขียน.....  | 129  |



# สารบัญตาราง

| ตารางที่   | หน้า |
|--|------|
| 2.1 แสดงค่าดัชนีหักเหของตัวกลางต่างๆ โดยวัดด้วยแสงความยาวคลื่น 589 นาโนเมตร.....   | 10   |
| 5.1 แสดงค่าความเข้มแสงที่เกิดจากการแทรกสอด ณ ตำแหน่งต่างๆ ของไมโครมิเตอร์.....   | 95   |
| 5.2 ผลการทดลองการใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์วัดความหนาของแผ่นแก้วสไลด์<br>หนา 1 มิลลิเมตร.....   | 99   |
| 5.3 ผลการทดลองการใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์วัดความหนาของวัสดุเปอร์สเปกซ์<br>หนา 10 มิลลิเมตร.....   | 100  |
| 5.4 แสดงค่าความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดเมื่อใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมด<br>ชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ที่ความยาวต่างๆ.....   | 106  |
| 5.5 แสดงค่าความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดและค่าความยาวอาพันธ์ของแสงที่เกิด<br>จากการใช้เทคนิคการสแกรมเบิลโหมดด้วยใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ป<br>อินเด็กซ์ที่ความยาวต่างๆ..... | 107  |
| 5.6 แสดงค่าผลต่างทางเดินของแสงที่เกิดจากการให้แรงขนาดต่างๆ ที่กระทำกับวัสดุ<br>อะรัลไดรท์.....   | 109  |
| 5.7 แสดงค่าผลต่างทางเดินของแสงที่เกิดจากการให้แรงขนาดต่างๆ ที่กระทำกับวัสดุ<br>เปอร์สเปกซ์.....  | 110  |
| 5.8 แสดงค่าเวลาคลายตัวของวัสดุอะรัลไดรท์และวัสดุเปอร์สเปกซ์เมื่อนำหน้าหนักกด<br>ขนาดต่างๆ.....   | 113  |
| 5.9 แสดงค่าความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดในขณะที่วัสดุอะรัลไดรท์และวัสดุ<br>เปอร์สเปกซ์คลายตัวเมื่อนำหน้าหนักขนาดต่างๆ.....  | 113  |

# สารบัญรูป

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 1.1 ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยของ Wang et. al. [1].....  | 2    |
| 1.2 ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยของ P. V. P. Yupapin และ S. Kusamran [2].....  | 3    |
| 1.3 ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยของ P. V. P. Yupapin et. al. [3].....  | 4    |
| 2.1 แสดงการสะท้อนและการหักเหของแสงเมื่อเดินทางจากตัวกลางหนึ่ง ไปยังอีกตัวกลางหนึ่งที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน.....   | 11   |
| 2.2 แสดงการหักเหของแสงเมื่อเดินทางไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหมากกว่า.....   | 12   |
| 2.3 แสดงการหักเหของแสงเมื่อเดินทางไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหน้อยกว่า.....  | 13   |
| 2.4 แสดงการหักเหของแสงที่ขนานไปกับผิวรอยต่อระหว่างตัวกลางทั้งสองเมื่อมุมตกกระทบมีค่าเท่ากับมุมวิกฤติ.....  | 13   |
| 2.5 แสดงการสะท้อนกลับหมดภายใน เมื่อแสงมีมุมตกกระทบมากกว่ามุมวิกฤติ.....  | 14   |
| 2.6 การทดลองสลิตคู่ของยัง.....   | 20   |
| 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้ม (I) แสงกับความต่างเฟสของแสง ( $\phi$ ).....  | 22   |
| 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง (I) กับความต่างเฟสของแสง ( $\phi$ ) เมื่อแอมพลิจูดของแสงทั้งสองขบวนมีค่าเท่ากัน ( $I_1 = I_2$ ) ทำให้ความคมชัดของริ้วการแทรกสอดจะมีค่าสูงสุด..... | 23   |
| 2.9 การเกิดความสว่างสัมบูรณ์เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน.....   | 24   |
| 2.10 การทำให้วัสดุบางชนิดเกิดปรากฏการณ์การหักเหสองแนว.....   | 24   |
| 2.11 ระบบที่ใช้ศึกษาการแทรกสอดที่เกิดจากปรากฏการณ์การหักเหสองแนว.....  | 26   |
| 2.12 แสดงการแยกออกเป็นสองแนวของแสงที่เดินทางผ่านเข้าไปในวัสดุหักเหสองแนว.....  | 27   |
| 2.13 แสดงแสงทั้งสองแนวที่เดินทางออกจากวัสดุหักเหสองแนวและกำลังจะผ่านอนาไลเซอร์ (Analyzer) ที่มีแกนส่งผ่านเอียงทำมุม $\theta$ กับแกน y.....   | 28   |
| 2.14 แสดงริ้วการแทรกสอดของแสงที่เดินทางออกจากวัสดุที่ได้รับแรงกระทำหรือเกิดความเค้นขึ้นในเนื้อวัสดุ.....   | 30   |
| 3.1 แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของใยแก้วนำแสงคือ แกน แคลคดิ่ง และ ส่วนห่อหุ้มชั้นนอก.....  | 32   |
| 3.2 แสดงลักษณะของแสงที่แพร่กระจายในใยแก้วนำแสง.....  | 33   |
| 3.3 แสดงมุมรองรับแสงและกรวยรองรับแสงของใยแก้วนำแสง.....  | 34   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 3.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหระหว่างแกนกับแคลคูลิงและลักษณะของแสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ (ก) และใยแก้วนำแสงโหมดเดียวชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ (ข).....   | 38   |
| 3.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหระหว่างแกนกับแคลคูลิงของใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดเกรดอินเด็กซ์ (ก) และลักษณะของแสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดเกรดอินเด็กซ์ (ข).....  | 39   |
| 3.6 แสดงการเกิดการซ้อนทับกันของสัญญาณและพัลส์ที่ไม่สามารถแยกความแตกต่างได้เมื่อแสงเดินทางในใยแก้วนำแสง.....   | 40   |
| 3.7 การกว้างออกของพัลส์ที่เกิดจากใยแก้วนำแสงชนิดต่างๆ.....  | 40   |
| 3.8 การกระจายเชิงความยาวคลื่นที่เกิดในใยแก้วนำแสงชนิดสเต็ปอินเด็กซ์.....  | 43   |
| 3.9 แสดงทางเดินของรังสีตามแกนและรังสีเมอร์เดียนในใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์.....   | 44   |
| 3.10 แสดงระบบเลเซอร์ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ ตัวกลางเลเซอร์ แหล่งจ่ายกำลังและออปติคัลคาวิตี.....  | 49   |
| 3.11 แสดงการดูคลื่นแสงแบบเกิดขึ้นเอง ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนดูคลื่นโฟตอนเข้าไปแล้วอิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจาก $E_1$ ขึ้นไปสู่ $E_2$ (ข) การเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจาก $E_2$ ลงมาสู่ $E_1$ อิเล็กตรอนจะคายโฟตอนออกมา (ง) และการเกิดการเปล่งแสงแบบถูกเร่ง ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนที่ระดับพลังงาน $E_2$ ถูกโฟตอนเข้ามากระตุ้น ทำให้อิเล็กตรอนตกกลับมายังระดับพลังงาน $E_1$ พร้อมกับคายโฟตอนออกมา (ค)..... | 50   |
| 3.12 แสดงการเกิด โหมดตามแกนของเลเซอร์เมื่อใช้เลเซอร์ควาวิตียาว $L$ โดยที่รูปบนแสดงไลเนวิคซ์ของแสงเลเซอร์ รูปกลางแสดงโหมดตามแกนซึ่งเกิดจากความถี่ของแสงที่กำกับเลเซอร์ควาวิตีความยาว $L$ รูปล่างแสดงแสงเอาต์พุตของเลเซอร์ซึ่งประกอบด้วยโหมดตามแกนจำนวนหนึ่งที่ห่างกัน $\frac{c}{2L}$ ซึ่งอยู่ภายในความกว้างของไลเนวิคซ์ของเลเซอร์.....   | 55   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 3.13 แสดงวิธีการทำให้แสงเลเซอร์หลายโหมดกลายเป็นแสงเลเซอร์โหมดเดียวโดยการใช้<br>ควาวิตี้ที่มีขนาดสั้นๆ โดยรูปบนแสดงโลนวิดซ์ของแสงเลเซอร์ที่แคบมากเนื่องจากการ<br>ออกแบบเลเซอร์ควาวิตี้ รูปกลางแสดงโหมดตามแกนที่เกิดจากการใช้เลเซอร์ควาวิตี้ที่มี<br>ขนาดสั้น (Short cavity) ซึ่งทำให้ระยะห่างระหว่างโหมดมากขึ้น รูปล่างแสดงแสง<br>เลเซอร์โหมดเดียวที่เกิดจากการใช้เลเซอร์ควาวิตี้ที่มีขนาดสั้น..... | 57   |
| 3.14 แสดงลักษณะของโหมดตามขวาง $TEM_{00}$ $TEM_{01}$ $TEM_{10}$ $TEM_{11}$ $TEM_{12}$ และ<br>$TEM_{02}$ .....   | 58   |
| 3.15 แสดงโครงสร้างพื้นฐานในการเกิดแสงเลเซอร์ของเลเซอร์ฮีเลียมนีออน.....  | 60   |
| 3.16 แสดงโคอะแกรมระดับพลังงาน (Energy level diagram) ของเลเซอร์ฮีเลียมนีออน.....   | 61   |
| 3.17 แสดงคลื่นฮาร์มอนิกที่มีช่วงชีวิต ( $\tau$ ) ต่างๆ กัน.....  | 64   |
| 3.18 แสดงการแทรกสอดของแสง 2 ลำที่มาจากแหล่งกำเนิดแสง $S_1$ และ $S_2$ .....   | 65   |
| 3.19 แสดงความไม่ต่อเนื่องของเฟสของคลื่น ซึ่งจะเปลี่ยนเฟสทุกๆ ช่วงเวลา $\tau$ (ก)<br>รูป (ข) แสดงการเปลี่ยนเฟสที่เกิดขึ้นทุกๆ ช่วงเวลา $\tau$ และ $\tau_0$<br>รูป (ค) เป็นความต่างเฟสของคลื่นทั้งสองที่มีการเปลี่ยนเฟสทุกๆ ช่วงเวลา $\tau$ และ $\tau_0$ .....   | 67   |
| 3.20 แสดงระดับอาพันธ์ของคลื่นแสงที่มาแทรกสอดกัน.....   | 69   |
| 3.21 แสดงการแทรกสอดในแบบแบ่งหน้าคลื่นและแบ่งแอมพลิจูดของแสงจากแหล่งกำเนิด<br>แสง.....  | 71   |
| 3.22 แสดงบริเวณของการแทรกสอดที่มีขนาด $1_s$ ซึ่งแสงที่มาจาก $S_1$ และ $S_2$ ยังคงเป็น<br>แสงอาพันธ์อยู่.....   | 72   |
| 4.1 ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้โดยทั่วไป.....   | 75   |
| 4.2 ระบบพื้นฐานของไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....   | 76   |
| 4.3 แสดงภาพการแทรกสอดที่ปรากฏบนฉากรับภาพซึ่งจะเห็นว่าภาพการแทรกสอดจะเป็น<br>วงมืด-สว่างสลับกัน (ลักษณะภาพของการแทรกสอดจะขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้).....  | 76   |
| 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง ( $I$ ) กับผลต่างทางเดินของแสง ( $L_1 - L_2$ ).....   | 78   |
| 4.5 แสดงลักษณะของสัญญาณ AC ที่เกิดจากการทำให้กระจก M2 สั่นในแนวเดียวกับ<br>ลำแสงที่มาตกกระทบ โดยการติดกระจก M2 เข้ากับลำโพงซึ่งถูกทำให้สั่นโดยการป้อน<br>สัญญาณรูปไซน์จากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์.....  | 79   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.6 แสดงระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดระยะทาง.....  | 83   |
| 4.7 ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาการลดความยาวอาพันธ์ของแหล่งกำเนิดแสงด้วยเทคนิคการสแกมเบิลโทมคโดยใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์.....                         | 84   |
| 4.8 แสดงระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรงและใช้ศึกษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นทางแสงของวัสดุโปริงใส.....                  | 88   |
| 4.9 การให้แรงกดกับวัสดุทดสอบในส่วนของการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรงและใช้ศึกษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นทางแสงของวัสดุโปริงใส..... | 90   |
| 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงที่เกิดจากการแทรกสอดกับตำแหน่งต่างๆ ของไมโครมิเตอร์.....  | 94   |
| 5.2 กราฟแสดงความสามารถในการวัดซ้ำ 3 ครั้ง ของไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย.....  | 94   |
| 5.3 การใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์วัดความหนาของแผ่นแก้วสไลด์หนา 1 มิลลิเมตร.....  | 98   |
| 5.4 การใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์วัดความหนาของวัสดุเปอร์สเปกซ์หนา 10 มิลลิเมตร.....  | 98   |
| 5.5 กราฟรูปร่างเส้นที่ได้จากการทำเคิร์ฟฟิตติง (Curve fitting) ข้อมูลจากกราฟรูปที่ 5.1.....  | 101  |
| 5.6 แสดงการหาความยาวอาพันธ์ของแสงจากช่วงที่แสงเกิดการแทรกสอดกันทั้งหมดและตำแหน่ง FWHM ของกราฟรูปร่างเส้นซึ่งเป็นตำแหน่งอ้างอิงในการหาความยาวอาพันธ์ของแสง.....                      | 102  |
| 5.7 แสดงการหาความยาวอาพันธ์ของแสงโดยพิจารณาจากตำแหน่ง FWHM ของข้อมูลจากกราฟรูปที่ 5.1.....  | 103  |
| 5.8 กราฟแสดงค่าความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดและความกว้างของกราฟ ณ ตำแหน่ง FWHM เมื่อใช้เทคนิคการสแกมเบิลโทมคด้วยใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ที่ความยาวต่างๆ.....          | 104  |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 5.9 กราฟแสดงค่าความยาวอาพันธ์ของแสงที่เกิดจากการใช้เทคนิคการสแกมเบิลโฮมดด้วยใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กส์ที่มีความยาวต่างๆ..... | 105  |
| 5.10 กราฟแสดงค่าความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดเมื่อใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กส์ที่มีความยาวต่างๆ.....                       | 105  |
| 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างทางเดินของแสงกับแรงที่กระทำกับวัสดุอะรัลโครท์.....  | 108  |
| 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างทางเดินของแสงกับแรงที่กระทำกับวัสดุเปอร์สเปกซ์.....   | 109  |
| 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาคลายตัวของอะรัลโครท์เมื่อนำน้ำหนักกดขนาดต่างๆ.....  | 111  |
| 5.14 กราฟแสดงค่าความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดในขณะที่อะรัลโครท์คลายตัวเมื่อนำน้ำหนักรูปขนาดต่างๆ.....                                  | 111  |
| 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาคลายตัวของเปอร์สเปกซ์เมื่อนำน้ำหนักรูปขนาดต่างๆ.....  | 112  |
| 5.16 กราฟแสดงค่าความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดในขณะที่เปอร์สเปกซ์คลายตัวเมื่อนำน้ำหนักรูปขนาดต่างๆ.....                                 | 112  |

# บทที่ 1

## บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความสำคัญและที่มาของงานวิจัย งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัยและประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

นับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1827 โทมัส ยัง ได้พิสูจน์ให้เห็นว่าแสงสามารถแทรกสอดกันได้ จากนั้นก็มีนักวิทยาศาสตร์หลายคนได้นำหลักการแทรกสอดของแสงไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการตรวจวัด เช่น ในปี ค.ศ. 1881 อัลเบิร์ต ไมเคิลสัน (Albert A. Michelson) ได้สร้างเครื่องมือวัดที่อาศัยหลักการแทรกสอดของแสงที่เรียกว่า ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ (Michelson interferometer) ซึ่งต่อมาไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะงานทางด้านการตรวจวัดโดยใช้แสงและได้ถูกพัฒนาขึ้นมาหลายรูปแบบเพื่อให้เหมาะสมกับงานที่นำไปใช้ ปัจจุบันไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีหลักการทำงานที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ง่ายต่อการใช้งาน ให้ผลการวัดที่ถูกต้องแม่นยำและมีความละเอียดสูง นอกจากนี้การตรวจวัดโดยใช้ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ยังสามารถนำไปใช้กับงานที่เรียกว่า การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non destructive testing : NDT) และหลักการของไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ถูกนำไปใช้งานเกี่ยวกับการประมวลสัญญาณสำหรับทำอุปกรณ์สื่อสารทางแสงและเครือข่ายใยแก้วนำแสงอีกด้วย ดังนั้นการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการตรวจวัดโดยใช้ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์จึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างมากต่อการพัฒนาหลักการวัดและเครื่องมือวัดให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

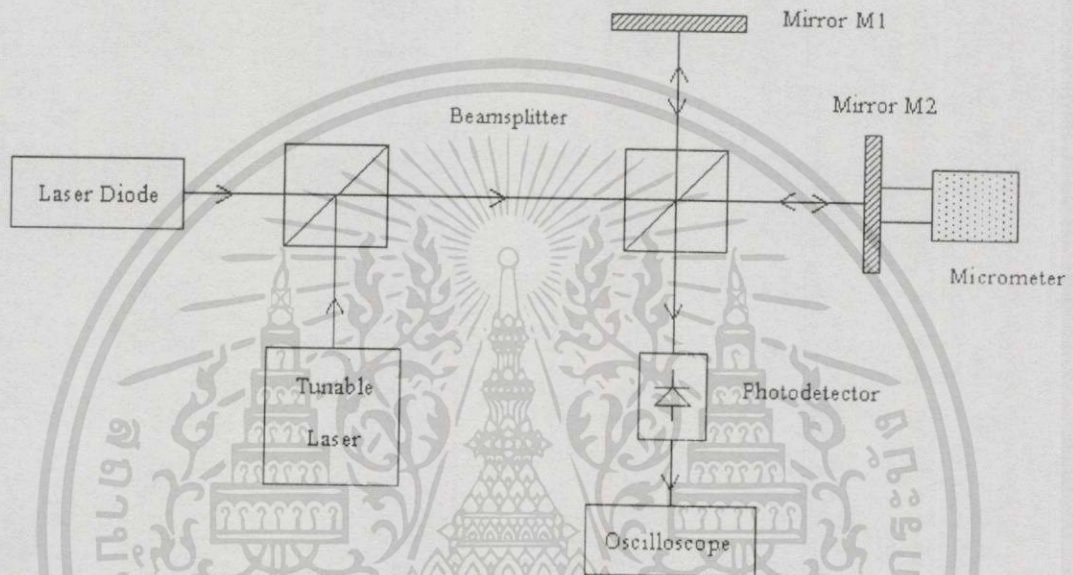
### 1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การประยุกต์ใช้ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ในการตรวจวัดทางแสงได้มีผู้ทำการวิจัยอย่างต่อเนื่องเช่น เมื่อปี ค.ศ. 1995 D. N. Wang et. al. [1] ได้ประยุกต์ใช้ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดโดยใช้แหล่งกำเนิดแสง 2 แหล่งคือ ไดโอดเลเซอร์ (Laser diode : LD) ที่ความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร ( $\lambda_1$ ) และไดโอดเลเซอร์ชนิดปรับค่าได้ (Tunable laser diode) ที่สามารถเปลี่ยนความยาวคลื่นได้ในช่วง 604 - 642 นาโนเมตร ( $\lambda_2$ ) ระบบการตรวจวัดโดยใช้ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ในงานวิจัยของ Wang แสดงดังรูปที่ 1.1 หลักการที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ถ้าผลต่างทางเดินของแสง (Optical path difference : OPD) ในระบบไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์เปลี่ยนสามารถหา OPD ที่เปลี่ยนไปได้โดยการเปลี่ยนความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงไดโอดเลเซอร์ชนิดปรับค่าได้ที่สงวนไว้ ความยาวคลื่นที่เปลี่ยน ( $\delta\lambda$ ) สามารถนำไปคำนวณหา OPD ได้จาก

เอกสราเป็นเพียงผู้สงวนไว้ ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$OPD = \lambda_1^2 \left( \frac{1}{|\Delta\lambda|} - \frac{1}{|\Delta\lambda + \delta\lambda|} \right)$  เมื่อ  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$  จากหลักการนี้ทำให้ผลของการตรวจวัดที่ได้

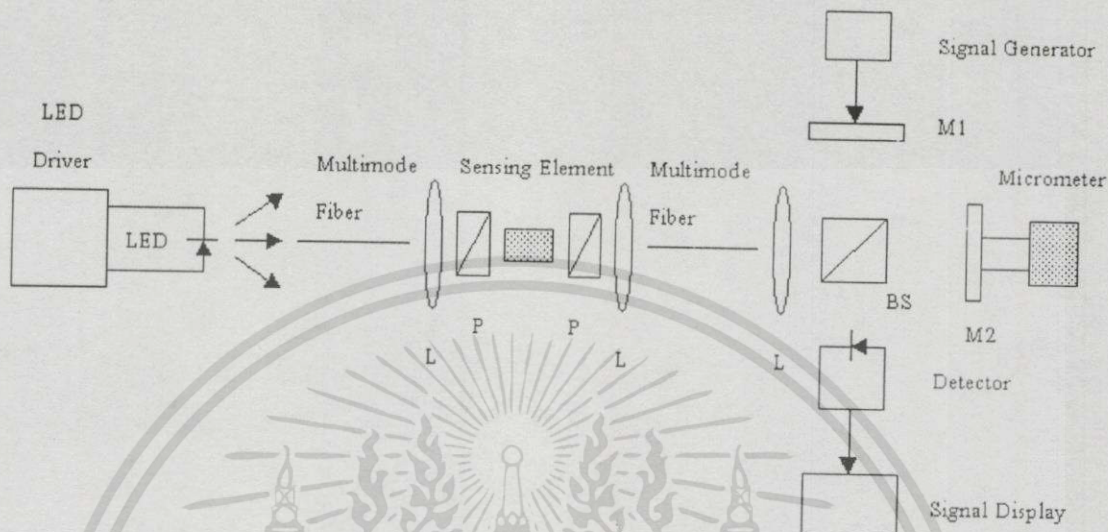
มีความละเอียดสูงมาก แต่ข้อเสียของงานวิจัยนี้คือ ต้องใช้แหล่งกำเนิดแสง 2 แหล่ง โดยแหล่งกำเนิดทั้งสองต้องมีค่าความยาวคลื่นใกล้เคียงกันและแหล่งกำเนิดแสงหนึ่งต้องปรับค่าความยาวคลื่นได้ซึ่งถือว่าเป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งในงานวิจัย



รูปที่ 1.1 ระบบไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยของ Wang et. al. [1]

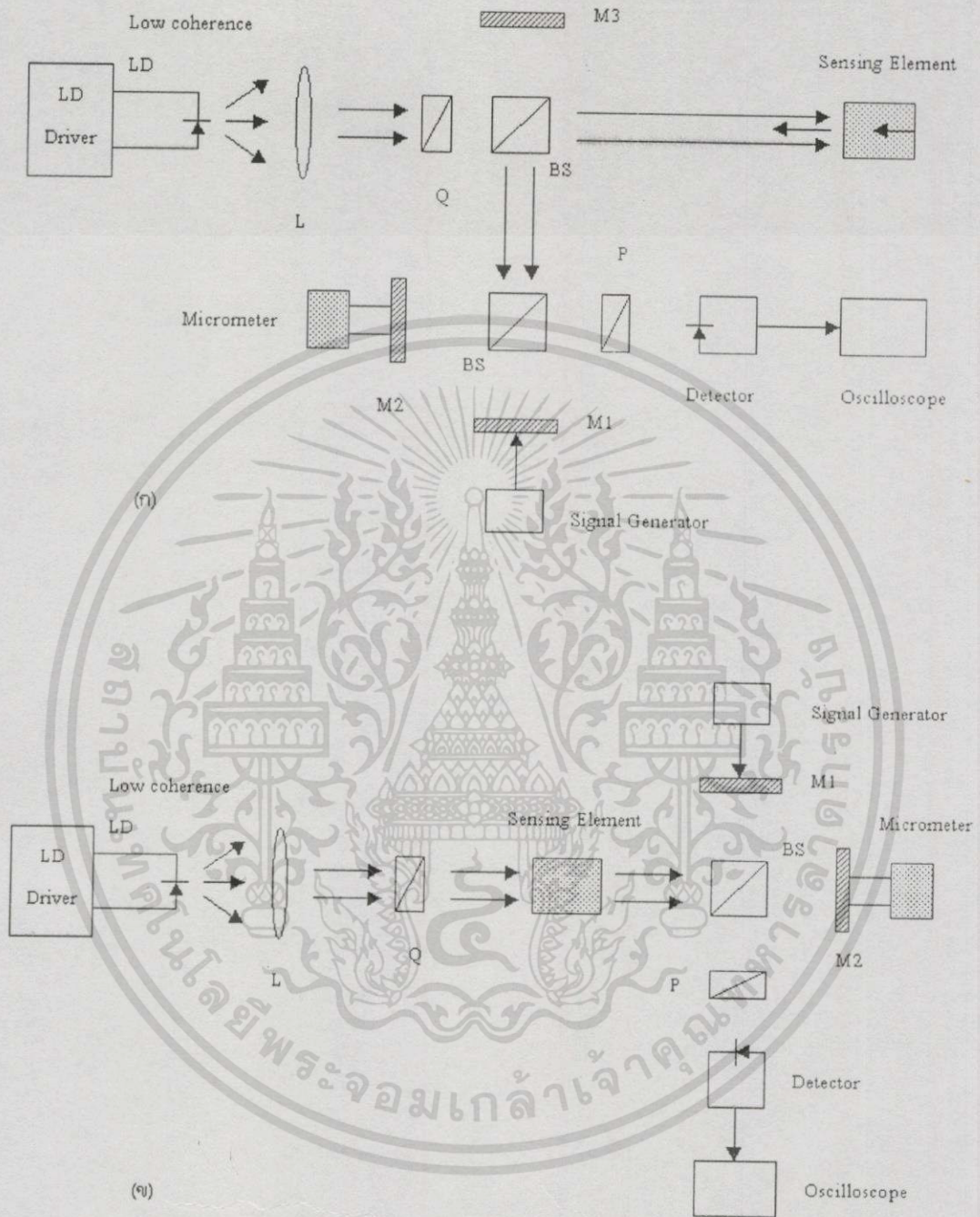
สำหรับการประยุกต์ใช้ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ศึกษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นทางแสง ได้มีผู้ทำการศึกษาและวิจัยคือ P. V. P. Yupapin และ S. Kusamran [2] โดยระบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 1.2 ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นทางแสงของวัสดุโดยอาศัยปรากฏการณ์การหักเหสองแนวที่เกิดจากการให้แรงกด (หรือความเค้น) กับวัสดุ ทำให้วัสดุนั้น ประพฤติตัวเป็นวัสดุหักเหสองแนว เมื่อแสงจากไดโอดเปล่งแสง (Light emitting diode : LED) เดินทางผ่านเข้าไปในวัสดุหักเหสองแนวจะทำให้แสงแยกออกเป็นสองแนว โดยแสงทั้งสองจะมีทิศของการโพลาไรซ์ขนานและตั้งฉากกับทิศของแรงที่กระทำกับวัสดุนั้น แรงที่กระทำกับวัสดุจะทำให้ค่าดัชนีหักเหในแนวแกนต่างๆ ไม่เท่ากัน แสงทั้งสองจึงเดินทางด้วยความเร็วต่างกันทำให้เกิด OPD ระหว่างแสงทั้งสอง การหา OPD ทำได้โดยให้แสงที่เดินทางออกจากวัสดุผ่านเข้าสู่ระบบไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ จากนั้นปรับแขนของไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เพื่อหา OPD ดังกล่าว

เมื่อทราบ OPD ก็สามารถนำไปคำนวณหาแรงที่กระทำกับวัสดุได้จาก  $OPD = \frac{CFL}{A}$  เมื่อ L คือ ความหนา A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ C คือ สัมประสิทธิ์ความเค้นทางแสงของวัสดุ



รูปที่ 1.2 ระบบ ไมครอสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยของ P. V. P. Yupapin และ S. Kusamran [2] โดยที่ LED : Light emitting diode ; L : Lens ; P : Polarizer ; BS : Beamsplitter ; M1, M2 : Mirror

สำหรับการประยุกต์ใช้ไมครอสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดได้มีผู้ทำการศึกษาและวิจัยคือ P. V. P. Yupapin et. al. [3] ซึ่งใช้ไมครอสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดความดัน (Pressure sensor) ระบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 1.3 (ก) และ (ข) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นทางแสงของวัสดุ โดยอาศัยปรากฏการณ์การหักเหสองแนวที่เกิดจากการให้แรงกดกับวัสดุทำให้วัสดุนั้นประพฤติตัวเป็นวัสดุหักเหสองแนว การให้แรงกดกับวัสดุจะทำให้ค่าดัชนีหักเหของวัสดุในแนวแกนขนาน ( $n_1$ ) และตั้งฉาก ( $n_2$ ) กับทิศของแรงที่กระทำมีค่าไม่เท่ากัน โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับค่าดัชนีหักเหในแนวแกนทั้งสองหาได้จาก  $n_1 - n_2 = \frac{CF}{A}$  เมื่อแสงเดินทางผ่านเข้าไปในวัสดุหักเหสองแนวจะทำให้เกิด OPD การหา OPD ก็มีหลักการคล้ายๆ กับงานวิจัยของ P. V. P. Yupapin และ S. Kusamran [2] แต่ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งระบบที่ศึกษาออกเป็น 2 แบบ โดยแบบแรกจะอาศัยหลักการสะท้อนแสงจากผิวด้านหน้าและด้านหลังของวัสดุเพื่อทำให้เกิด OPD ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $OPD = \frac{2CFL}{A}$  ส่วนแบบที่สองจะอาศัยหลักการส่งผ่านของแสงผ่านวัสดุเพื่อทำให้เกิด OPD



รูปที่ 1.3 ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยของ P. V. P. Yupapin et. al. [3]

รูป (ก) จะอาศัยหลักการสะท้อนแสงจากผิวด้านหน้าและด้านหลังของวัสดุเพื่อทำให้เกิด OPD รูป (ข) จะอาศัยหลักการส่งผ่านของแสงผ่านวัสดุเพื่อทำให้เกิด OPD โดยที่

LD : Laser diode ; L : Lens ; Q : Quarter-wave plate ; P : Polarizer ; BS : Beamsplitter ;  
M1,M2,M3 : Mirror

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาจะเห็นว่าแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้คือ ไดโอดเลเซอร์ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ให้แสงที่มีความยาวอาพันธ์สั้น ทำให้เหมาะกับการใช้งานด้านการตรวจวัดอย่างละเอียด แต่เนื่องจากความไม่มีเสถียรภาพของแสงเลเซอร์ที่ได้เมื่อใช้งานไปนานๆ ตลอดจนปัญหาด้านอายุการใช้งานและความยุ่งยากของวงจรขับเคลื่อนของแหล่งกำเนิดแสง จึงทำให้ผู้ทำวิจัยได้นำแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ซึ่งหาได้ง่ายตามห้องปฏิบัติการทางแสง มีวงจรจ่ายกระแสที่ไม่ซับซ้อน มีเสถียรภาพสูง ให้แสงที่ตามองเห็น มีขนาดเล็กสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก มาใช้แทนแหล่งกำเนิดแสงไดโอดเลเซอร์ แต่เนื่องจากเลเซอร์ฮีเลียมนีออนให้แสงที่มีความยาวอาพันธ์ยาว ซึ่งไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงในระบบตรวจวัดอย่างละเอียด ดังนั้นจึงอาศัยเทคนิคการสแกนเบิลโหมด (Mode scramble) โดยใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ เพื่อทำให้ความยาวอาพันธ์ของแสงเลเซอร์ก่อนที่จะเข้าสู่ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์สั้นลง การใช้เทคนิคการสแกนเบิลโหมดนอกจากทำให้ความยาวอาพันธ์ของแสงเลเซอร์สั้นลงแล้ว ยังสามารถใช้ปรับเปลี่ยนความละเอียด (Resolution) ของเครื่องมือได้ เนื่องจากความยาวอาพันธ์เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้กำหนดความละเอียดของไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ นอกจากนี้ในงานวิจัยยังได้นำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ ซึ่งพบว่าการวัดผลจากสัญญาณที่ปรากฏบนออสซิลโลสโคปจะสะดวกมีประสิทธิภาพและถูกต้องมากกว่าการวัดผลจากรีวการแทรกสอดที่ปรากฏบนฉากรับภาพ

### 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาและนำไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์มาประยุกต์ใช้งานทางด้านการตรวจวัด
- 2) ศึกษาและประยุกต์ใช้ใยแก้วนำแสงสำหรับงานทางด้านการตรวจวัด โดยใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์
- 3) ศึกษาการเปลี่ยนความยาวอาพันธ์ของแสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดแสงโดยใช้เทคนิคการสแกนเบิลโหมด เพื่อให้ได้แสงที่มีความยาวอาพันธ์เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานทางด้านการตรวจวัดโดยใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์
- 4) ศึกษาความเป็นไปได้ (Feasibility) ในการประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรง (Force sensor)
- 5) ประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ในการศึกษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นทางแสงของวัสดุโปรงใส (Photoelastic material characteristics)

#### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งเนื้อหาที่ได้ทำการศึกษาวิจัยออกเป็น 4 ส่วน คือ

- 1) ศึกษาการวัดระยะทางด้วยไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร
- 2) ศึกษาการลดความยาวอาพันธ์ของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ด้วยเทคนิคการสแกนเบิลโหมคโดยใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมคชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ (Multimode step index fiber) ที่ความยาวต่างๆ
- 3) ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรง
- 4) ประยุกต์ใช้ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ศึกษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นทางแสงของอะรัลไดรท์ (Araldite) และ เปอร์สเปกซ์ (Perspex) โดยการให้แรงกดกับวัสดุ

#### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

- 1) สามารถนำความรู้พื้นฐานทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวกับการแทรกสอดของแสงมาประยุกต์ใช้ในงานด้านการตรวจวัดอย่างละเอียดเช่น การนำไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ซึ่งอาศัยหลักการแทรกสอดชนิดแบ่งแอมพลิจูดมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดทางแสง
- 2) พัฒนาเทคนิคการตรวจวัดทางแสงให้เหมาะสมกับความต้องการและงานที่นำไปใช้เช่น การนำใยแก้วนำแสงหลายโหมคชนิดสเต็ปอินเด็กซ์มาใช้ลดความยาวอาพันธ์ของแสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดแสง
- 3) พัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดทางแสงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเช่น การนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เพื่อทำให้การวัดมีประสิทธิภาพและถูกต้องมากขึ้น
- 4) ใช้งานวิจัยนี้เป็นพื้นฐานในการทำวิจัยที่เกี่ยวกับการตรวจวัดทางแสงโดยใช้ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ในระดับสูงต่อไป

## บทที่ 2

# หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยได้แก่ ความเป็นมาของแสง หลักการเบื้องต้นทางแสง หลักการซ้อนทับของคลื่น การทดลองสลิตคู่ของยังและหลักการของโฟโตอิเล็กทริก โดยเนื้อหาที่กล่าวถึงในบทนี้อาจจะไม่ละเอียดและครอบคลุมทฤษฎีทางแสงทั้งหมด แต่ผู้เขียนได้เลือกเฉพาะส่วนที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับงานวิจัยเท่านั้น โดยเขียนในเชิงสรุปเพียงสั้นๆ เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจและสามารถนำไปอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้ได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.1 ความเป็นมาของแสง

ราวกลางศตวรรษที่ 17 นิวตัน (Sir Issac Newton) ได้เสนอทฤษฎีอนุภาค (Particle theory) ที่ว่า แสงเป็นลำของอนุภาคเล็กๆ ที่หลุดออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง สามารถทะลุผ่านวัตถุโปร่งใสและสะท้อนกับผิวที่ทึบแสงได้ โดยทฤษฎีนี้สามารถนำไปอธิบายปรากฏการณ์การสะท้อน (Reflection) และการหักเห (Refraction) ของแสงได้ ซึ่งนักวิทยาศาสตร์ส่วนใหญ่ก็เชื่อในทฤษฎีนี้

ต่อมานักดาราศาสตร์ชาวฮอลแลนด์ชื่อ ฮอยเกนส์ (Christian Huygens) ได้เสนอทฤษฎีคลื่น (Wave theory) ที่ว่า แสงเป็นการเคลื่อนที่ของคลื่นที่แผ่ออกจากแหล่งกำเนิดในทุกทิศทาง โดยทฤษฎีนี้สามารถอธิบายปรากฏการณ์การสะท้อนและการหักเหได้เช่นกัน แต่ทฤษฎีนี้ไม่เป็นที่ยอมรับด้วยเหตุผลหลายประการเช่น

- 1) คลื่นที่รู้จักในสมัยนั้นส่วนใหญ่จะเป็นคลื่นกลได้แก่ คลื่นเสียง ซึ่งจำเป็นต้องมีตัวกลางเพื่อทำให้คลื่นเคลื่อนที่ไปได้ แต่ในขณะที่แสงจากดวงอาทิตย์ส่องมายังโลกสามารถเคลื่อนที่ได้ในสุญญากาศ
- 2) ถ้าแสงเป็นคลื่นต้องสามารถเลี้ยวเบนได้เมื่อพบสิ่งกีดขวาง ซึ่งในขณะนั้นไม่สามารถสังเกตการเลี้ยวเบนของแสงได้ (ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อสิ่งกีดขวางมีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่นแสงนั้น)

ภายหลัง กริมาลดี (Francesco Grimaldi) ได้ทำการทดลองเพื่อแสดงให้เห็นว่าแสงสามารถเลี้ยวเบนได้และได้เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเลี้ยวเบน (Diffraction)

ปี ค.ศ. 1821 นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสชื่อ เฟรส์เนล (Augustin Fresnel) ได้ทำการทดลองเพื่อยืนยันว่าแสงสามารถเลี้ยวเบนได้เมื่อพบสิ่งกีดขวาง การทดลองของเฟรส์เนลได้จัดให้แหล่งกำเนิดแสงและฉากอยู่ห่างจากสิ่งกีดขวางเป็นระยะห่างพอสมควรและสิ่งกีดขวางมีขนาดใกล้เคียงกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่นับว่าตีพิมพ์ในเชิงพาณิชย์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่นของแสงนั้น การเลี้ยวเบนของแสงในลักษณะนี้เรียกว่า การเลี้ยวเบนแบบเฟรสเนล (Fresnel diffraction)

ปี ค.ศ. 1827 นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษชื่อ โทมัส ยัง (Thomas Young) ได้ทำการพิสูจน์คุณสมบัติความเป็นคลื่นของแสง โดยแสดงให้เห็นว่าแสงสามารถแทรกสอดกันได้ ในขณะที่การแทรกสอดระหว่างอนุภาคไม่สามารถเกิดขึ้นได้

นอกจากนี้ทฤษฎีที่ว่าแสงเป็นคลื่นยังสามารถอธิบายปรากฏการณ์การหักเหสองแนวที่เกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางผ่านเข้าไปในวัสดุบางชนิดได้

ปี ค.ศ. 1862 นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษชื่อ แมกซ์เวลล์ (James Clerk Maxwell) ได้เสนอทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic theory) ที่ว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กซึ่งมีทิศของการสั่นตั้งฉากกัน มีความเร็วในสุญญากาศเท่ากับความเร็วแสง ซึ่งในทฤษฎีนี้ถือว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารูปหนึ่ง นอกจากนี้แมกซ์เวลล์ยังได้รวบรวมสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เรียกว่า สมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations)

ปี ค.ศ. 1887 เฮิร์ตซ์ (Heinrich Hertz) ได้สร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่  $10^6$  ถึง  $10^8$  Hz โดยใช้วงจรรออสซิลเลเตอร์และหาความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้น เฮิร์ตซ์พบว่าเมื่อนำความยาวคลื่นคูณกับความถี่จะได้ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งปรากฏว่ามีค่าเท่ากับความเร็วแสง นอกจากนี้เฮิร์ตซ์ยังแสดงให้เห็นว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถสะท้อนที่ผิวโลหะ ถูกโฟกัสโดยโลหะโค้งเว้า เมื่อผ่านพาราฟินและแก้วจะเกิดการหักเห ซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงคุณสมบัติเหมือนแสง เฮิร์ตซ์จึงสรุปว่า แสงคือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารูปหนึ่ง

จากการค้นพบของแมกซ์เวลล์และเฮิร์ตซ์ทำให้นักวิทยาศาสตร์ส่วนใหญ่ในขณะนั้นเชื่อกันว่าแสงนอกจากจะเป็นคลื่นแล้วยังเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอีกด้วย

เนื่องจากความล้มเหลวของทฤษฎีฟิสิกส์ยุคเก่าที่ไม่สามารถอธิบายการแผ่รังสีของวัตถุดำและปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกได้ ในปี ค.ศ. 1890 นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ พลังค์ (Max Planck) ได้เสนอทฤษฎีเพื่ออธิบายการแผ่รังสีของวัตถุดำว่า อะตอมที่ประกอบกันเป็นผนังภายในของวัตถุดำจะประพฤติตัวเสมือนเป็นออสซิลเลเตอร์ ซึ่งจะดูดกลืนและปล่อยพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นหน่วยๆ ที่เรียกว่าควอนตัมพลังงาน โดยมีค่าเท่ากับ  $nh\nu$  เมื่อ  $n$  คือเลขควอนตัม  $h$  คือค่านิจของพลังค์ ( $6.625 \times 10^{-34}$  J.s) และ  $\nu$  คือความถี่ (Hz)

ทฤษฎีที่ว่าแสงเป็นคลื่นนั้นไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่อิเล็กตรอนสามารถหลุดออกจากตัวนำโลหะที่ถูกแสงได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) ที่ทดลองโดยเฮิร์ตซ์ ต่อมาในปี ค.ศ. 1905 ไอน์สไตน์ (Albert Einstein) ได้อาศัยแนวความคิดของพลังค์มาอธิบายการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกได้ โดยคิดว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ความถี่  $\nu$  ที่ตกกระทบบนผิวโลหะ มีลักษณะเป็นอนุภาคที่ประกอบด้วยกลุ่มพลังงานเล็กๆ ที่เรียกเอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนวิชาสำหรับกรใช้งานเพื่อการกรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่า ควอนตัมของพลังงาน (Quantum of energy) หรือ โฟตอน (Photon) ที่มีพลังงานเท่ากับ  $h\nu$  เมื่อโฟตอนตกกระทบบนผิวโลหะและชนกับอิเล็กตรอน โฟตอนจะคายพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอน หากพลังงานนี้มากพอก็จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากแรงยึดเหนี่ยวของอะตอม กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ

จากความสำเร็จของพลังค์เกี่ยวกับความไม่ต่อเนื่องของพลังงานและควอนตัมพลังงานที่เรียกว่าโฟตอนของไอน์สไตน์ ทำให้ภายหลังนักวิทยาศาสตร์เริ่มให้ความสนใจที่จะศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ในระดับจุลภาคมากขึ้น ซึ่งฟิสิกส์ยุคเก่าไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์เหล่านี้ได้ ทำให้เกิดความรู้แขนงใหม่ขึ้นที่เรียกว่า ทฤษฎีควอนตัม (Quantum theory) ซึ่งเน้นที่จะศึกษาเกี่ยวกับอนุภาคขนาดเล็กในระดับอะตอม

ในปี ค.ศ. 1922 คอมป์ตัน (A. H. Compton) ได้ทำการทดลองโดยฉายรังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียวลงบนแท่งกราฟไฟท์ พบว่าจะมีรังสีเอกซ์กระเจิงออกมาเป็นมุมต่างๆ กับแนวเดิม โดยรังสีที่กระเจิงออกมานี้ส่วนหนึ่งมีความยาวคลื่นเท่าเดิมและอีกส่วนหนึ่งมีความยาวคลื่นมากกว่าเดิม ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton effect) หรือ การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) รังสีที่มีความยาวคลื่นมากกว่าเดิมนี้อาจจะไม่เป็นไปตามทฤษฎีฟิสิกส์ยุคเก่า คอมป์ตันอธิบายว่าแทนที่จะคิดว่ารังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ต้องคิดว่าเป็นโฟตอนซึ่งเป็นอนุภาคที่มีความเร็วเท่ากับความเร็แสงและมีพลังงานเท่ากับ  $h\nu$  การทดลองของคอมป์ตันแสดงให้เห็นว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแสดงคุณสมบัติเป็นอนุภาคได้

จากปรากฏการณ์การแผ่รังสีของวัตถุดำ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกและปรากฏการณ์คอมป์ตัน ทำให้ในปี ค.ศ. 1924 เดอบรอยล์ (Louis De Broglie) ได้เสนอทฤษฎีเกี่ยวกับทวิภาพของคลื่นและอนุภาค (Wave-Particle duality) ภายหลังทฤษฎีนี้ได้รับการสนับสนุนจากการทดลองของ เดวิสสัน (Clinton Davisson) กับ เจอร์เมอร์ (Lester Germer) และการทดลองของทอมสัน (Sir George Thomson)

ปัจจุบันแสงถือว่ามีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาค สำหรับคุณสมบัติทางอนุภาคจะใช้พิจารณาในเรื่องของอันตรกิริยาระหว่างแสงกับสสาร ส่วนคุณสมบัติทางคลื่นจะใช้พิจารณาในเรื่องของการเคลื่อนที่ของแสง ปรากฏการณ์แทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสง รวมทั้งปรากฏการณ์ทางทัศนศาสตร์กายภาพ (Physical optics)

## 2.2 หลักการเบื้องต้นทางแสง

### 2.2.1 ค่าดัชนีหักเห (Refractive index)

ในสุญญากาศแสงทุกความยาวคลื่นจะมีความเร็วประมาณ  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที แต่เมื่อแสงเดินทางเข้าไปในตัวกลางใดๆ ความเร็วของแสงจะเปลี่ยนไปและแสงจะเกิดการหักเหจากแนว

เดิม อัตราการกระจายของแสงกับตัวกลางมักจะแสงในรูปของค่าดัชนีหักเห โดยค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) คือ อัตราส่วนระหว่างความเร็วแสงในสุญญากาศ ( $c$ ) กับความเร็วของแสงในตัวกลางนั้นๆ ( $v$ )

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

ในสุญญากาศค่าดัชนีหักเหมีค่าเท่ากับ 1 แต่สำหรับตัวกลางใดๆ ค่าดัชนีหักเหจะมีค่ามากกว่า 1 เสมอ โดยค่าดัชนีหักเหของตัวกลางนอกจากจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกลางแล้วยังขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสงที่เดินทางผ่านตัวกลางนั้น สำหรับค่าดัชนีหักเหของตัวกลางต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าดัชนีหักเหของตัวกลางต่างๆ โดยวัดด้วยแสงความยาวคลื่น 589 นาโนเมตร

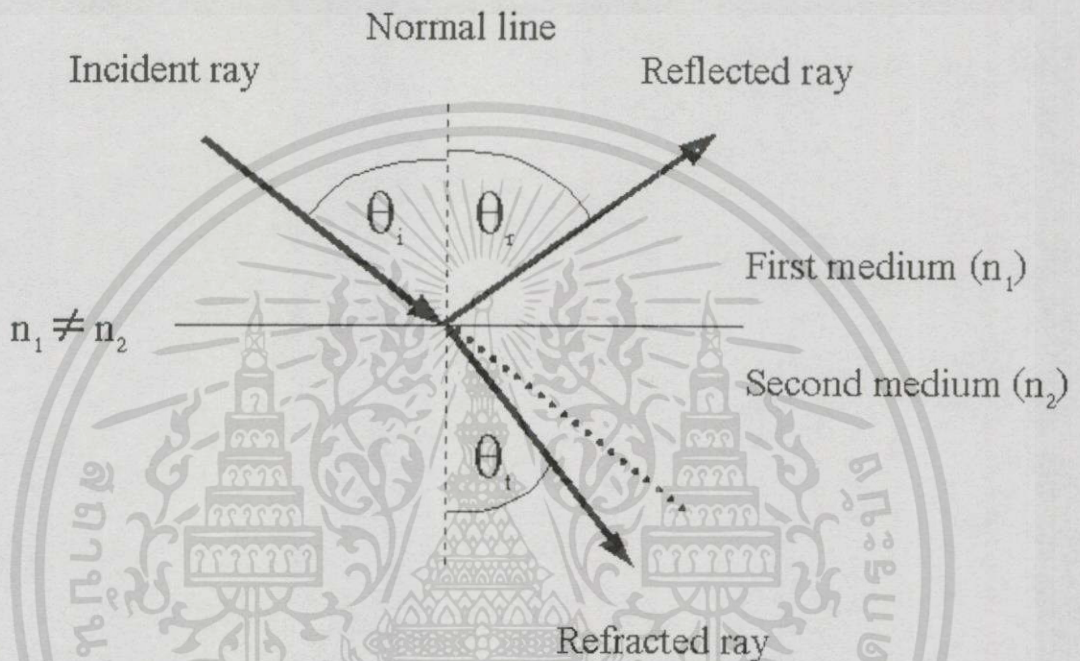
| Substance                    | Refractive index | Substance            | Refractive index |
|------------------------------|------------------|----------------------|------------------|
| Solids at 20° C              |                  | Liquids at 20° C     |                  |
| Diamond                      | 2.419            | Benzene              | 1.501            |
| Fluorite (CaF <sub>2</sub> ) | 1.434            | Carbon disulfide     | 1.628            |
| Silica (SiO <sub>2</sub> )   | 1.458            | Carbon tetrachloride | 1.461            |
| Glass, Crown                 | 1.520            | Ethyl alcohol        | 1.361            |
| Glass, Flint                 | 1.660            | Glycerine            | 1.473            |
| Ice (H <sub>2</sub> O)       | 1.309            | Water                | 1.333            |
| Polystyrene                  | 1.490            | Gases at 0° C, 1 atm |                  |
| Sodium chloride              | 1.544            | Air                  | 1.000293         |
| Zircon                       | 1.923            | Carbon dioxide       | 1.000450         |

ในตัวกลางเอกพันธ์ แสงจะมีความเร็วเท่ากันในทุกๆ จุดและทุกทิศทาง ความเร็วของแสงจะขึ้นอยู่กับตัวกลางที่แสงเดินทางผ่าน การที่ความเร็วแสงเปลี่ยนเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน จะทำให้เกิดปรากฏการณ์การสะท้อนและการหักเหของแสง

เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่หนึ่ง (First medium) ไปยังตัวกลางที่สอง (Second medium) ซึ่งมีค่าดัชนีหักเหต่างกัน แสงส่วนหนึ่งจะสะท้อนที่ผิวรอยต่อระหว่างตัวกลางทั้งสองกลับไปยังตัวกลางเดิมเรียกแสงส่วนนี้ว่ารังสีสะท้อน แสงอีกส่วนจะผ่านเข้าไปยังตัวกลางที่สองเรียกแสงส่วนนี้ว่ารังสีหักเห ดังรูปที่ 2.1

### 2.2.2 กฎการสะท้อน (Law of reflection)

จากการสะท้อนและการหักเหของแสงเมื่อเดินทางจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน จะพบว่ามุมตกกระทบ ( $\theta_i$ ) จะมีค่าเท่ากับมุมสะท้อน ( $\theta_r$ ) เสมอ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า กฎการสะท้อน



รูปที่ 2.1 แสดงการสะท้อนและการหักเหของแสงเมื่อเดินทางจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน เมื่อ Incident ray คือ รังสีตกกระทบ Reflected ray คือ รังสีสะท้อน Refracted ray คือ รังสีหักเห  $\theta_i$  คือ มุมตกกระทบ (Angle of incidence)  $\theta_r$  คือ มุมสะท้อน (Angle of reflection) และ  $\theta_t$  คือ มุมหักเห (Angle of refraction) โดยมุมต่างๆ เหล่านี้จะวัดจากเส้นปกติ (Normal line)

### 2.2.3 กฎการหักเห (Law of refraction) หรือกฎของสเนลล์ (Snell's law)

กฎการหักเหเป็นกฎที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหของตัวกลางทั้งสองกับมุมตกกระทบและมุมหักเหของแสง โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ

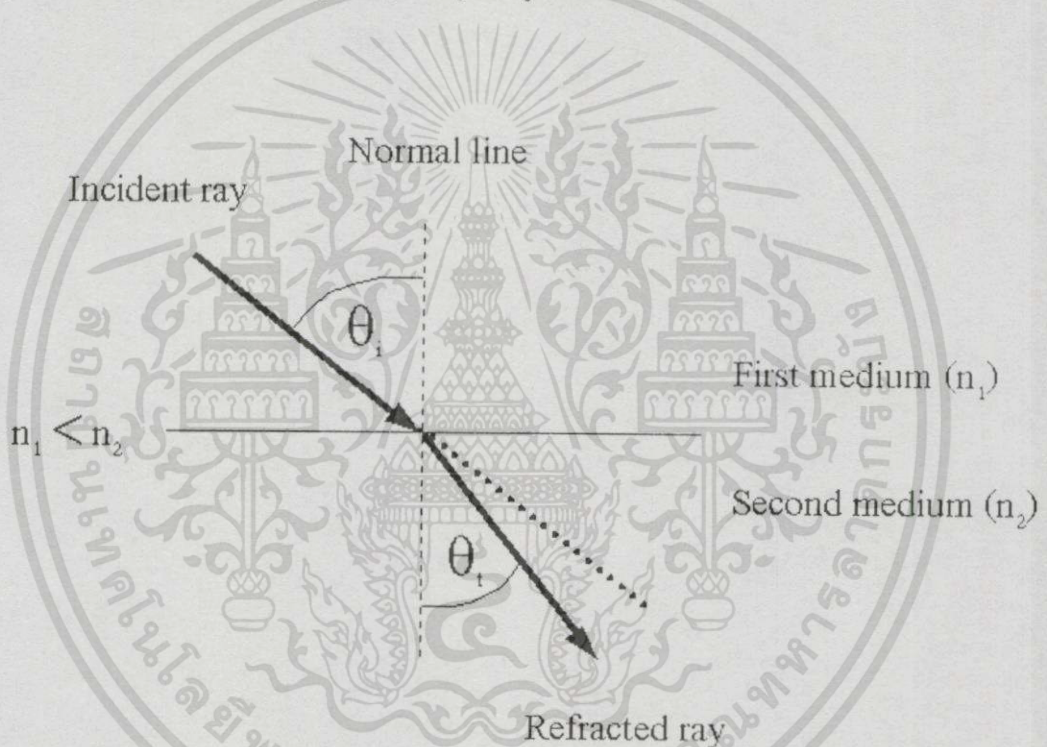
$$n_1 \sin(\theta_i) = n_2 \sin(\theta_t) \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

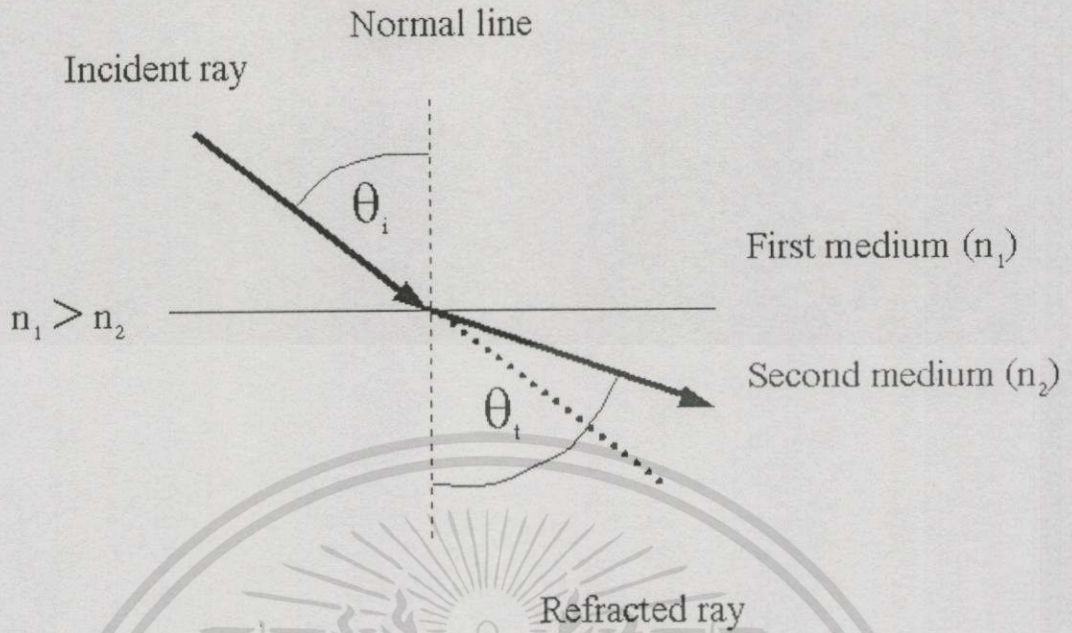
เมื่อแสงเดินทางไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหมากกว่า แสงจะหักเหจากแนวเดิมโดยเบนเข้าหาเส้นปกติดังรูปที่ 2.2 แต่เมื่อแสงเดินทางไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหน้อยกว่า แสงจะหักเหจากแนวเดิมโดยเบนออกจากเส้นปกติดังรูปที่ 2.3

#### 2.2.4 มุมวิกฤติ ( Critical angle )

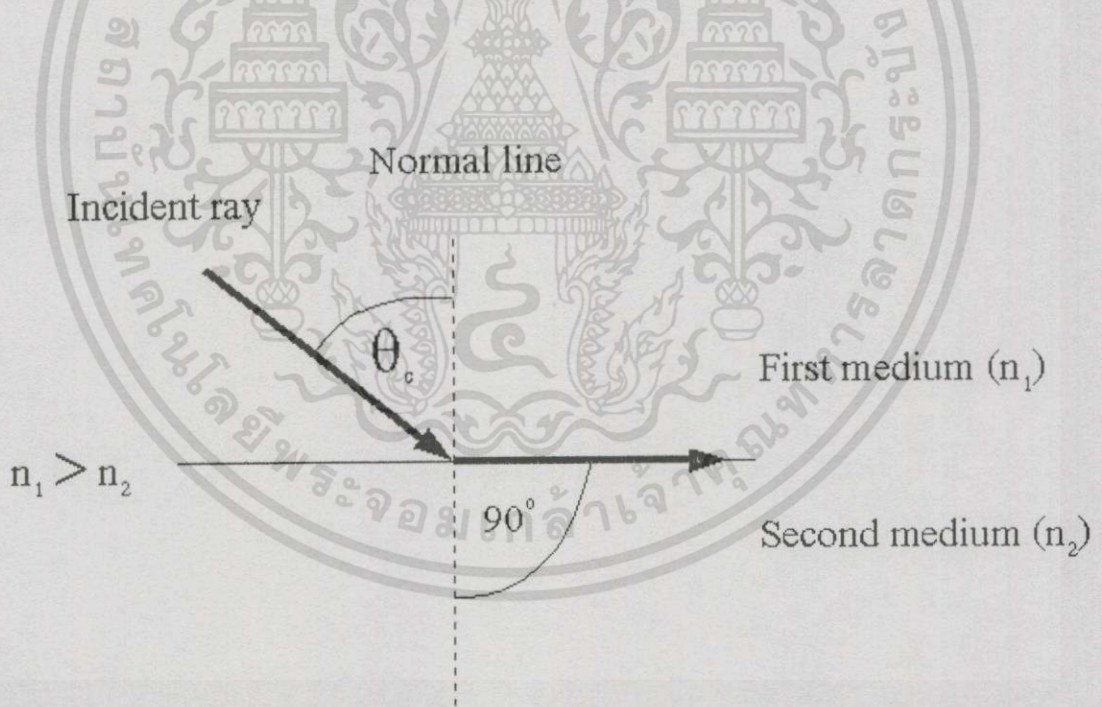
พิจารณากรณีที่แสงเดินทางไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหน้อยกว่า ( $n_1 > n_2$ ) ถ้ามุมตกกระทบ ( $\theta_i$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้มุมหักเห ( $\theta_r$ ) มีค่าเข้าใกล้มุม  $90^\circ$  ถ้ามุมหักเหมีค่าเท่ากับ  $90^\circ$  จะทำให้แสงหักเหขนานไปกับผิวรอยต่อระหว่างตัวกลางทั้งสอง เรียกมุมตกกระทบที่ทำให้มุมหักเหมีค่าเท่ากับ  $90^\circ$  ว่า มุมวิกฤติ ( $\theta_c$ ) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.2 แสดงการหักเหของแสงเมื่อเดินทางไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหมากกว่า



รูปที่ 2.3 แสดงการหักเหของแสงเมื่อเดินทางไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่า



รูปที่ 2.4 แสดงการหักเหของแสงที่ขนานไปกับผิวรอยต่อระหว่างตัวกลางทั้งสองเมื่อมุมตกกระทบมีค่าเท่ากับมุมวิกฤติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกฎของสเนลล์ เมื่อแทนค่ามุม  $\theta_1 = 90^\circ$  จะได้

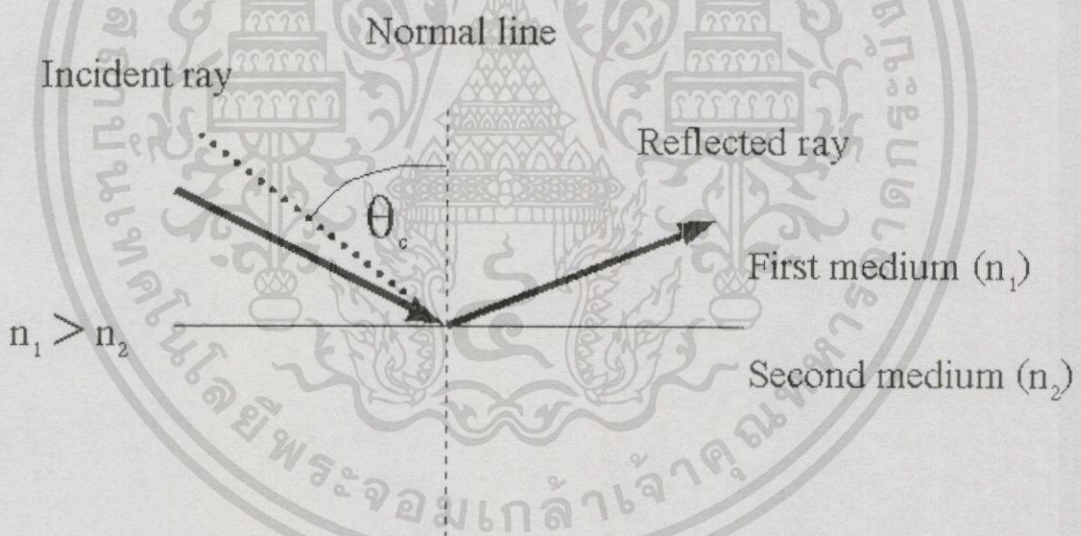
$$n_1 \sin(\theta_c) = n_2 \sin(90^\circ)$$

ดังนั้น มุมวิกฤติ คือ

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

### 2.2.5 การสะท้อนกลับหมดภายใน (Total internal reflection)

เมื่อแสงเดินทางไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่า ถ้ามุมตกกระทบมีค่ามากกว่ามุมวิกฤติ แสงจากตัวกลางที่หนึ่งจะสะท้อนกลับหมดทำให้ไม่มีแสงผ่านเข้าไปยังตัวกลางที่สอง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การสะท้อนกลับหมดภายใน ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการสะท้อนกลับหมดภายใน เมื่อแสงมีมุมตกกระทบมากกว่ามุมวิกฤติ

### 2.2.6 หลักของฮอยเกนส์ (Huygen's principle)

คลื่นจะมีหน้าคลื่นเป็นคลื่นระนาบหรือคลื่นทรงกลมมันจะขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดคลื่น เมื่อคลื่นเดินทางออกจากแหล่งกำเนิดคลื่น คลื่นจะเคลื่อนที่ไปเรื่อยๆ ครอบคลุมพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง แต่ถ้าคลื่นพบสิ่งกีดขวาง เช่น คลื่นเคลื่อนที่ผ่านรูเล็กๆ จะมีคลื่นส่วนน้อยที่เดินทางผ่านรูไปได้ การ

หาแอมพลิจูดและเฟสของคลื่นที่ผ่านรูไปได้นั้นทำได้ยาก จึงมีผู้คิดค้นวิธีการหาแอมพลิจูดและเฟสของคลื่นที่จุดใดๆ โดยคิดจากคลื่นเดิม วิธีการดังกล่าวเรียกว่า หลักของฮอยเกนส์

หลักของฮอยเกนส์เป็นวิธีทางเรขาคณิตที่ใช้หาหน้าคลื่นใหม่ โดยหลักของฮอยเกนส์กล่าวว่า “ทุกๆ จุดบนหน้าคลื่นอาจถือว่าเป็นต้นกำเนิดคลื่นอันใหม่ (Secondary wave) ซึ่งจะปล่อยคลื่นเล็กๆ ออกไปรอบๆ โดยคลื่นเล็กๆ จะมีอัตราเร็วและเฟสเท่ากับคลื่นเดิม”

### 2.3 หลักการซ้อนทับของคลื่น (Superposition principle)

พิจารณาการรวมกันของคลื่น 2 ขบวนที่มีการกระจัดอยู่ในแนวเดียวกัน (ไม่พิจารณาเทอมของการกระจัด) มีความถี่เชิงมุม ( $\omega$ ) และแอมพลิจูดเท่ากัน ถ้าให้คลื่นทั้งสองขบวนมีเฟสต่างกันเท่ากับ  $\phi$  ดังนั้นสมการของคลื่นทั้งสองขบวนเขียนได้คือ

$$E_1 = A_0 \cos(\omega t)$$

และ

$$E_2 = A_0 \cos(\omega t + \phi)$$

สมการของคลื่นรวม คือ

$$E = E_1 + E_2 = A_0 [\cos(\omega t) + \cos(\omega t + \phi)]$$

เขียนให้อยู่ในรูปของเอกซ์โพเนนเชียลเชิงซ้อนได้

$$E = A_0 (\text{Re}[e^{i\omega t}] + \text{Re}[e^{i(\omega t + \phi)}])$$

จาก

$$\begin{aligned} E \cdot E^* &= A_0 (\text{Re}[e^{i\omega t}] + \text{Re}[e^{i(\omega t + \phi)}]) \cdot A_0 (\text{Re}[e^{-i\omega t}] + \text{Re}[e^{-i(\omega t + \phi)}]) \\ &= A_0^2 (2 + \text{Re}[e^{i\phi} + e^{-i\phi}]) \\ &= 2A_0^2 (1 + \cos \phi) = 4A_0^2 \cos^2 \frac{\phi}{2} \end{aligned}$$

ดังนั้น แอมพลิจูดของคลื่นรวม คือ

$$A = 2A_0 \cos \frac{\phi}{2} \quad (2.4)$$

พิจารณาการรวมกันของคลื่น 2 ขบวนที่มีการกระจัดอยู่ในแนวเดียวกัน (ไม่พิจารณาเทอมของการกระจัด) มีแอมพลิจูดเท่ากันแต่ความถี่เชิงมุม ( $\omega$ ) ต่างกัน ถ้าให้คลื่นทั้งสองขบวนมีเฟสต่างกันเท่ากับ  $\phi$  ดังนั้นสมการของคลื่นทั้งสองขบวนเขียนได้ คือ

$$E_1 = A_0 \cos(\omega_1 t)$$

และ

$$E_2 = A_0 \cos(\omega_2 t + \phi)$$

สมการของคลื่นรวม คือ

$$E = E_1 + E_2 = A_0 [\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t + \phi)]$$

เขียนให้อยู่ในรูปของเอกซ์โพเนนเชียลเชิงซ้อนได้

$$E = A_0 (\text{Re}[e^{i\omega_1 t}] + \text{Re}[e^{i(\omega_2 t + \phi)}])$$

จาก

$$\begin{aligned} E \cdot E^* &= A_0 (\text{Re}[e^{i\omega_1 t}] + \text{Re}[e^{i(\omega_2 t + \phi)}]) \cdot A_0 (\text{Re}[e^{-i\omega_1 t}] + \text{Re}[e^{-i(\omega_2 t + \phi)}]) \\ &= A_0^2 (2 + \text{Re}[e^{i(\omega_1 - \omega_2)t - \phi}] + \text{Re}[e^{-i(\omega_1 - \omega_2)t - \phi}]) \\ &= 2A_0^2 (1 + \cos[(\omega_1 - \omega_2)t - \phi]) = 4A_0^2 \cos^2 \left[ \frac{(\omega_1 - \omega_2)t - \phi}{2} \right] \end{aligned}$$

ดังนั้น แอมพลิจูดของคลื่นรวม คือ

$$A = 2A_0 \cos \left[ \frac{(\omega_1 - \omega_2)t - \phi}{2} \right] \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาการรวมกันของคลื่น 2 ขบวนที่มีการกระจัดอยู่ในแนวเดียวกัน (ไม่พิจารณาเทอมของการกระจัด) มีความถี่เชิงมุม ( $\omega$ ) เท่ากันแต่แอมพลิจูดต่างกัน ถ้าให้คลื่นทั้งสองขบวนมีเฟสต่างกันเท่ากับ  $\phi$  ดังนั้นสมการของคลื่นทั้งสองขบวนเขียนได้ คือ

$$E_1 = A_1 \cos(\omega t)$$

และ

$$E_2 = A_2 \cos(\omega t + \phi)$$

สมการของคลื่นรวม คือ

$$E = E_1 + E_2 = A_1 \cos(\omega t) + A_2 \cos(\omega t + \phi)$$

เขียนให้อยู่ในรูปเอกซ์โพเนนเชียลเชิงซ้อน ได้

$$E = A_1 \operatorname{Re}[e^{i\omega t}] + A_2 \operatorname{Re}[e^{i(\omega t + \phi)}]$$

จาก

$$\begin{aligned} E \cdot E^* &= (A_1 \operatorname{Re}[e^{i\omega t}] + A_2 \operatorname{Re}[e^{i(\omega t + \phi)}]) \cdot (A_1 \operatorname{Re}[e^{-i\omega t}] + A_2 \operatorname{Re}[e^{-i(\omega t + \phi)}]) \\ &= A_1^2 + A_2^2 + A_1 A_2 \operatorname{Re}[e^{i\phi} + e^{-i\phi}] \\ &= A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos \phi \end{aligned}$$

ดังนั้น แอมพลิจูดของคลื่นรวม คือ

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos \phi} \quad (2.6)$$

พิจารณาการรวมกันของคลื่น 2 ขบวนที่มีการกระจัดอยู่ในแนวเดียวกัน (ไม่พิจารณาเทอมของการกระจัด) มีความถี่เชิงมุม ( $\omega$ ) และแอมพลิจูดต่างกัน ถ้าให้คลื่นทั้งสองขบวนมีเฟสต่างกันเท่ากับ  $\phi$  ดังนั้นสมการของคลื่นทั้งสองขบวนเขียนได้ คือ

$$E_1 = A_1 \cos(\omega_1 t)$$

และ

$$E_2 = A_2 \cos(\omega_2 t + \phi)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการของคลื่นรวม คือ

$$E = E_1 + E_2 = A_1 \cos(\omega_1 t) + A_2 \cos(\omega_2 t + \phi)$$

เขียนให้อยู่ในรูปเอกซ์โพเนนเชียลเชิงซ้อน ได้

$$E = A_1 \operatorname{Re}[e^{i\omega_1 t}] + A_2 \operatorname{Re}[e^{i(\omega_2 t + \phi)}]$$

จาก

$$\begin{aligned} E \cdot E^* &= (A_1 \operatorname{Re}[e^{i\omega_1 t}] + A_2 \operatorname{Re}[e^{i(\omega_2 t + \phi)}]) \cdot (A_1 \operatorname{Re}[e^{-i\omega_1 t}] + A_2 \operatorname{Re}[e^{-i(\omega_2 t + \phi)}]) \\ &= A_1^2 + A_2^2 + A_1 A_2 \operatorname{Re}[e^{i((\omega_1 - \omega_2)t - \phi)} + e^{-i((\omega_1 - \omega_2)t - \phi)}] \\ &= A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t - \phi] \end{aligned}$$

ดังนั้น แอมพลิจูดของคลื่นรวม คือ

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t - \phi]} \quad (2.7)$$

พิจารณาการรวมกันของคลื่น  $N$  ขบวนที่มีการกระจัดอยู่ในแนวเดียวกัน (ไม่พิจารณาเทอมของการกระจัด) มีความถี่เชิงมุม ( $\omega$ ) และแอมพลิจูดเท่ากัน ถ้าให้คลื่นข้างเคียงกันมีเฟสต่างกันเท่ากับ  $\phi$  ดังนั้นสมการของคลื่นทั้งหมดเขียนได้ คือ

$$\begin{aligned} E_1 &= E_0 e^{i\omega t} \\ E_2 &= E_0 e^{i(\omega t + \phi)} \\ E_3 &= E_0 e^{i(\omega t + 2\phi)} \\ &\vdots \\ E_N &= E_0 e^{i[\omega t + (N-1)\phi]} \end{aligned} \quad (2.8)$$

สมการของคลื่นรวม คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 E &= E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_N \\
 &= E_0 e^{i\omega t} + E_0 e^{i(\omega t + \phi)} + E_0 e^{i(\omega t + 2\phi)} + \dots + E_0 e^{i[\omega t + (N-1)\phi]} \\
 &= E_0 (e^{i\omega t} + e^{i(\omega t + \phi)} + e^{i(\omega t + 2\phi)} + \dots + e^{i[\omega t + (N-1)\phi]}) \\
 &= E_0 e^{i\omega t} (1 + e^{i\phi} + e^{i2\phi} + \dots + e^{i(N-1)\phi})
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

จากอนุกรมเรขาคณิต

$$(1 + e^{i\phi} + e^{i2\phi} + \dots + e^{i(N-1)\phi}) = \frac{e^{iN\phi} - 1}{e^{i\phi} - 1}$$

ดังนั้น สมการที่ (2.9) เขียนใหม่ได้

$$\begin{aligned}
 E &= E_0 e^{i\omega t} \left( \frac{e^{iN\phi} - 1}{e^{i\phi} - 1} \right) \\
 &= E_0 e^{i\omega t} \left( \frac{e^{\frac{iN\phi}{2}}}{e^{\frac{i\phi}{2}}} \left( \frac{e^{\frac{iN\phi}{2}} - e^{-\frac{iN\phi}{2}}}{e^{\frac{i\phi}{2}} - e^{-\frac{i\phi}{2}}} \right) \right) \\
 &= E_0 e^{i\omega t} \left( e^{\frac{i(N-1)\phi}{2}} \left( \frac{\sin\left(\frac{N\phi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)} \right) \right)
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

จากสมการที่ (2.10) สามารถหาความเข้มแสงได้ คือ

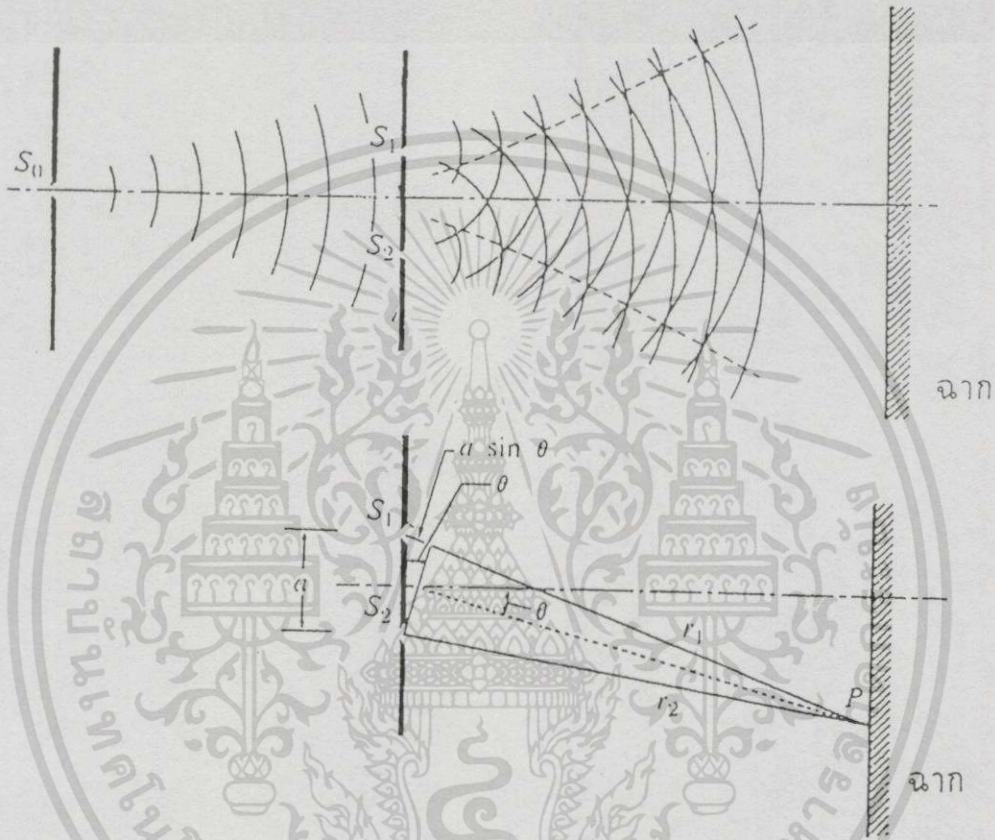
$$\begin{aligned}
 I &= A^2 = E \cdot E^* \\
 &= \left[ E_0 e^{i\omega t} \left( e^{\frac{i(N-1)\phi}{2}} \left( \frac{\sin\left(\frac{N\phi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)} \right) \right) \right] \cdot \left[ E_0 e^{-i\omega t} \left( e^{-\frac{i(N-1)\phi}{2}} \left( \frac{\sin\left(\frac{N\phi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)} \right) \right) \right] \\
 &= E_0^2 \left( \frac{\sin\left(\frac{N\phi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)} \right)^2
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

สมการที่ (2.11) เป็นความเข้มแสงของริ้วการแทรกสอดที่เกิดจากแสงจากแหล่งกำเนิดแสง  $N$  แหล่งที่ให้แสงที่มีความถี่เชิงมุมและแอมพลิจูดเท่ากัน ถ้าให้แสงข้างเคียงกันมีเฟสต่างกันเท่ากับ

$\phi$   
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การทดลองสลิตคู่ของยัง (Young's double slit experiment)

การทดลองของยังจะอาศัยหลักการแทรกสอดของแสงที่เรียกว่า การแทรกสอดชนิดแบ่งหน้าคลื่น (Wavefront division interferometry) เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองของยัง แสดงดังรูปที่ (2.6)



รูปที่ 2.6 การทดลองสลิตคู่ของยัง

ให้  $S_0$  เป็นแหล่งกำเนิดแสงสีเดียว  $S_1$  และ  $S_2$  เป็นช่องเล็กๆ ที่อยู่ห่างกันเท่ากับ  $a$  ถ้าให้หน้าคลื่นที่เกิดจาก  $S_0$  เคลื่อนไปถึง  $S_1$  และ  $S_2$  เป็นหน้าคลื่นเดียวกัน จากหลักของฮอยเกนส์ ทำให้  $S_1$  และ  $S_2$  ทำหน้าที่เสมือนเป็นแหล่งกำเนิดแสงอันใหม่ที่ให้แสงที่มีความถี่เท่ากันและเฟสตรงกัน ดังนั้น  $S_1$  และ  $S_2$  จึงทำหน้าที่เสมือนเป็นแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์

พิจารณาจุด  $P$  ซึ่งเป็นจุดที่อยู่บนฉากและเป็นตำแหน่งที่เกิดการแทรกสอด แม้ว่าแสงจาก  $S_1$  และ  $S_2$  จะมีเฟสตรงกัน แต่เมื่อแสงเดินทางไปพบกันที่จุด  $P$  อาจจะมีเฟสไม่ตรงกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผลต่างทางเดินของแสงจาก  $S_1$  และ  $S_2$  ไปยังจุด  $P$

จากรูปที่ 2.6 ผลต่างทางเดินของแสงจาก  $S_1$  และ  $S_2$  ไปยังจุด P คือ

$$r_1 - r_2 = a \sin \theta \quad (2.12)$$

จากสมการที่ (2.12) จะได้เงื่อนไขการเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน (Constructive Interference) คือ

$$a \sin \theta = m\lambda \quad (\text{where } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (2.13)$$

และเงื่อนไขการเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกัน (Destructive Interference) คือ

$$a \sin \theta = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad (\text{where } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (2.14)$$

การแทรกสอดแบบเสริมกันแอมพลิจูดของคลื่นจะเพิ่มขึ้นส่วนการแทรกสอดแบบหักล้างกันแอมพลิจูดของคลื่นจะลดลง

จากรูปที่ 2.6 ถ้าให้แสงสองขบวนที่มาแทรกสอดกันที่ฉากรับภาพเป็นดังสมการ

$$E_1 = A_1 \cos(\omega t - kr_1 + \alpha_1) \quad (2.15)$$

และ

$$E_2 = A_2 \cos(\omega t - kr_2 + \alpha_2) \quad (2.16)$$

เมื่อ  $\alpha_1$  และ  $\alpha_2$  เป็นเฟสเริ่มต้นของแสงที่เดินทางจาก  $S_1$  และ  $S_2$  ตามลำดับ

เนื่องจากเฟสเริ่มต้นของแสงทั้งสองขบวนตรงกัน ( $\alpha_1 = \alpha_2$ ) ดังนั้นความต่างเฟสของแสงทั้งสองขบวน คือ

$$\phi = k(r_1 - r_2) + (\alpha_1 - \alpha_2) = \frac{2\pi}{\lambda}(r_1 - r_2) \quad (2.17)$$

เมื่อ  $r_1 - r_2$  คือ ผลต่างทางเดินของแสงทั้งสองขบวน

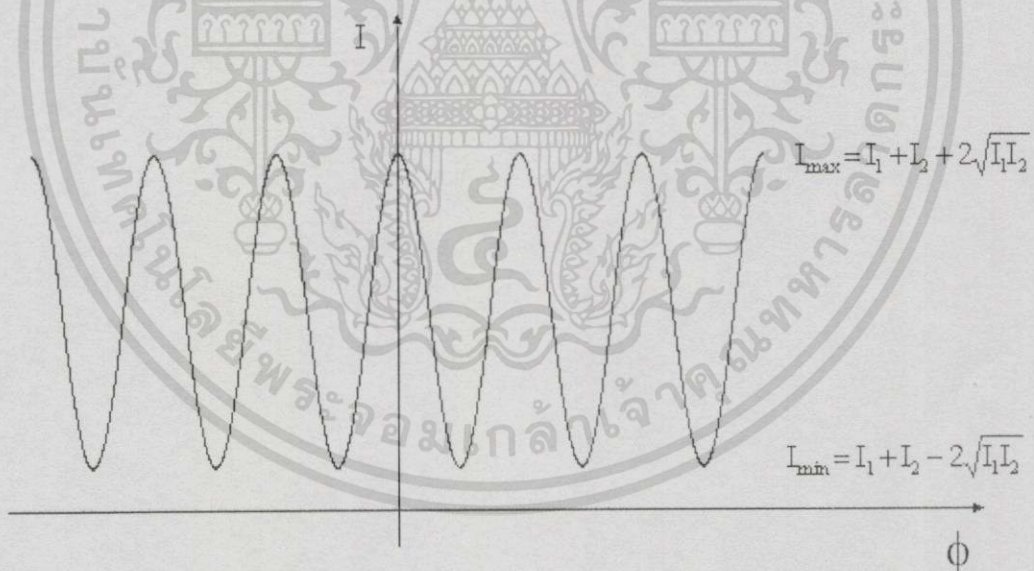
จากสมการที่ (2.6) จะได้แอมพลิจูดของคลื่นรวมที่เกิดจากคลื่นสองขบวนที่มีการกระจัดอยู่ในแนวเดียวกันและมีความถี่เชิงมุมเท่ากัน โดยคลื่นทั้งสองขบวนมีเฟสต่างกันเท่ากับ  $\phi$  คือ

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \phi} \quad (2.18)$$

เนื่องจากความเข้มแสงเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของแอมพลิจูด ดังนั้นสมการที่ (2.18) เขียนใหม่ คือ

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cos \phi \quad (2.19)$$

จากสมการที่ (2.19) จะเห็นว่า  $I$  มีค่ามากที่สุด ( $I_{\max}$ ) เมื่อ  $\phi = 2m\pi$  และ  $I$  มีค่าน้อยที่สุด ( $I_{\min}$ ) เมื่อ  $\phi = (2m + 1)\pi$  เมื่อ  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$  ดังนั้นเมื่อนำสมการที่ (2.19) ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง ( $I$ ) กับความต่างเฟสของแสง ( $\phi$ ) จะได้ดังรูปที่ 2.7

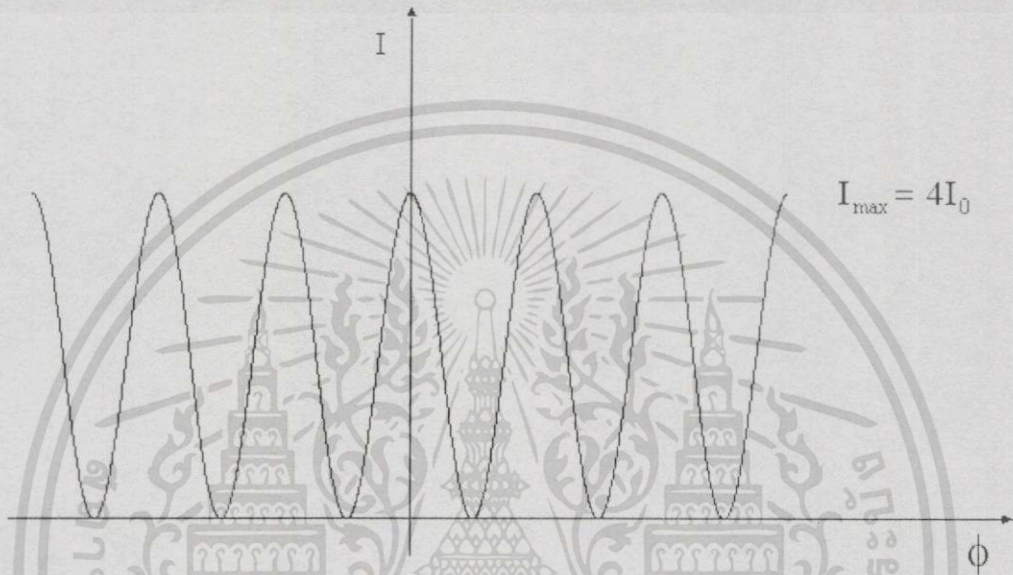


รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง ( $I$ ) กับความต่างเฟสของแสง ( $\phi$ )

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{\max}$  และ  $I_{\min}$  จะแสดงในรูปของความคมชัดของริ้วการแทรกสอด (Visibility หรือ Fringe contrast) โดยที่

$$\text{Visibility} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2.20)$$

ในกรณีที่  $I_1 = I_2 = I_0$  จะทำให้  $I_{\max} = 4I_0$  และ  $I_{\min} = 0$  เมื่อนำสมการที่ (2.19) ไปเขียนกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง ( $I$ ) กับความต่างเฟสของแสง ( $\phi$ ) ใหม่ จะได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง ( $I$ ) กับความต่างเฟสของแสง ( $\phi$ ) เมื่อแอมพลิจูดของแสงทั้งสองขบวนมีค่าเท่ากัน ( $I_1 = I_2$ ) ทำให้ความคมชัดของริ้วการแทรกสอดมีค่าสูงสุด

จากสูตร  $1 + \cos \theta = 2 \cos^2 \left( \frac{\theta}{2} \right)$  ดังนั้นสมการที่ (2.19) เขียนใหม่ได้

$$I = 2I_0 [1 + \cos \phi] = 2I_0 \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} (r_1 - r_2) \right) \right] \quad (2.21)$$

หรือ

$$I = 4I_0 \cos^2 \left( \frac{\phi}{2} \right) = 4I_0 \cos^2 \left( \frac{\pi}{\lambda} (r_1 - r_2) \right) \quad (2.22)$$

จากสมการที่ (2.21) และ (2.22) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับผลต่างทางเดินของแสงสองขบวนที่มาแทรกสอดกัน ซึ่งหลักการนี้จะนำไปใช้อธิบายการเกิดการแทรกสอด

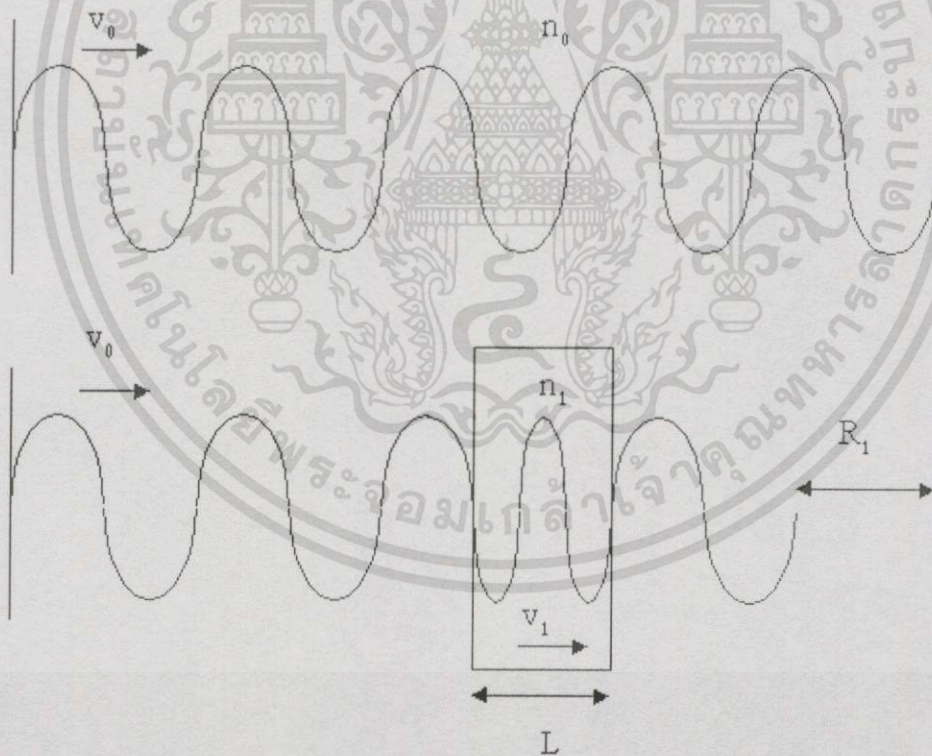
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแสงโดยใช้ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์และสามารถนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างทางเดินของแสง (หรือความเข้มแสง) กับปริมาณต่างๆ ในระบบตรวจวัดได้

## 2.5 หลักการของโฟโตอีลาสติก (Principle of photoelasticity)

โฟโตอีลาสติกเป็นปรากฏการณ์ทางแสงอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางในวัสดุโปร่งใสแบบยืดหยุ่น การศึกษาโฟโตอีลาสติกจะอาศัยปรากฏการณ์การหักเหสองแนวที่เกิดจากการให้แรงกระทำกับวัสดุ การให้แรงกระทำกับวัสดุจะทำให้ค่าดัชนีหักเหของวัสดุเปลี่ยนไป ผลคือความเร็วของแสงที่เดินทางในวัสดุเปลี่ยนไปด้วยเกิดผลต่างทางเดินของแสงที่เดินทางในวัสดุขณะให้แรงและไม่ให้แรงกระทำ จากผลต่างของทางเดินของแสงสามารถนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ให้กับวัสดุกับความเข้มแสงได้ ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

### 2.5.1 ความหน่วงสัมบูรณ์ (Absolute retardation)



รูปที่ 2.9 การเกิดความหน่วงสัมบูรณ์เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน

จากรูปที่ 2.9 เมื่อแสงความเร็ว  $v_0$  เดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเห  $n_0$  ผ่านเข้าไปยังวัสดุโปร่งใสที่มีความหนา  $L$  และมีค่าดัชนีหักเห  $n_1$  ความเร็วของแสงจะเปลี่ยนไปซึ่งหาได้จากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$v_1 = \frac{c}{n_1}$  เนื่องจากแสงทั้งสองเส้นทางมีความเร็วต่างกันทำให้แสงทั้งสองเดินทางได้ระยะทางต่างกัน เรียกผลต่างทางเดินของแสงทั้งสองเส้นทางว่า ความหน่วงสัมบูรณ์ โดยความหน่วงสัมบูรณ์ ( $R_1$ ) หาได้จาก

$$R_1 = \left( \frac{n_1 - n_0}{n_0} \right) L \quad (2.23)$$

### 2.5.2 การหักเหสองแนว (Birefringence)

การหักเหสองแนว เป็นปรากฏการณ์ที่มักเกิดกับวัสดุสมถกษณ์ (Anisotropic material) เนื่องจากความไม่สมมาตรของโครงสร้างผลึกในวัสดุนั้น ทำให้ค่าดัชนีหักเหตามแกนต่างๆ มีค่าไม่เท่ากัน เป็นผลทำให้เมื่อแสงเดินทางผ่านเข้าไปในวัสดุหักเหสองแนว (Birefringent material) แสงจะถูกแยกออกเป็นสองแนวซึ่งมีทิศของการโพลาไรซ์ตั้งฉากกัน โดยแสงแต่ละแนวจะมีความเร็วในการเคลื่อนที่ต่างกัน

วัสดุที่เกิดปรากฏการณ์การหักเหสองแนวขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น แคลไซต์ (Calcite :  $\text{CaO-CO}_2$ ) ควอตซ์ (Quartz) และ โซเดียมไนเตรด (Sodium nitrate :  $\text{NaNO}_3$ ) วัสดุบางชนิดสามารถแสดงปรากฏการณ์การหักเหสองแนวเมื่อถูกแรงกระทำ (หรือมีความเค้นเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ) เช่น แก้ว พลาสติก วัสดุยืดหยุ่น (Elastomers) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductors) และของไหล (fluids) เป็นต้น

### 2.5.3 ความหน่วงสัมพัทธ์ (Relative retardation)

เมื่อแสงเดินทางในวัสดุหักเหสองแนว แสงจะถูกแยกออกเป็นสองแนวซึ่งมีทิศของการโพลาไรซ์ โดยแต่ละแนวจะเดินทางด้วยความเร็วต่างกัน ทำให้เกิดความหน่วงสัมบูรณ์ขึ้นดังสมการ

$$R_1 = \left( \frac{n_1 - n_0}{n_0} \right) L \quad (2.24)$$

$$R_2 = \left( \frac{n_2 - n_0}{n_0} \right) L \quad (2.25)$$

เมื่อ  $R_1$  และ  $R_2$  คือ ความหน่วงสัมบูรณ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละแนวแกน

$n_1$  และ  $n_2$  คือ ค่าดัชนีหักเหของวัสดุในแนวแกนที่หนึ่งและสองตามลำดับ

$L$  คือ ความหนาของวัสดุ

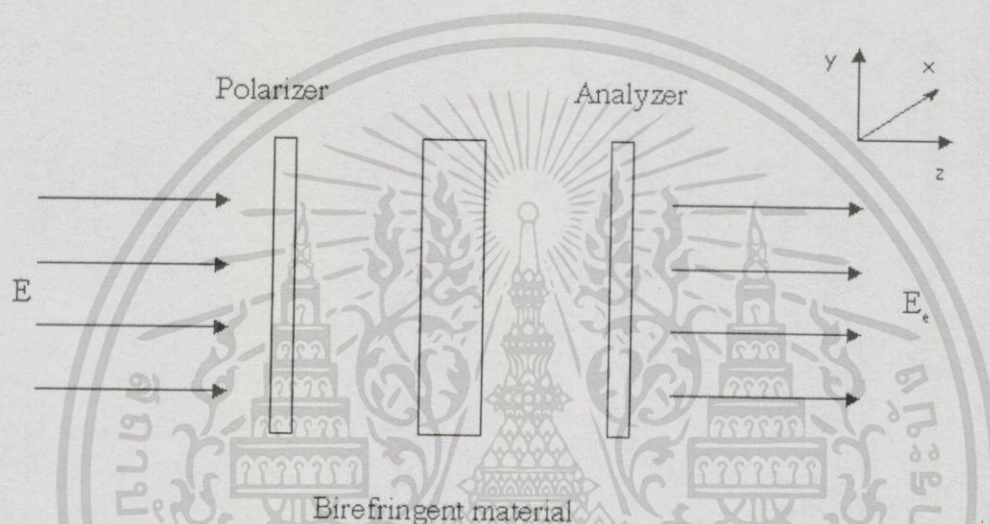
ผลต่างทางเดินของแสงทั้งสองแนว เรียกว่า ความหน่วงสัมพัทธ์ ( $R$ ) ซึ่งหาได้จาก  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = R_1 - R_2 = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_0} \right) L \quad (2.26)$$

#### 2.5.4 การแทรกสอดที่เกิดจากปรากฏการณ์การหักเหสองแนว

##### (Interferometric of birefringence)

ระบบที่ใช้ศึกษาการแทรกสอดที่เกิดจากปรากฏการณ์การหักเหสองแนว เมื่อแสงเดินทางผ่านเข้าไปในวัสดุหักเหสองแนว แสดงดังรูปที่ 2.11



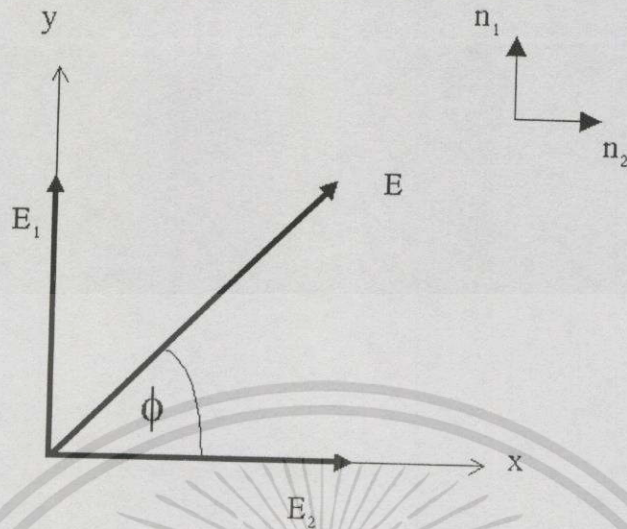
รูปที่ 2.11 ระบบที่ใช้ศึกษาการแทรกสอดที่เกิดจากปรากฏการณ์การหักเหสองแนว

พิจารณาแสงไม่โพลาไรซ์เคลื่อนที่ในทิศแกน  $+z$  ด้วยความเร็ว  $v$  มีสมการคือ

$$E = A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(z - vt)\right) \quad (2.27)$$

ให้โพลาไรเซอร์มีแกนส่งผ่านเอียงทำมุม  $\phi$  กับแกน  $x$  เมื่อแสงเดินทางผ่านเข้าไปในวัสดุหักเหสองแนวที่มีแกนหักเหหลัก (Principal refractive axes) อยู่ในแนวแกน  $y$  และแกน  $x$  ดังรูปที่ 2.12 แสงที่ผ่านเข้าไปในวัสดุหักเหสองแนวจะแยกออกเป็นสองส่วนที่มีทิศของการโพลาไรซ์ในแนวแกน  $y$  และแกน  $x$  โดยแสงทั้งสองแนวจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v_1$  และ  $v_2$  ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงการแยกออกเป็นสองแนวของแสงที่เดินทางผ่านเข้าไปในวัสดุหักเหสองแนว

สมการของแสงทั้งสองแนว คือ

$$E_1 = E \sin \phi = A \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (z - v_1 t) \right] \sin \phi \tag{2.28}$$

และ

$$E_2 = E \cos \phi = A \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (z - v_2 t) \right] \cos \phi \tag{2.29}$$

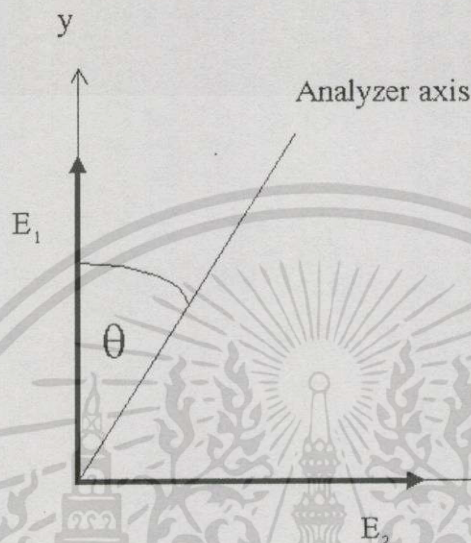
เมื่อแสงที่เดินทางในวัสดุหักเหสองแนว (แสงเดินทางในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน หรือเดินทางด้วยความเร็วต่างกัน) จะทำให้เกิดความหน่วงสัมบูรณ์ขึ้นในทั้งสองแนวของแสง ดังสมการ

$$E_1 = A \cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} \left[ z - vt - \left( \frac{n_1 - n_0}{n_0} \right) L \right] \right\} \sin \phi \tag{2.30}$$

และ

$$E_2 = A \cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} \left[ z - vt - \left( \frac{n_2 - n_0}{n_0} \right) L \right] \right\} \cos \phi \tag{2.31}$$

เมื่อแสงทั้งสองแนวเดินทางออกจากวัสดุหักเหสองแนวแล้วเดินทางผ่านอนาไลเซอร์ (Analyzer) ที่มีแกนส่งผ่านเอียงทำมุม  $\theta$  กับแกน  $y$  ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงแสงทั้งสองแนวที่เดินทางออกจากวัสดุหักเหสองแนวและกำลังจะผ่านอนาไลเซอร์ (Analyzer) ที่มีแกนส่งผ่านเอียงทำมุม  $\theta$  กับแกน  $y$

แสงที่เดินทางออกจากอนาไลเซอร์คือ

$$E_c = E_1 \cos \theta + E_2 \sin \theta \quad (2.32)$$

แทนค่าสมการที่ (2.30) และ (2.31) ลงในสมการที่ (2.32) จะได้

$$E_c = A \cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} \left[ z - vt - \left( \frac{n_1 - n_0}{n_0} \right) L \right] \right\} \sin \phi \cos \theta + A \cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} \left[ z - vt - \left( \frac{n_2 - n_0}{n_0} \right) L \right] \right\} \cos \phi \sin \theta \quad (2.33)$$

สมการที่ (2.33) เรียกว่า สมการโฟโตอีลาสติก (Photoelastic equations) สำหรับแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับความเค้น

การให้แรงกดกับวัสดุโปร่งใสแบบยืดหยุ่นจะทำให้วัสดุประพฤติตัวเป็นวัสดุหักเหสองแนว เมื่อแสงเดินทางผ่านเข้าไปในวัสดุหักเหสองแนวจะทำให้เกิดความหน่วงสัมบูรณ์ขึ้นในทั้งสองแนวของแสง ความหน่วงสัมบูรณ์ของแสงทั้งสองแนวสามารถเขียนในเทอมของความเค้นได้คือ

$$R_1 = (C_1\sigma_1 + C_2\sigma_2)L \quad (2.34)$$

และ

$$R_2 = (C_2\sigma_1 + C_1\sigma_2)L \quad (2.35)$$

หรือเขียนในรูปของความหน่วงสัมพัทธ์ได้ดังสมการ

$$R = C_\sigma(\sigma_1 - \sigma_2)L \quad (2.36)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ ความเค้น (Stress) มีค่าเท่ากับ  $\frac{F}{A}$  (แรง / พื้นที่หน้าตัด)

$C_\sigma$  คือ สัมประสิทธิ์ความเค้นทางแสง (Stress optic coefficient) มีค่าเท่ากับ  $C_1 - C_2$

$C_1$  และ  $C_2$  คือ สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นสัมบูรณ์ทางแสง (Absolute photoelastic coefficients)

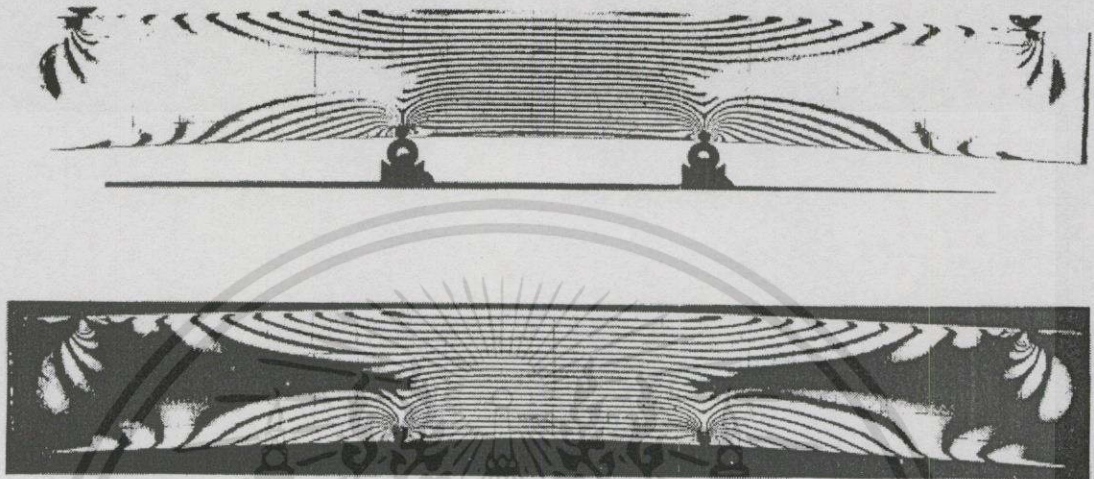
ความหน่วงสัมพัทธ์ของแสงทั้งสองแนวที่เกิดจากปรากฏการณ์การหักเหสองแนวก็คือ ผลต่างทางเดินของแสง ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับผลต่างทางเดินของแสง (ความหน่วงสัมพัทธ์) เขียนได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} I &= 2I_0 \left\{ 1 + \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{n_1 - n_2}{n_0} \right) L \right] \right\} \\ &= 2I_0 \left\{ 1 + \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) C_\sigma L \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.37)$$

หรือ

$$\begin{aligned} I &= 4I_0 \cos^2 \left[ \frac{\pi}{\lambda} \left( \frac{n_1 - n_2}{n_0} \right) L \right] \\ &= 4I_0 \cos^2 \left[ \frac{\pi}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) C_\sigma L \right] \end{aligned} \quad (2.38)$$

จากสมการที่ (2.38) เมื่อนำฉากมารับภาพจะเห็นริ้วการแทรกสอดที่เกิดจากปรากฏการณ์การหักเหสองแนวตั้งรูปที่ 2.14 โดยระยะห่างระหว่างแถบมืด-สว่างของริ้วการแทรกสอดจะขึ้นอยู่กับแรงที่กระทำกับวัสดุหรือความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ



รูปที่ 2.14 แสดงริ้วการแทรกสอดของแสงที่เดินทางออกจากวัสดุที่ได้รับแรงกระทำหรือเกิดความเค้นขึ้นในเนื้อวัสดุ

## 2.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยซึ่งได้แก่ ประวัติความเป็นมาของแสงและการค้นพบทฤษฎีต่างๆ ในอดีตที่เกี่ยวข้องกับแสง หลักการเบื้องต้นทางแสง เช่น การหาค่าดัชนีหักเห กฎการสะท้อน กฎการหักเหหรือกฎของสเนลล์ มุมวิกฤติ การสะท้อนกลับหมดภายใน เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงหลักการซ้อนทับของคลื่นในกรณีต่างๆ การทดลองสลิตคู่ของยังซึ่งเป็นที่มาของหลักการแทรกสอดของแสง ในหัวข้อสุดท้ายได้กล่าวถึงหลักการของโฟโตอีลาสติกซึ่งเป็นปรากฏการณ์ทางแสงที่เกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางในวัสดุโปร่งใสแบบยืดหยุ่นและปรากฏการณ์การหักเหสองแนวที่เกิดจากการให้แรงกระทำกับวัสดุ

### บทที่ 3

## อุปกรณ์และหลักการทำงานเบื้องต้น

ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยและหลักการทำงานเบื้องต้นของอุปกรณ์ ซึ่งได้แก่ ใยแก้วนำแสงและเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 3.1 รายชื่อของวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ให้แสงโหมดเดียว ชนิดโพลาไรซ์เชิงเส้น กำลัง 1 มิลลิวัตต์
- 2) ใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเตปอินเด็กซ์
- 3) อุปกรณ์เชื่อมต่อใยแก้วนำแสงหลายโหมด (Multimode fiber coupler) พร้อมตัวจับ (Fiber chuck)
- 4) ตัวจับใยแก้วนำแสง (Fiber positioner) ชนิด Microblock™ fiber launch kit
- 5) ชูตไมโครมิเตอร์ (Micrometer) พร้อมแท่นจับ
- 6) กระจกเงาวงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร
- 7) อุปกรณ์ปรับระดับกระจก (Kinematic mirror mount)
- 8) แท่นวางอุปกรณ์ทางแสง (Optical baseplate)
- 9) ตัวแยกลำแสง (Beamsplitter)
- 10) แท่นวางตัวแยกลำแสง (Beamsplitter base)
- 11) ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)
- 12) อุปกรณ์รับแสง (Photodetector)
- 13) แหล่งกำเนิดกระแส (Power supply) ให้ไฟกระแสตรง 12 โวลต์
- 14) ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ (Function generator)
- 15) ลำโพง (Speaker)
- 16) ตูมน้ำหนัก (Calibration masses)
- 17) วัสดุ อะรัลไดรท์ (Araldite) และ เพอร์สเปกซ์ (Perspex)

## 3.2 โยแก้วนำแสง (Fiber optics)

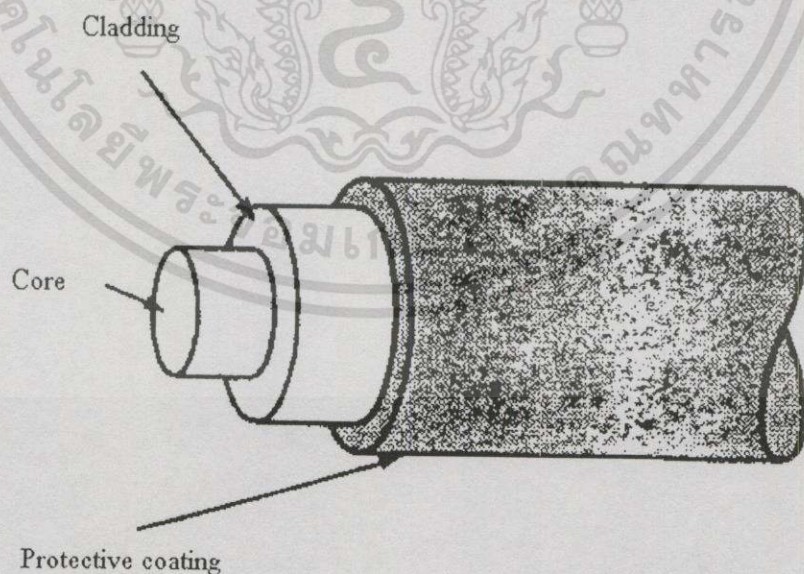
### 3.2.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของใยแก้วนำแสง

ส่วนประกอบที่สำคัญของใยแก้วนำแสงแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ

แกน (Core) เป็นส่วนที่อยู่ในส่วนกลางและเป็นส่วนแกนของใยแก้วนำแสง แสงส่วนใหญ่จะเดินทางในส่วนนี้ โดยทั่วไปแกนจะมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.48 ซึ่งมากกว่าส่วนที่เป็นเคลดดิ้ง เพราะต้องคำนึงถึงกฎการหักเหและการสะท้อนกลับหมดภายในของแสงที่เดินทางอยู่ในแกน ส่วนขนาดของแกนจะขึ้นอยู่กับชนิดของใยแก้วนำแสง โดยใยแก้วนำแสงโหมคเดียวจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนประมาณ 2-10  $\mu\text{m}$  ส่วนใยแก้วนำแสงหลายโหมคจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนประมาณ 50  $\mu\text{m}$

เคลดดิ้ง (Cladding) จะอยู่ถัดจากแกนออกมาเป็นส่วนห่อหุ้มแกนอีกชั้นหนึ่ง โดยทั่วไปมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.46 เคลดดิ้งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดภายใน ทำให้แสงยังคงเดินทางในแกนของใยแก้วนำแสงได้ นอกจากนี้เคลดดิ้งยังเป็นส่วนป้องกันไม่ให้แสงจากภายนอกเข้าสู่ใยแก้วนำแสงและกันแสงจากใยแก้วนำแสงออกสู่ภายนอก ขนาดของเคลดดิ้งจะขึ้นอยู่กับชนิดของใยแก้วนำแสง

ส่วนห่อหุ้มชั้นนอก (Protective coating) เป็นส่วนที่ป้องกันแสงจากภายนอกเข้าสู่ใยแก้วนำแสงและป้องกันแสงจากใยแก้วนำแสงออกสู่ภายนอก นอกจากนี้ยังเป็นส่วนห่อหุ้มใยแก้วนำแสงไม่ให้ได้รับความเสียหายจากสิ่งแวดล้อมภายนอก ใยแก้วนำแสงบางชนิดจะมีส่วนห่อหุ้มชั้นนอกหลายชั้น ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่นำไปใช้



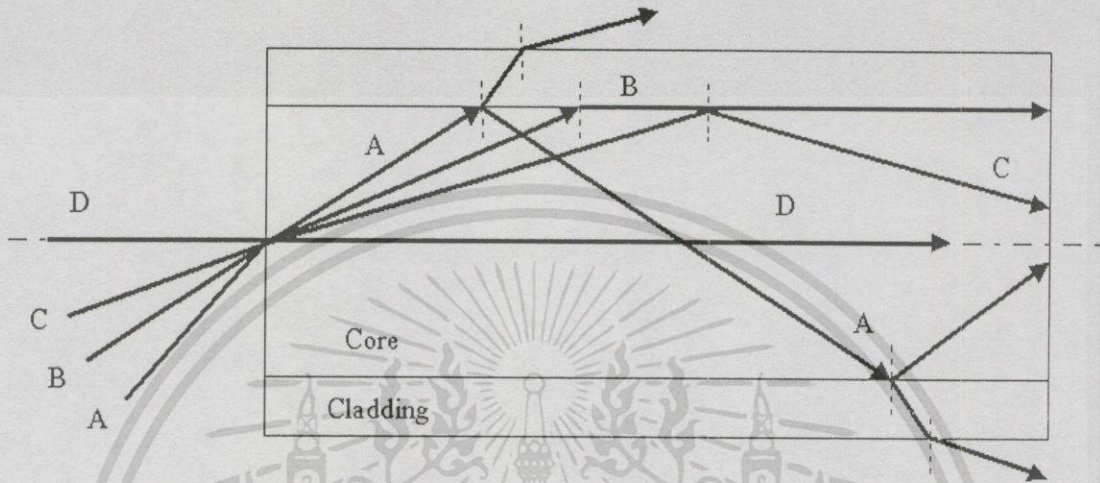
รูปที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของใยแก้วนำแสงคือ แกน เคลดดิ้ง และส่วนห่อหุ้มชั้นนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 ลักษณะของแสงที่แพร่กระจายในใยแก้วนำแสง

#### (Light Propagation in Fiber Optic)

ลักษณะของแสงที่แพร่กระจายในใยแก้วนำแสงส่วนใหญ่จะมีอยู่ 4 ลักษณะ ดังรูปที่ 3.2

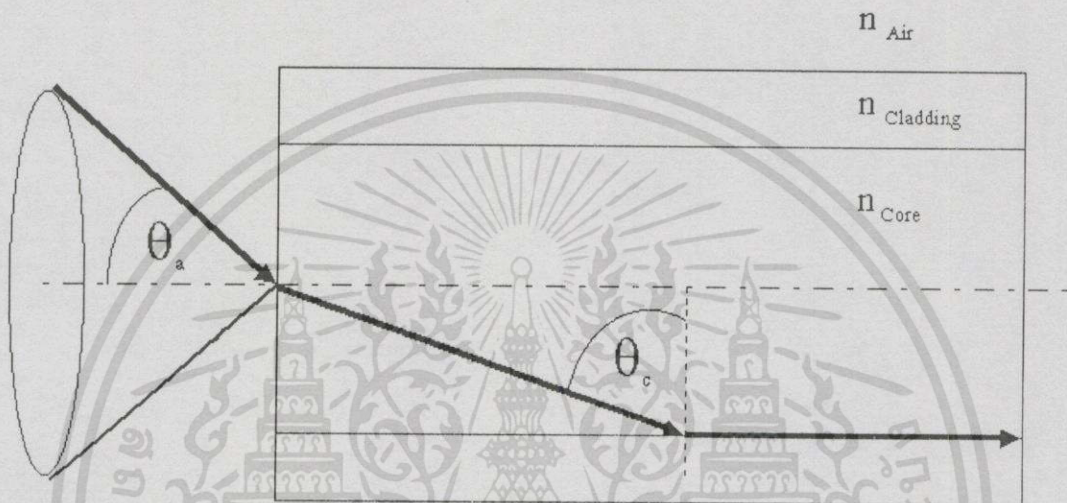


รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของแสงที่แพร่กระจายในใยแก้วนำแสง

จากรูปที่ 3.2 ลักษณะของแสงที่แพร่กระจายในใยแก้วนำแสงมีอยู่ 4 ลักษณะคือ ลำแสง A จะมีมุมตกกระทบมากกว่ามุมรองรับแสง ( $2\theta_c$ ) ของใยแก้วนำแสง เมื่อลำแสง A หักเหเข้าไปยังแกนจะมีมุมหักเหมาก เมื่อลำแสง A ตกกระทบที่ผิวรอยต่อระหว่างแกนกับเคลดคิงจะมีมุมตกกระทบน้อยกว่ามุมวิกฤต ทำให้มีแสงส่วนหนึ่งสะท้อนกลับมายังแกนและแสงอีกส่วนหนึ่งหักเหเข้าไปยังเคลดคิงซึ่งแสงส่วนนี้อาจจะสะท้อนที่ผิวนอกของเคลดคิงกลับเข้ามายังแกนอีกหรืออาจมีแสงบางส่วนหักเหออกไปภายนอกใยแก้วนำแสง ซึ่งในกรณีนี้ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานของแสงที่แพร่กระจายในใยแก้วนำแสง ลำแสง B จะมีมุมตกกระทบเท่ากับมุมรองรับแสง เมื่อลำแสง B หักเหเข้าไปยังแกนลำแสงส่วนที่ตกกระทบที่ผิวรอยต่อระหว่างแกนกับเคลดคิงจะมีมุมตกกระทบเท่ากับมุมวิกฤต ทำให้ไม่มีแสงหักเหเข้าไปยังเคลดคิงลำแสง B ส่วนใหญ่จึงเดินทางขนานไปกับผิวรอยต่อระหว่างแกนกับเคลดคิง ลำแสง C จะมีมุมตกกระทบน้อยกว่ามุมรองรับแสง เมื่อลำแสง C หักเหเข้าไปยังแกนจะทำให้ลำแสง C ที่ตกกระทบที่ผิวรอยต่อระหว่างแกนกับเคลดคิงมีมุมตกกระทบมากกว่ามุมวิกฤต ทำให้ลำแสง C ทั้งหมดเดินทางอยู่ภายในแกนของใยแก้วนำแสง ส่วนลำแสง D จะเป็นลำแสงที่ถูกฉายเข้าไปยังแกนโดยตรง (มุมตกกระทบเท่ากับศูนย์) ทำให้ลำแสง D ทั้งหมดเดินทางขนานไปกับแนวแกนกลางของใยแก้วนำแสง ลักษณะการแพร่กระจายของลำแสง C และ D จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานของแสงน้อยที่สุด

### 3.2.3 มุมรองรับแสง (Acceptance angle)

มุมรองรับแสง ( $2\theta_a$ ) คือ มุมที่ฉายแสงเข้าไปยังแกนของใยแก้วนำแสงแล้วทำให้แสงที่ตกกระทบที่ผิวรอยต่อระหว่างแกนกับแคลคดิงมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับมุมวิกฤติ เป็นผลทำให้แสงสามารถเดินทางภายในแกนของใยแก้วนำแสงได้ ถ้ามองในลักษณะ 3 มิติ มุมรองรับแสงก็คือ กรวยรองรับแสง (Acceptance cone) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงมุมรองรับแสงและกรวยรองรับแสงของใยแก้วนำแสง

จากกฎของสเนลล์

$$n_{\text{Air}} \sin(\theta_a) = n_{\text{Core}} \sin(90^\circ - \theta_c)$$

$$\sin(\theta_a) = n_{\text{Core}} \cos(\theta_c)$$

$$\theta_a = \sin^{-1}\left(n_{\text{Core}} \sqrt{1 - \sin^2(\theta_c)}\right) \quad (3.1)$$

พิจารณาที่ผิวรอยต่อระหว่างแกนกับแคลคดิงจากกฎของสเนลล์ จะได้

$$n_{\text{Core}} \sin(\theta_c) = n_{\text{Cladding}} \sin(90^\circ)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sin(\theta_c) = \frac{n_{\text{Cladding}}}{n_{\text{Core}}} \quad (3.2)$$

แทนค่าสมการที่ (3.2) ลงในสมการที่ (3.1) ได้

$$\theta_a = \sin^{-1} \left( n_{\text{Core}} \sqrt{1 - \left( \frac{n_{\text{Cladding}}}{n_{\text{Core}}} \right)^2} \right)$$

$$\theta_a = \sin^{-1} \left( \sqrt{n_{\text{Core}}^2 - n_{\text{Cladding}}^2} \right) \quad (3.3)$$

จากสมการที่ (3.3) จะเห็นว่ามุมรองรับแสง ( $2\theta_a$ ) ขึ้นอยู่กับผลต่างของค่าดัชนีหักเห ระหว่างแกนกับเคลดดิ้ง โยแก้วนำแสงที่มีผลต่างของค่าดัชนีหักเหระหว่างแกนกับเคลดดิ้งมากจะทำให้มีมุมรองรับแสงมาก นั่นคือสามารถป้อนแสงเข้าสู่แกนของโยแก้วนำแสงได้มาก

### 3.2.4 ผลต่างค่าดัชนีหักเหสัมพัทธ์ (Relative refractive index difference)

ผลต่างค่าดัชนีหักเหสัมพัทธ์ ( $\Delta$ ) เป็นปริมาณที่แสดงความแตกต่างของค่าดัชนีหักเห ระหว่างแกนและเคลดดิ้งซึ่งมีค่าตั้งสมการ

$$\Delta = \frac{n_{\text{Core}} - n_{\text{Cladding}}}{n_{\text{Core}}} \quad (3.4)$$

ผลต่างค่าดัชนีหักเหสัมพัทธ์เป็นอีกปริมาณหนึ่งที่ใช้บอกความสามารถในการป้อนแสงเข้าสู่โยแก้วนำแสง โดยถ้าผลต่างค่าดัชนีหักเหสัมพัทธ์มีค่ามากแสดงว่าสามารถป้อนแสงเข้าสู่แกนของโยแก้วนำแสงได้มาก

### 3.2.5 นิวมอริคัลอะเพอร์เจอร์ (Numerical aperture)

นิวมอริคัลอะเพอร์เจอร์ (NA) เป็นปริมาณที่บอกถึงความสามารถในการรับแสง (Light - collecting ability) ของโยแก้วนำแสง ซึ่งมีค่าตั้งสมการ

$$\begin{aligned} \text{NA} &= n_{\text{Air}} \sin(\theta_a) \\ &= \sqrt{n_{\text{Core}}^2 - n_{\text{Cladding}}^2} \end{aligned} \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิวเมอริกัลอะเพอร์เจอร์ สามารถเขียนในเทอมของผลต่างค่าดัชนีหักเหสัมพัทธ์ ได้ดังนี้ จากสมการที่ (3.5) เขียนใหม่ ได้

$$\begin{aligned} NA &= \sqrt{(n_{\text{Core}}^2 - n_{\text{Cladding}}^2)} \\ &= n_{\text{Core}} \sqrt{\frac{(n_{\text{Core}} + n_{\text{Cladding}})(n_{\text{Core}} - n_{\text{Cladding}})}{n_{\text{Core}}^2}} \end{aligned}$$

เนื่องจากค่าดัชนีหักเหของแกนและเคลดคิงมีค่าใกล้เคียงกัน

ดังนั้นจะประมาณได้ว่า

$$n_{\text{Core}} + n_{\text{Cladding}} \approx 2n_{\text{Core}} \quad \text{นั่นคือ}$$

$$NA = n_{\text{Core}} \sqrt{\frac{(2n_{\text{Core}})(n_{\text{Core}} - n_{\text{Cladding}})}{n_{\text{Core}}^2}}$$

$$NA = n_{\text{Core}} \sqrt{2\Delta}$$

(3.6)

ถ้า NA มีค่ามากแสดงว่าใยแก้วนำแสงสามารถรับแสงได้มากหรือมีมุมรองรับแสงมาก ทำให้แสงสามารถเดินทางในแกนของใยแก้วนำแสงได้มาก

### 3.2.6 ความถี่นอร์มอลไลซ์ (Normalized frequency) หรือวี - นัมเบอร์ (V - number)

ความถี่นอร์มอลไลซ์เป็นปริมาณที่บอกถึงจำนวนโหมดของแสงที่สามารถเดินทางในใยแก้วนำแสงได้ ซึ่งมีค่าดังสมการ

$$V = \left(2\pi \frac{a}{\lambda}\right) NA \quad (3.7)$$

เมื่อ a คือ รัศมีของแกนและ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นแสง

ถ้าความถี่นอร์มอลไลซ์มีค่าน้อยกว่า 2.405 จะมีเฉพาะแสงโหมดเดียว (Single mode) เท่านั้นที่สามารถเดินทางในแกนของใยแก้วนำแสงได้ แต่ถ้าความถี่นอร์มอลไลซ์มีค่ามากกว่า 2.405 แสงที่เดินทางในแกนของใยแก้วนำแสงจะมีหลายโหมด (Multimode) หรือหลายเส้นทางเดิน

จำนวนโหมดของแสงที่สามารถเดินทางในใยแก้วนำแสงชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ (Number of mode in step - index fiber) หาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N = \frac{V^2}{2} \quad (3.8)$$

จำนวนโหมดของแสงที่สามารถเดินทางในใยแก้วนำแสงชนิดเกรดอินเด็กซ์ (Number of mode in graded index fiber) หาได้จาก

$$N = \frac{V^2}{4} \quad (3.9)$$

### 3.2.7 ชนิดของใยแก้วนำแสง (Types of optical fiber)

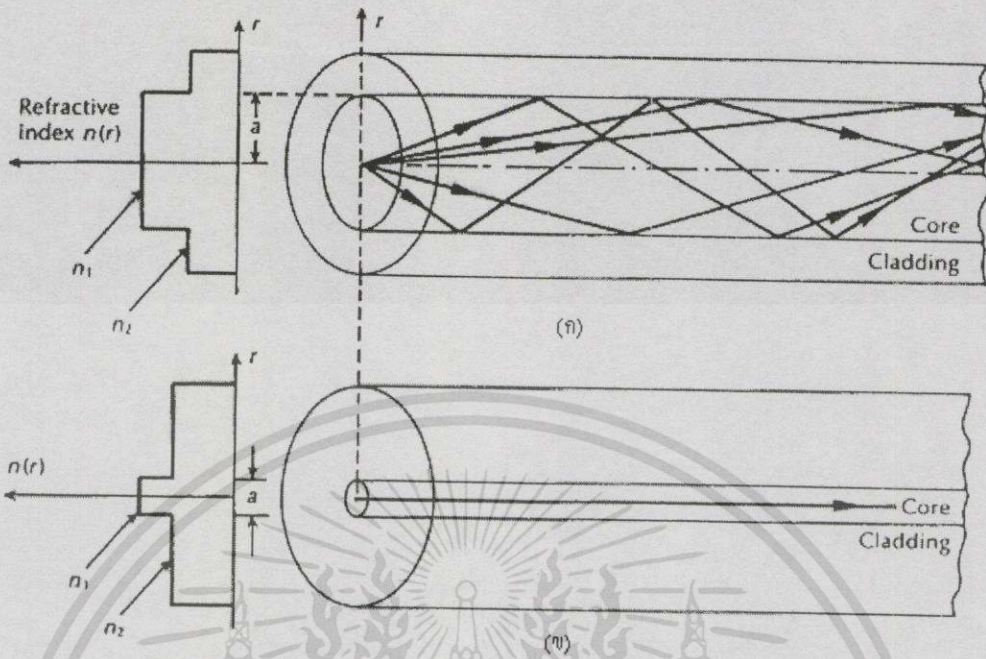
#### 3.2.7.1 ใยแก้วนำแสงชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ (Step - index fiber)

แกนและเคลดคิงของใยแก้วนำแสงจะมีค่าดัชนีหักเหคงที่ โดยแกนจะมีค่าดัชนีหักเหมากกว่าเคลดคิง การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหระหว่างแกนกับเคลดคิงจะมีลักษณะเป็นแบบสเต็ปหรือแบบขั้น ซึ่งค่าดัชนีหักเหของใยแก้วนำแสงชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ จะนำไปตามสมการที่ (3.10)

$$n(r) = \begin{cases} n_1 & ; r < a \text{ (Core)} \\ n_2 & ; r \geq a \text{ (Cladding)} \end{cases} \quad (3.10)$$

ใยแก้วนำแสงโหมดเดียวชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ (Single - mode fiber หรือ Monomode step - index fiber) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนและเคลดคิงประมาณ 2 -10 และ 125  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ เนื่องจากแกนมีขนาดเล็กมากทำให้มีแสงเพียงโหมดเดียวเท่านั้นที่สามารถเดินทางภายในแกนได้ ข้อดีของใยแก้วนำแสงโหมดเดียวคือ การกระจาย (Dispersion) ของสัญญาณแสงเกิดขึ้นได้ยากกว่า ใยแก้วนำแสงหลายโหมด (Multimode fiber) ทำให้พัลส์ของสัญญาณแสงผิดเพี้ยนจากสัญญาณอินพุตน้อยมาก ใยแก้วนำแสงโหมดเดียวจะมีแบนด์วิดท์ที่กว้างกว่าใยแก้วนำแสงหลายโหมด ข้อเสียของใยแก้วนำแสงโหมดเดียวคือแกนมีขนาดเล็กมากทำให้ยากต่อการป้อนแสง (Launching) เข้าใยแก้วนำแสง

ใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ (Multimode step - index fiber) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนและเคลดคิงประมาณ 50 และ 125  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ เนื่องจากแกนของใยแก้วนำแสงมีขนาดใหญ่ ทำให้แสงที่หักเหเข้ามาในแกนมีมุมตกกระทบที่ฉิวรอยต่อระหว่างแกนกับเคลดคิงแตกต่างกันหลายค่า จากหลักการสะท้อนกลับหมดภายในทำให้แสงที่เดินทางในแกนเป็นแสงหลายโหมดหรือหลายเส้นทางเดิน ดังรูปที่ 3.4



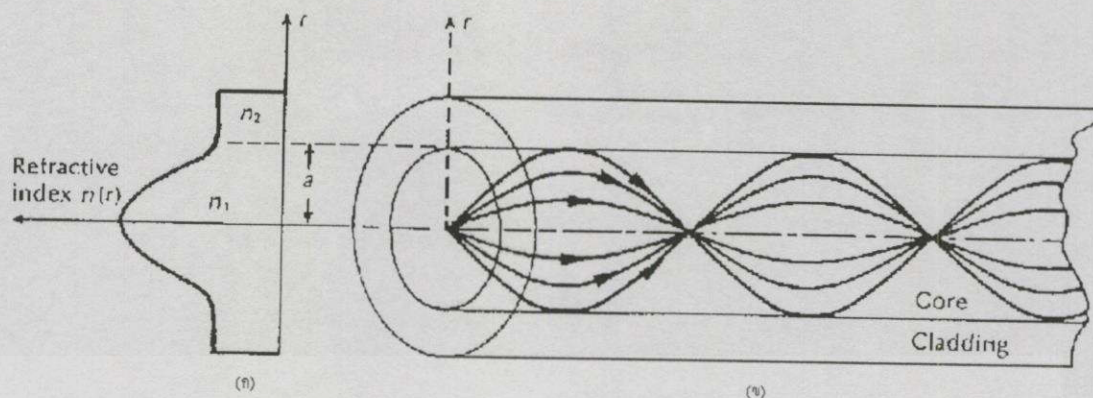
รูปที่ 3.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหระหว่างแกนกับเคลือบและลักษณะของแสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ (ก) และใยแก้วนำแสงโหมดเดียวชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ (ข)

3.2.7.2 ใยแก้วนำแสงชนิดเกรดอินเด็กซ์ (Graded - index fiber)

ค่าดัชนีหักเหของแกนมีค่าไม่คงที่และมีค่าลดลงตามรัศมีของแกนดังสมการที่ (3.11)

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^2} & ; r < a \text{ (Core)} \\ n_1 \sqrt{1 - 2\Delta} = n_2 & ; r \geq a \text{ (Cladding)} \end{cases} \quad (3.11)$$

ใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดเกรดอินเด็กซ์ (Multimode graded - index fiber) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนและเคลือบประมาณ 50 และ 125  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ ใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดเกรดอินเด็กซ์แสดงดังรูปที่ 3.5



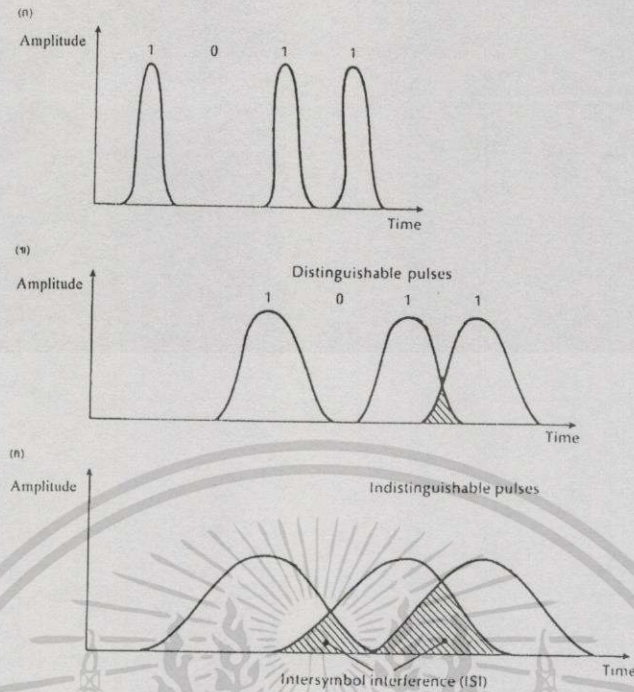
รูปที่ 3.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหระหว่างแกนกับแคลสดิ่งของใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดเกรดอินเด็กซ์ (ก) และลักษณะของแสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสงแสงหลายโหมดชนิดเกรดอินเด็กซ์ (ข)

### 3.2.8 การกระจาย (Dispersion)

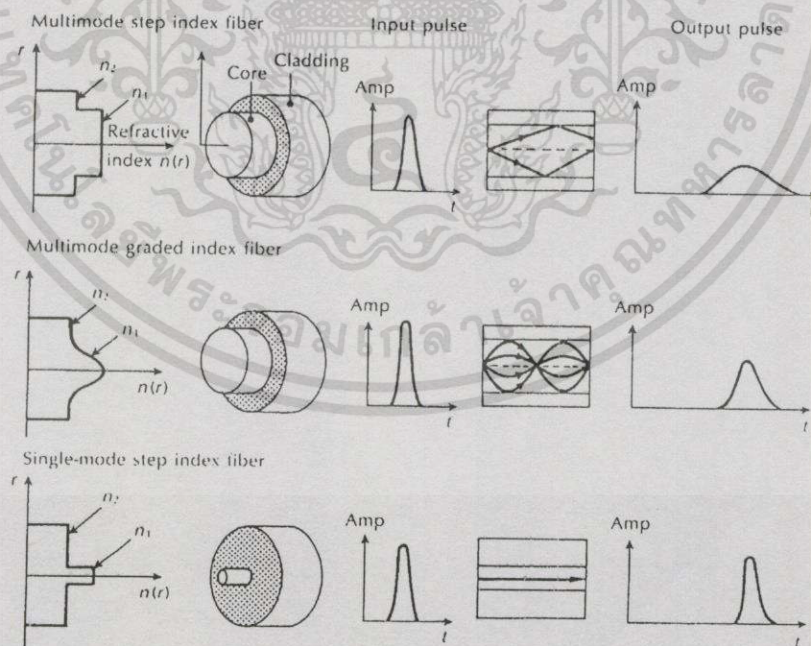
การกระจายเป็นการขยายกว้างออก (Broadening หรือ Distortion) ของสัญญาณแสง (Optical signal) ที่เดินทางในใยแก้วนำแสงกล่าวคือ เมื่อป้อนแสงที่เป็นพัลส์ (Light pulses) เข้าที่ปลายข้างหนึ่งของใยแก้วนำแสง แสงที่ออกจากปลายอีกข้างจะมีความกว้างของพัลส์เพิ่มขึ้นจากเดิม

เมื่อส่งสัญญาณ 1101 รูปพัลส์เดินทางในใยแก้วนำแสงดังรูปที่ 3.6 (ก) จากผลของการกระจายทำให้ความกว้างของพัลส์มีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 3.6 (ข) พัลส์จะเกิดการซ้อนกัน (Overlaps) กับพัลส์ข้างเคียงเกิดการซ้อนทับกันของสัญญาณ (Intersymbol interference : ISI) ทำให้พัลส์ที่ออกจากใยแก้วนำแสงมีลักษณะเป็นพัลส์ที่ไม่สามารถแยกความแตกต่างได้ (Indistinguishable pulses) ดังรูปที่ 3.6 (ค)

จากคุณสมบัติของใยแก้วนำแสงโหมดเดียวชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ ใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์และใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดเกรดอินเด็กซ์ ขนาดของแกนกับแคลสดิ่งของใยแก้วนำแสงแต่ละชนิดและจำนวนโหมดของแสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสง ซึ่งทั้งหมดจะมีผลต่อการเกิดการกระจายของสัญญาณแสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสง จะพบว่าสัญญาณแสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสงโหมดเดียวชนิดสเต็ปอินเด็กซ์จะมีการกระจายของสัญญาณแสงน้อยที่สุด ส่วนใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์จะทำให้เกิดการกระจายของสัญญาณแสงมากที่สุดดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 แสดงการเกิดการซ้อนทับกันของสัญญาณและพัลส์ที่ไม่สามารถแยกความแตกต่างได้ เนื่องจากการกระจายของแสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสง



รูปที่ 3.7 การกว้างออกของพัลส์ที่เกิดจากใยแก้วนำแสงชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ การกระจายเชิงความยาวคลื่นและการกระจายเชิงโหมด

### 3.2.8.1 การกระจายเชิงความยาวคลื่น (Wavelength dispersion หรือ Chromatic dispersion หรือ Intramodal dispersion)

การกระจายเชิงความยาวคลื่นเกิดขึ้นกับใยแก้วนำแสงทุกชนิด เนื่องจากความยาวคลื่นแสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้มีลักษณะเป็นแถบกว้างของสเปกตรัมความยาวคลื่น (Wavelength spectrum width) คือให้แสงที่มีหลายความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกัน ทำให้แสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสงมีความเร็วต่างกัน ผลคือเวลาที่แสงใช้ในการเดินทางมาถึงปลายใยแก้วนำแสงจะต่างกัน เกิดการล่าช้าทางเวลา (Time delay) หรือการกว้างออกของพัลส์ (Pulse broadening) ขึ้น การกระจายเชิงความยาวคลื่นแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ การกระจายเชิงวัสดุและการกระจายเชิงท่อนำคลื่น

#### 3.2.8.1.1 การกระจายเชิงวัสดุ (Material dispersion)

การกระจายเชิงวัสดุเกิดขึ้นเนื่องจากค่าดัชนีหักเหของแกนมีการเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นของแสงที่เดินทางผ่าน ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (3.12)

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda f}{v} \quad (3.12)$$

ถ้าแสงที่มาจากแหล่งกำเนิดแสงเช่น LED หรือ LD มีความยาวคลื่นไม่คงที่ค่าเดียว แต่เป็นแถบกว้างของสเปกตรัมความยาวคลื่น (มีหลายความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกัน) ดังนั้นถ้าความยาวคลื่นของแสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสงเปลี่ยน ค่าดัชนีหักเหของแกนก็จะเปลี่ยนตามทำให้ความเร็วของแสงในแต่ละความยาวคลื่นมีค่าไม่เท่ากัน แสงที่เดินทางไปถึงปลายใยแก้วนำแสงจะใช้เวลาต่างกัน การกระจายเชิงวัสดุหาได้ดังนี้

ให้การล่าช้าทางเวลา (Time delay :  $t_M$ ) ที่เกิดจากการกระจายเชิงวัสดุของพัลส์ที่เดินทางในใยแก้วนำแสงความยาว  $L$  คือ

$$t_M = \frac{L}{c} \left( n_{\text{Core}} - \lambda \frac{dn_{\text{Core}}}{d\lambda} \right) \quad (3.13)$$

ถ้าแหล่งกำเนิดแสงให้แสงที่มีความกว้างสเปกตรัม (Spectral width) เท่ากับ  $\sigma_\lambda$  และความยาวคลื่นกลาง (Central wavelength :  $\lambda$ ) ดังนั้นการกว้างออกของพัลส์ที่เกิดจากการกระจายเชิงวัสดุ ( $\sigma_M$ ) คือ

$$\sigma_M \approx \sigma_\lambda \left( \frac{dt_M}{d\lambda} \right) \quad (3.14)$$

จากสมการที่ (3.13) หาอนุพันธ์ของ  $t_M$  เทียบกับ  $\lambda$  ได้

$$\frac{dt_M}{d\lambda} = - \left( \frac{L\lambda}{c} \right) \left( \frac{d^2 n_{Core}}{d\lambda^2} \right) \quad (3.15)$$

แทนสมการที่ (3.15) ลงในสมการที่ (3.14) จะได้การกว้างออกของพัลส์ที่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของแกนเทียบกับความยาวคลื่นของแสง คือ

$$\sigma_M \approx \frac{\sigma_\lambda L}{c} \left| \lambda \frac{d^2 n_{Core}}{d\lambda^2} \right| \quad (3.16)$$

### 3.2.8.1.2 การกระจายเชิงท่อนำคลื่น (Waveguide dispersion) หรือการกระจายเชิงโครงสร้าง (Structure dispersion)

การกระจายเชิงท่อนำคลื่นเกิดขึ้นเนื่องจากโครงสร้างของใยแก้วนำแสงเช่น ใยแก้วนำแสงที่มีค่าผลต่างค่าดัชนีหักเหสัมพัทธ์ ( $\Delta$ ) น้อย ทำให้เมื่อแสงตกกระทบที่ผิวรอยต่อระหว่างแกนกับแคลดดิ้งจะมีแสงส่วนหนึ่งหักเหเข้าไปในแคลดดิ้งทำให้ทางเดินของแสงมีค่าเพิ่มขึ้น ผลคือระยะทางที่แสงเดินทางได้จะต่างกันทำให้เวลาที่แสงใช้ในการเดินทางในใยแก้วนำแสงไม่เท่ากันเกิดการล่าช้าทางเวลาขึ้น สำหรับการกว้างออกของพัลส์ที่เกิดจากการกระจายเชิงท่อนำคลื่น ( $\sigma_w$ ) หาได้จากสมการที่ (3.17)

$$\sigma_w \approx \frac{\sigma_\lambda L}{c} \left| \lambda \frac{d^2 n_{Eff}}{d\lambda^2} \right| \quad (3.17)$$

เมื่อ  $n_{Eff}$  คือ ค่าดัชนีหักเหเชิงผล (Effective refractive index) มีค่าเท่ากับ  $n_{Core} \sin(\theta_i)$

โดยที่

$$\theta_c < \theta_i < 90^\circ$$

และ

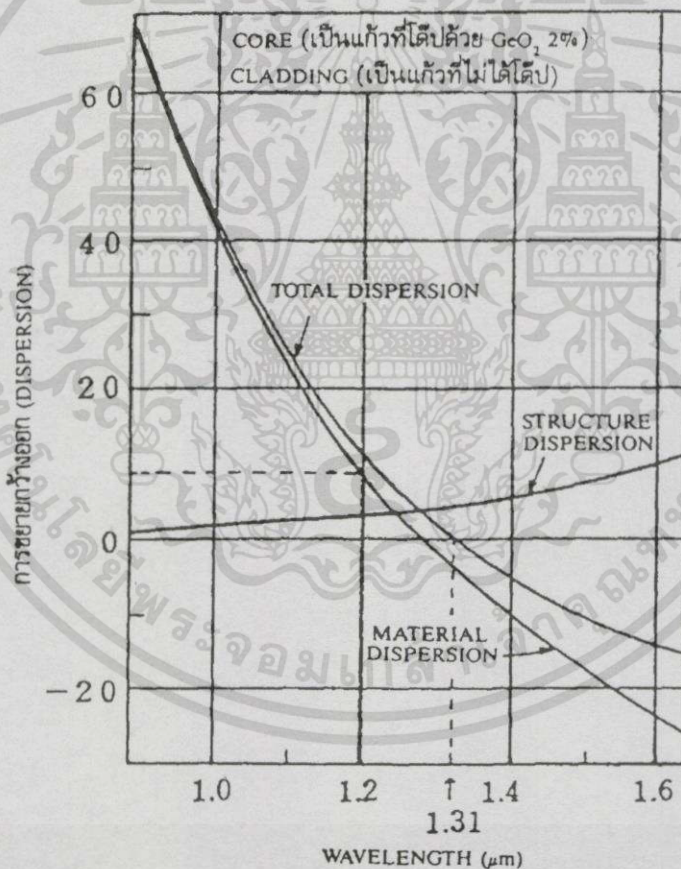
$$n_{Cladding} < n_{Eff} < n_{Core}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปถ้าความยาวคลื่นของแสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสงมีค่ามาก จะทำให้อัตราการหักเหของแสงเข้าไปในแคลดดิ้งมีค่ามากขึ้นด้วย

เนื่องจากการกระจายเชิงวัสดุและการกระจายเชิงท่อนำคลื่นต่างขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสง ดังนั้นเรียกการกระจายทั้งสองรวมกันว่า การกระจายเชิงความยาวคลื่น (Wavelength dispersion หรือ Chromatic dispersion)

จากรูปที่ 3.8 จะเห็นว่าถ้าให้แสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ  $1.31 \mu\text{m}$  เดินทางในใยแก้วนำแสง จะทำให้การกระจายเชิงวัสดุและการกระจายเชิงท่อนำคลื่นหักล้างกันหมด ผลคือการกระจายเชิงความยาวคลื่นมีค่าเป็น 0 นั่นหมายความว่าจะไม่มีการขยายกว้างออกของสัญญาณแสง เรียกความยาวคลื่นนี้ว่า ความยาวคลื่นซีโรดิสเพอร์ชัน (Zero dispersion wavelength)



รูปที่ 3.8 การกระจายเชิงความยาวคลื่นที่เกิดในใยแก้วนำแสงชนิดสเตปอินเด็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

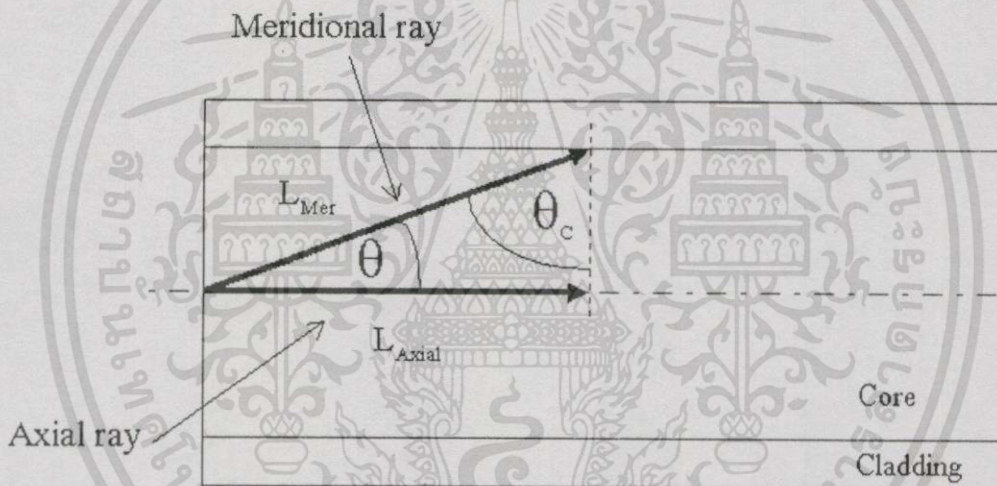
### 3.2.8.2 การกระจายเชิงโหมด (Mode dispersion หรือ Intermodal dispersion)

การกระจายเชิงโหมดเกิดขึ้นเฉพาะในใยแก้วนำแสงหลายโหมด เนื่องจากโหมดต่างๆ ของแสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสงมีเส้นทางการเดินทางที่ต่างกัน ทำให้เวลาที่ใช้ในการเดินทางมาถึงปลายใยแก้วนำแสงต่างกันด้วย จึงเกิดการล่าช้าทางเวลาหรือการกว้างออกของพัลส์ขึ้น

การกระจายเชิงโหมดจะไม่ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ แต่จะขึ้นอยู่กับชนิดและโครงสร้างของใยแก้วนำแสง สำหรับใยแก้วนำแสงโหมดเดียวจะไม่เกิดการกระจายเชิงโหมด

#### 3.2.8.2.1 การกระจายเชิงโหมดในใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์

พิจารณาทางเดินของแสงทั้งสองเส้นทางคือ รังสีตามแกน (Axial ray) และรังสีเมริเดียน (Meridional ray) ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงทางเดินของรังสีตามแกนและรังสีเมริเดียนในใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์

จากรูปที่ 3.9 ระยะทางที่รังสีตามแกนเดินทางได้จะเท่ากับความยาวของใยแก้วนำแสง ( $L$ )

$$L_{\text{Axial}} = L \quad (3.18)$$

ระยะทางที่รังสีเมริเดียนเดินทางได้ หาได้จากกฎของสเนลล์

$$\sin(\theta_c) = \frac{L_{\text{Axial}}}{L_{\text{Mer}}} = \frac{n_{\text{Cladding}}}{n_{\text{Core}}}$$

$$L_{\text{Mer}} = L_{\text{Axial}} \left( \frac{n_{\text{Core}}}{n_{\text{Cladding}}} \right) = L \left( \frac{n_{\text{Core}}}{n_{\text{Cladding}}} \right) \quad (3.19)$$

ดังนั้นผลต่างทางเดิน (Total path length difference) ของแสงทั้งสองเส้นทาง คือ

$$\delta L = L_{\text{Mer}} - L_{\text{Axial}} = L \left( \frac{n_{\text{Core}}}{n_{\text{Cladding}}} - 1 \right) \quad (3.20)$$

เนื่องจากแสงทั้งสองเดินทางด้วยความเร็วเท่ากัน (ในแกนของใยแก้วนำแสงเดียวกัน) แต่เดินทางได้ระยะทางต่างกัน แสดงว่าแสงทั้งสองใช้เวลาในการเดินทางไปถึงปลายใยแก้วนำแสงต่างกัน

ดังนั้น เวลาที่แสงทั้งสองใช้ต่างกัน (Time delay) คือ

$$\begin{aligned} \delta t_s &= \frac{\delta L}{v} = \left( \frac{n_{\text{Core}} L}{c} \right) \left( \frac{n_{\text{Core}}}{n_{\text{Cladding}}} - 1 \right) \\ &= \left( \frac{n_{\text{Core}} L}{c} \right) \left( \frac{\Delta}{1 - \Delta} \right) \end{aligned} \quad (3.21)$$

หรือ

$$\delta t_s \approx \frac{n_{\text{Core}} L \Delta}{c} \approx \frac{L (NA)^2}{2 n_{\text{Core}} c} \quad (3.22)$$

เมื่อ  $v$  คือ ความเร็วของแสงที่เดินทางในแกน

$\Delta$  คือ ผลต่างค่าดัชนีหักเหสัมพัทธ์ของใยแก้วนำแสง ( $\Delta \ll 1$ )

NA คือ นิวเมอริคัลอะเพอเจอร์ของใยแก้วนำแสง

การกว้างออกของพัลส์ที่เกิดในใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ ( $\sigma_s$ ) หาได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_s \approx \frac{n_{\text{Core}} L \Delta}{20c\sqrt{3}} \approx \frac{L(NA)^2}{n_{\text{Core}} c 4\sqrt{3}} \quad (3.25)$$

3.2.8.2.2 การกระจายเชิงโหมดไนโยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดเกรดอินเด็คซ์  
เนื่องจากค่าดัชนีหักเหของใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดเกรดอินเด็คซ์มีค่าลดลงตามแนว  
รัศมีหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} n(r) &= n_{\text{Core}} \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^2}, & r < a \text{ (Core)} \\ &= n_{\text{Core}} \sqrt{1 - 2\Delta} = n_{\text{Cladding}}, & r \geq a \text{ (Cladding)} \end{aligned} \quad (3.23)$$

ดังนั้นการล่าช้าทางเวลาที่เกิดจากโหมดต่างๆ ของแสงที่เดินทางไปถึงปลายใยแก้วนำแสง  
หลายโหมดชนิดเกรดอินเด็คซ์คือ

$$\delta t_g \approx \frac{n_{\text{Core}} L \Delta^2}{2c} \approx \frac{(NA)^4}{8n_{\text{Core}}^3 c} \quad (3.24)$$

การกว้างออกของพัลส์ที่เกิดในใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดเกรดอินเด็คซ์ ( $\sigma_g$ ) หาได้  
จากสมการที่ (3.25)

$$\sigma_g \approx \frac{n_{\text{Core}} L \Delta^2}{20c\sqrt{3}} \quad (3.25)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างการกว้างออกของพัลส์ที่เกิดขึ้นในใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิด  
สตีปอินเด็คซ์และใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดเกรดอินเด็คซ์ คือ

$$\sigma_g = \frac{\Delta}{D} \sigma_s \quad (3.26)$$

เมื่อ  $D$  คือ ค่าคงที่มีค่าอยู่ระหว่าง 4-10 ซึ่งขึ้นอยู่กับความแม่นยำของการคำนวณ

### 3.2.8.3 การกระจายทั้งหมดในใยแก้วนำแสงหลายโหมด

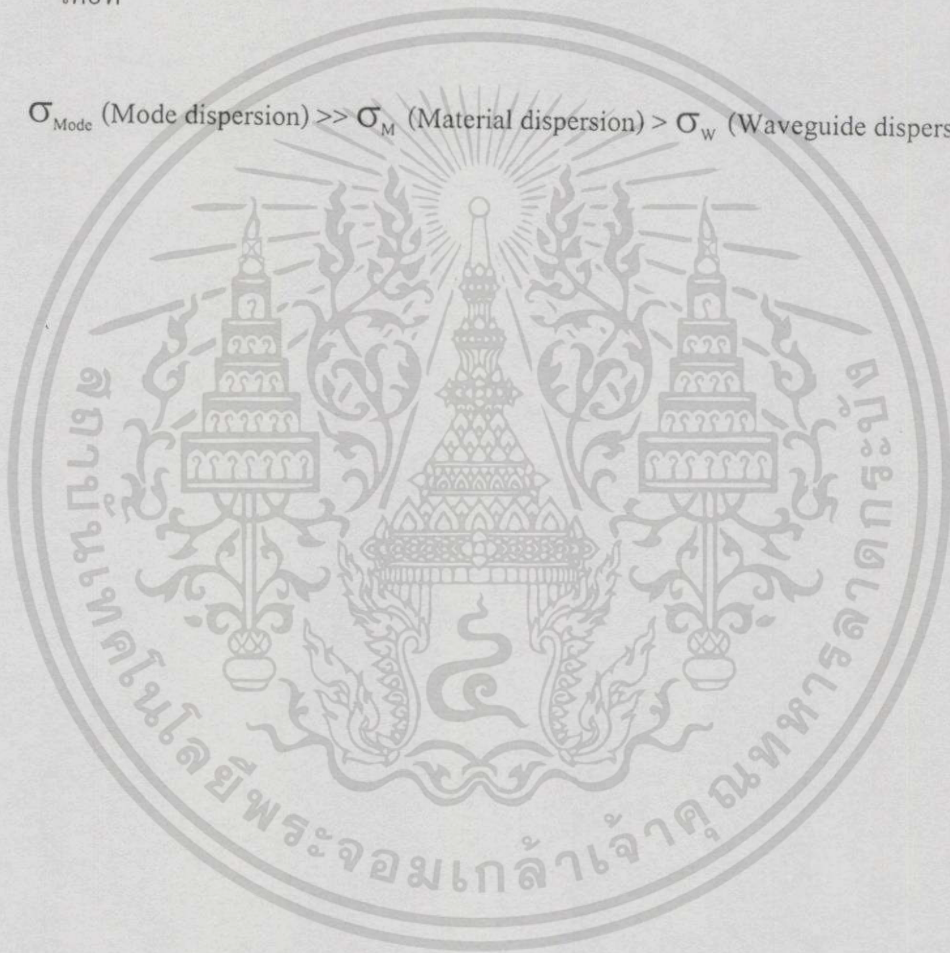
(Overall dispersion in Multimode fibers)

การกระจายทั้งหมดของพัลส์ ( $\sigma_T$ ) ที่เดินทางในใยแก้วนำแสงหลายโหมด หาได้ดังสมการที่ (3.27)

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_M^2 + \sigma_W^2 + \sigma_{\text{Mode}}^2} \quad (3.27)$$

โดยที่

$$\sigma_{\text{Mode}} \text{ (Mode dispersion)} \gg \sigma_M \text{ (Material dispersion)} > \sigma_W \text{ (Waveguide dispersion)}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 เลเซอร์

#### 3.3.1 ความเป็นมาของเลเซอร์

เลเซอร์ (LASER) ย่อมาจาก Light Amplification by Stimulated Emission Radiation หมายถึงการขยายคลื่นแสง โดยการแผ่รังสีที่เกิดจากการเปล่งแสงแบบถูกเร้า ผู้คิดค้นหลักการของเลเซอร์เป็นคนแรกคือ ทาวเนส (C. H. Townes) ในปี ค.ศ. 1957 เขาได้พิสูจน์หลักการของเลเซอร์โดยการสร้างเครื่องมือที่เรียกว่า เมเซอร์แอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$  Maser) เครื่องมือนี้จะให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในช่วงไมโครเวฟและคลื่นดังกล่าวเกิดจากการเปล่งแสงแบบถูกเร้าของโมเลกุลแอมโมเนีย ดังนั้นเขาจึงเรียกเครื่องมือนี้ว่า MASER ซึ่งย่อมาจาก Microwave Amplification by Stimulated Emission Radiation จากหลักการเดียวกันนี้ ไมมาน (T. H. Maiman) ได้สร้างเลเซอร์ทึบทิมขึ้นเป็นผลสำเร็จในปี ค.ศ. 1960 และถือว่าเป็นเลเซอร์เครื่องแรกของโลก เลเซอร์ทึบทิมจะใช้ผลึกทึบทิมเป็นตัวกลางเลเซอร์ ในปี ค.ศ. 1961 จาวาน (A. Javan) และคณะได้สร้างเลเซอร์ฮีเลียมนีออนขึ้นเป็นผลสำเร็จและถือว่าเป็นเลเซอร์ก๊าซระบบแรกของโลก เลเซอร์ฮีเลียมนีออนมีก๊าซผสมระหว่างก๊าซฮีเลียมและก๊าซนีออนเป็นตัวกลางเลเซอร์ จากความสำเร็จในการสร้างเลเซอร์ทึบทิมและเลเซอร์ฮีเลียมนีออน ภายหลังเลเซอร์ชนิดต่างๆ ก็ถูกสร้างขึ้นมากมายและตัวกลางเลเซอร์ที่ใช้ก็มีทั้งแบบของแข็ง ของเหลว และก๊าซ จึงทำให้เลเซอร์มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปทั้งทางด้านความยาวคลื่น กำลัง และลักษณะของลำแสงที่ได้

#### 3.3.2 ระบบเลเซอร์ (Laser system)

ระบบเลเซอร์โดยทั่วไปจะมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ

##### 1) สารเลเซอร์หรือตัวกลางเลเซอร์ (Laser medium)

ตัวกลางเลเซอร์จะต้องมีคุณสมบัติที่สามารถทำให้เกิดประชากรผกผันขึ้นภายในเนื้อสาร และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอะตอมหรือโมเลกุลแบบถูกเร้าได้ ตัวกลางเลเซอร์เช่น ผลึกทึบทิม (Ruby crystal) เป็นตัวกลางเลเซอร์ของเลเซอร์ทึบทิม (Ruby laser) ก๊าซผสมระหว่างก๊าซฮีเลียมและก๊าซนีออนเป็นตัวกลางเลเซอร์ของเลเซอร์ฮีเลียมนีออน สารละลายสีย้อมผ้า (Dye solution) เป็นตัวกลางเลเซอร์ของเลเซอร์ของเหลว (Dye laser) เป็นต้น

##### 2) แหล่งจ่ายกำลัง (Power supply)

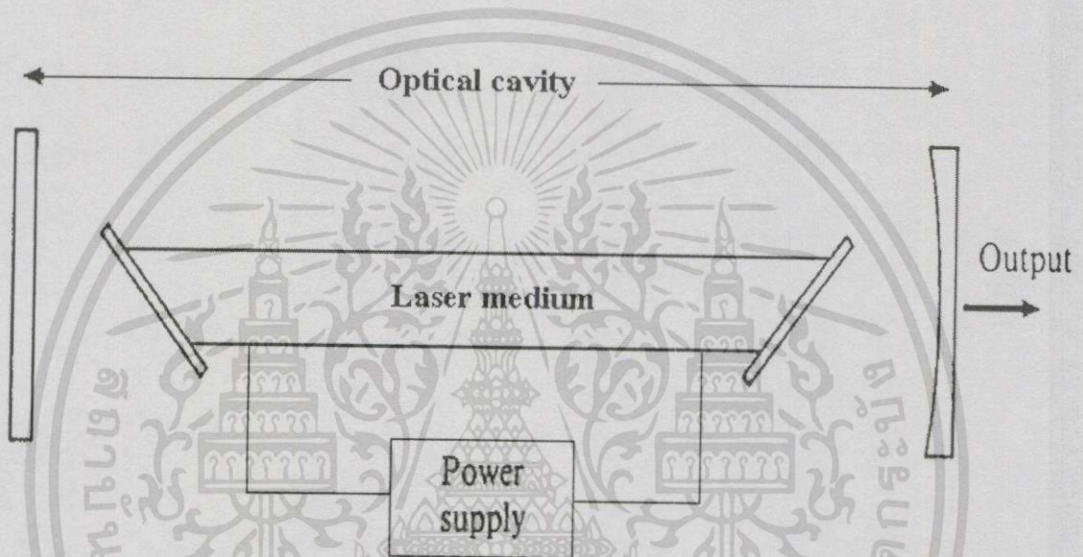
แหล่งจ่ายกำลังจะทำหน้าที่จ่ายศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงให้แก่ตัวกลางเลเซอร์ เพื่อกระตุ้นให้อะตอมหรือโมเลกุลของตัวกลางเลเซอร์เกิดสภาวะประชากรผกผัน การกระตุ้นตัวกลางเลเซอร์สามารถทำได้หลายวิธีซึ่งจะขึ้นอยู่กับตัวกลางเลเซอร์นั้นๆ โดยทั่วไปการกระตุ้นตัวกลางเลเซอร์มักจะกระทำในรูปของออปติคัลปั๊ม (Optical pumping) เช่น การฉายแสงจากหลอดแฟลชแลมพ์ (Flash lamp) ให้แก่ผลึกทึบทิมในกรณีของเลเซอร์ทึบทิมหรือการเกิดก๊าซดิสชาร์จ (Gas discharge)

ในกรณีของเลเซอร์ฮีเลียมนีออน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ออปติคัลควิตี้ (Optical cavity) หรือ ออปติคัลเรโซเนเตอร์ (Optical resonator)

ออปติคัลควิตี้จะประกอบด้วยกระจกครอบสารไดอิเล็กตริกหลายๆ ชั้นปิดหัวท้ายตัวกลางเลเซอร์เพื่อให้เกิดการสะท้อนแสงกลับไปกลับมาระหว่างกระจกทั้งสอง ซึ่งจะเป็นการเพิ่มความเข้มของแสงและกระตุ้นให้เกิดการเปล่งแสงแบบถูกเร่งเพิ่มขึ้น เมื่อเกิดจากการเปล่งแสงแบบถูกเร่ง แสงดังกล่าวจะถูกทำให้สะท้อนกลับไปมาระหว่างกระจกทั้งสองและผ่านตัวกลางเลเซอร์จนกระทั่งแสงนั้นมีความเข้มสูงพอที่จะผ่านออกจากออปติคัลควิตี้มาเป็นแสงเลเซอร์ต่อไป



รูปที่ 3.10 แสดงระบบเลเซอร์ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ ตัวกลางเลเซอร์ แหล่งจ่ายกำลัง และออปติคัลควิตี้

### 3.3.3 หลักการเกิดแสงเลเซอร์

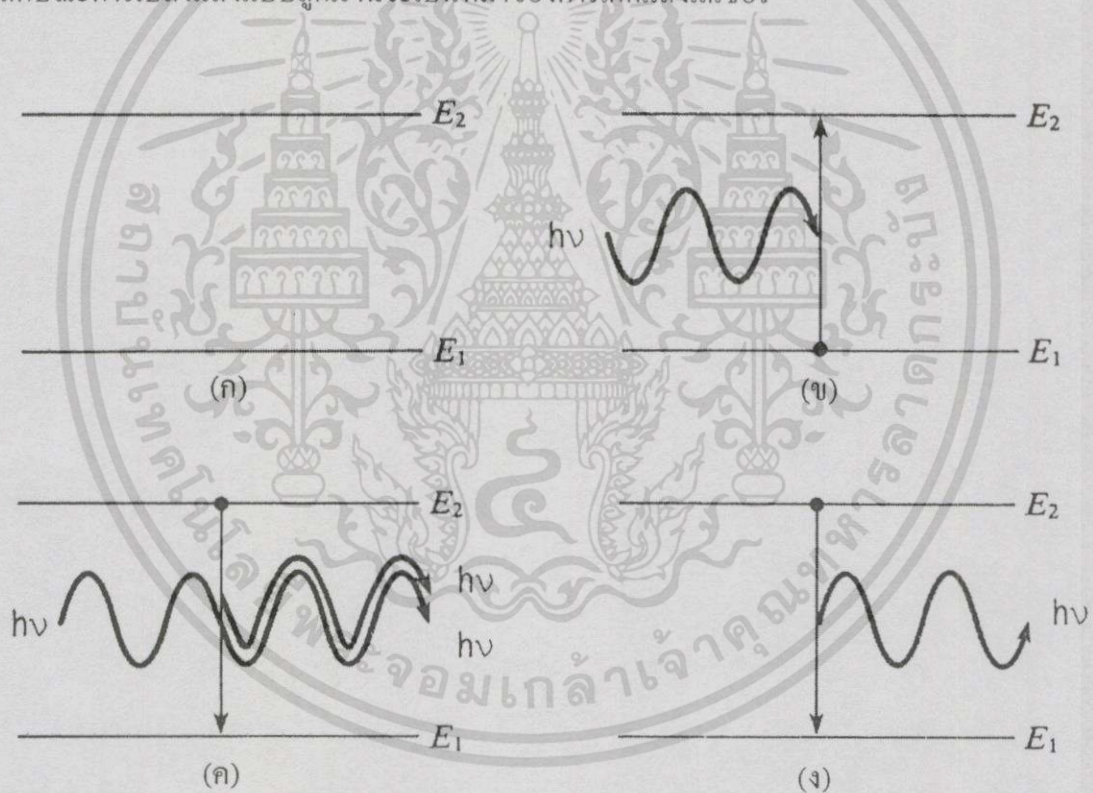
#### 1) การเปล่งแสงแบบถูกเร่ง (Stimulated emission)

พิจารณาระดับพลังงาน  $E_1$  และ  $E_2$  ดังรูปที่ 3.11(ก) เมื่ออิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจาก  $E_1$  ขึ้นไปสู่  $E_2$  อิเล็กตรอนจะมีการดูดกลืนพลังงาน ถ้าอิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจาก  $E_2$  ลงมาสู่  $E_1$  อิเล็กตรอนจะมีการคายพลังงานออกมา พลังงานที่อิเล็กตรอนดูดกลืนหรือคายออกมานั้นจะมีค่าเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานทั้งสอง ( $E_2 - E_1$ ) ถ้าให้พลังงานที่อิเล็กตรอนดูดกลืนหรือคายออกมาเป็นพลังงานแสงหรือโฟตอน ดังนั้นการดูดกลืนแสง (Light absorption) ดังรูปที่ 3.11(ข) เรียกว่า การดูดกลืนแสงแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous absorption) และการเปล่งแสง (Light emission) ดังรูปที่ 3.11(ง) เรียกว่า การเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous emission) การเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนดูดกลืนโฟตอนเข้าไป จากนั้นอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนสถานะขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงาน  $E_2$  ซึ่งเป็นสถานะกระตุ้น แต่อิเล็กตรอนจะอยู่ในระดับพลังงานนี้ได้ชั่วคราว เมื่อหมดเวลาชีวิต (Life time) อิเล็กตรอนก็จะตกกลับมายังระดับพลังงาน  $E_1$  ตามเดิมและคายพลังงานในรูปของโฟตอนออกมา

ถ้าในระหว่างที่อิเล็กตรอนอยู่ที่ระดับพลังงาน  $E_2$  (ยังไม่หมดเวลาชีวิต) มีโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับ  $E_2 - E_1 = h\nu$  เข้ามากระตุ้น อิเล็กตรอนที่ระดับพลังงาน  $E_2$  นี้ไม่จำเป็นต้องรอให้หมดเวลาชีวิตก็สามารถตกกลับมายังระดับพลังงาน  $E_1$  ได้และอิเล็กตรอนก็จะคายโฟตอนออก พลังงานของโฟตอนที่อิเล็กตรอนคายออกมามีค่าเท่ากับ  $E_2 - E_1 = h\nu$  เช่นเดียวกับโฟตอนที่เข้ามากระตุ้น โฟตอนทั้งสองตัวนี้จะเหมือนกันทั้งในทิศทางเคลื่อนที่ ความยาวคลื่น และเฟส การเปล่งแสงลักษณะนี้จะเรียกว่า การเปล่งแสงแบบถูกเร่ง (Stimulated emission) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.11(ค) ลักษณะการเปล่งแสงแบบถูกเร่งนี้จะเป็นที่มาของการเกิดแสงเลเซอร์



รูปที่ 3.11 แสดงการดูดกลืนแสงแบบเกิดขึ้นเอง ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนดูดกลืนโฟตอนเข้าไป แล้วอิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจาก  $E_1$  ขึ้นไปสู่  $E_2$  (ข) การเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจาก  $E_2$  ลงมาสู่  $E_1$  อิเล็กตรอนจะคายโฟตอนออกมา (ง) และการเกิดการเปล่งแสงแบบถูกเร่ง ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนที่ระดับพลังงาน  $E_2$  ถูกโฟตอนเข้ามากระตุ้น ทำให้อิเล็กตรอนตกกลับมายังระดับพลังงาน  $E_1$  พร้อมกับคายโฟตอนออกมา (ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) ประชากรผกผัน (Population inversion)

ถ้าให้จำนวนอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงาน  $E_1$  และ  $E_2$  มีค่าเท่ากับ  $n_1$  และ  $n_2$  ตามลำดับ ที่สถานะสมดุลทางความร้อน (Thermal equilibrium) จำนวนอิเล็กตรอนในแต่ละระดับพลังงานจะเป็นไปตามหลักการกระจายของโบลซ์มาน (Boltzman's distribution) ดังสมการ  $\frac{n_2}{n_1} = e^{-\frac{E_2-E_1}{kT}}$  เมื่อ  $k$  คือค่าคงที่ของโบลซ์มาน (Boltzman's constant) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J / } ^\circ\text{K}$  และ  $T$  คืออุณหภูมิของระบบ ( $^\circ\text{K}$ ) จากสมการจะเห็นว่าเทอมเอกซ์โพเนนเชียลมีค่าเป็นลบ แสดงว่าที่สถานะสมดุลทางความร้อน อิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะอยู่ที่ระดับพลังงาน  $E_1$  นั่นคือ  $n_1 \gg n_2$  เมื่อมีการฉายแสง (โฟตอน) ที่มีพลังงานเท่ากับ  $E_2 - E_1$  เข้าไปในระบบ จะทำให้มีการดูดกลืนแสงมากกว่าการเปล่งแสง ดังนั้นถ้าวิธีการทำให้อิเล็กตรอนส่วนใหญ่อยู่ที่ระดับพลังงาน  $E_2$  แทนที่จะอยู่ที่ระดับพลังงาน  $E_1$  นั่นคือ  $n_1 \ll n_2$  เมื่อมีการฉายแสงที่มีพลังงานเท่ากับ  $E_2 - E_1$  เข้าไปในระบบ ก็จะทำให้เกิดการเปล่งแสงแบบถูกเร้าขึ้น เรียกสถานะที่ทำให้  $n_1 \ll n_2$  ว่า ประชากรผกผัน (Population inversion)

จะเห็นว่าการเกิดสถานะประชากรผกผันเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการเกิดการเปล่งแสงแบบถูกเร้า ดังนั้นในระบบเลเซอร์จึงต้องมีส่วนที่ทำหน้าที่ป้อนพลังงานให้แก่อะตอมหรือโมเลกุลในตัวกลางเลเซอร์เพื่อทำให้เกิดสถานะประชากรผกผันอยู่ตลอดเวลา การป้อนพลังงานให้แก่ตัวกลางเลเซอร์ในลักษณะนี้จะเรียกว่า การปั๊ม (Pumping)

## 3) การขยายคลื่นแสงโดยใช้ออปติคัลควิตี้ (Light amplification by optical cavity)

ตามปกติในสถานะสมดุลทางความร้อน อัตราส่วนระหว่างเกิดการเปล่งแสงแบบถูกเร้ากับการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองจะมีค่าน้อย ถ้าต้องการให้เกิดการเปล่งแสงแบบถูกเร้ามากกว่าการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง จะต้องใช้โฟตอนที่มีความเข้มของพลังงานสูงไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงาน  $E_2$  ดังนั้นจึงมีการสร้างระบบออปติคัลควิตี้ให้แก่เลเซอร์เพื่อให้แสงสะท้อนกลับไปกลับมาภายในออปติคัลควิตี้ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มความเข้มของพลังงานให้กับโฟตอน ทำให้อัตราการเกิดการเปล่งแสงแบบถูกเร้ามีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง โฟตอนพลังงานสูงนี้จะไปเร้าให้เกิดโฟตอนตัวใหม่ๆ ขึ้นทำให้จำนวนโฟตอนในออปติคัลควิตี้มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งเป็นที่มาของการขยายคลื่นแสง (Light amplification) นั่นเอง

ออปติคัลควิตี้ของเลเซอร์เป็นการนำเอากระจกสะท้อนแสง 2 ชิ้นมาวางขนานกัน โดยมีตัวกลางเลเซอร์อยู่ระหว่างกระจกทั้งสอง ลักษณะของกระจกที่ใช้อาจเป็นกระจกเรียบหรือกระจกเว้าก็ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับกรอกแบบเพื่อให้ได้ออปติคัลควิตี้ที่มีเสถียรภาพดีและเหมาะสมกับเลเซอร์ชนิดนั้นๆ กระจกทั้งสองจะทำหน้าที่รวบรวมลำแสงให้สะท้อนกลับไปกลับมาอยู่ในเนื้อตัวกลางเลเซอร์เท่านั้น แต่เนื่องจากผลของการเลี้ยวเบนของแสงทำให้ไม่สามารถรวมแสงได้อย่างสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยกระจกแบนเรียบ เพราะจะมีแสงบางส่วนกระจายออกตามขอบกระจกนั้น เป็นผลทำให้เลเซอร์มีเสถียรภาพต่ำ ดังนั้นเพื่อป้องกันการสูญเสียและผลของการเลี้ยวเบนดังกล่าว กระจกที่ใช้ทำออปติคัลควิตี้จึงมักจะใช้กระจกโค้งเว้าที่มีรัศมีความโค้งยาวๆ ข้างหนึ่งเพื่อบีบลำแสงลงมาเล็กน้อยตามความเหมาะสมและกระจกแบนเรียบอีกข้างหนึ่ง ซึ่งออปติคัลควิตี้แบบนี้เป็นแบบที่ปรับแต่งได้ง่ายที่สุดในทางปฏิบัติ

โดยทั่วไปออปติคัลควิตี้ของเลเซอร์มักจะมีลักษณะเป็นควิตี้แบบแฟบริ-เพอโรต์ (Fabry Perot cavity) ก็คือสะท้อนแสงหรือขยายแสงเฉพาะที่ความยาวคลื่นที่กำกับควิตี้ต่างๆ ดังนั้นถ้าแสงที่เกิดขึ้นภายในควิตี้มีหลายความยาวคลื่น ความยาวคลื่นของแสงที่ไม่กำกับควิตี้ก็จะสูญเสียกำลังไปหรือไม่ถูกขยายความเข้ม ดังนั้นจะเหลือเฉพาะแสงที่ความยาวคลื่นค่าหนึ่งเท่านั้นที่ถูกขยายความเข้ม จึงเป็นผลทำให้แสงเลเซอร์ที่ได้มีลักษณะเป็นแสงสีเดียว (Monochromatic light)

### 3.3.4 คุณสมบัติของแสงเลเซอร์

#### 1) แสงสีเดียว (Monochromaticity)

เลเซอร์ถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ให้แสงที่มีความยาวคลื่นเดียวหรือมีความกว้างของสเปกตรัมความยาวคลื่น (Spectrum width) ที่แคบมากๆ การมีคุณสมบัติเป็นแสงสีเดียวเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete energy levels) ในอะตอมหรือโมเลกุลของตัวกลางเลเซอร์ ทำให้ความถี่ของแสงที่ได้มีค่าแน่นอนตามผลต่างของระดับพลังงาน ( $\nu = \frac{\Delta E}{h}$ ) และกลไกการขยายคลื่นแสงด้วยออปติคัลควิตี้ ทำให้เกิดแสงที่มีความเข้มสูงเพียงความถี่เดียว ข้อดีอีกอย่างของการเป็นแสงสีเดียวคือพลังงานที่ป้อนให้แก่เลเซอร์ถูกนำมาใช้ในการสร้างแสงเลเซอร์ที่มีความถี่เดียวเท่านั้น

#### 2) มีทิศทางที่แน่นอน (Directionality)

เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ให้แสงเป็นลำแสงขนาน โดยลำแสงจะพุ่งไปในทิศทางเดียวกัน การเป็นลำแสงขนานจะทำให้การกว้างออกของลำแสง (Beam divergence) มีค่าเพียงเล็กน้อยเมื่อแสงเลเซอร์เดินทางเป็นระยะทางไกลๆ สาเหตุหนึ่งที่ทำให้แสงเลเซอร์มีทิศทางที่แน่นอนคือการที่โฟตอนส่วนใหญ่ในออปติคัลควิตี้มีทิศการเคลื่อนที่ในแนวแกนแสง (Optical axis) หรือตั้งฉากกับกระจกที่ใช้ทำออปติคัลควิตี้ ซึ่งแสงในแนวแกนแสงนี้มักจะถูกขยายสัญญาณจนกลายเป็นแสงเลเซอร์ในที่สุด

#### 3) ความเข้มแสงสูง (High intensity)

การเป็นแสงที่มีความเข้มสูงของแสงเลเซอร์ถือเป็นลักษณะเด่นอย่างหนึ่งที่ไม่เหมือนแหล่งกำเนิดแสงอื่น เมื่อทำการโฟกัสแสงเลเซอร์ให้เป็นจุดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากๆ จะทำให้แสงเลเซอร์มีความหนาแน่นของพลังงาน (Energy density) สูงมาก ซึ่งสามารถนำไปใช้ในงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุตสาหกรรมเช่น การตัด การเจาะและการเชื่อม เป็นต้น นอกจากนี้ยังนิยมนำเอาเลเซอร์ไปใช้ใน งานทางด้านวิทยาศาสตร์และการแพทย์ด้วย เมื่อแสงเลเซอร์ตกกระทบกับวัตถุใดๆ จะเกิดการ ระเบิดระยับขึ้น (Laser specker) โดยเฉพาะวัตถุที่มีผิวหยาบหรือแม้แต่ในอากาศที่มีฝุ่นละอองหรือ อนุภาคแขวนลอยเล็กๆ เนื่องจากแสงเลเซอร์จะเกิดการสะท้อนแบบไม่มีทิศทางกับอนุภาคดังกล่าว จึงทำให้เกิดการระเบิดระยับขึ้น

#### 4) ความเป็นแสงอาพันธ์ (Coherency)

ลักษณะเด่นที่สำคัญของแสงเลเซอร์ที่แตกต่างจากแสงทั่วๆ ไปคือ การเป็นแสงอาพันธ์ (Coherent light) แสงอาพันธ์ คือ แสงที่มีความเป็นระเบียบของคลื่นแสง คลื่นแสงจะเดินทางไปใน ทิศทางเดียวกันโดยมีเฟสเหมือนกัน (In phase) แสงที่อยู่ในออปติคัลควิตี้จะมีความเป็นอาพันธ์สูง แต่เมื่อแสงเดินทางออกจากเลเซอร์และเดินทางผ่านอากาศหรือตัวกลางใดๆ แสงเลเซอร์มักจะเกิด อัตรกิริยากับตัวกลางนั้นทำให้สูญเสียพลังงานและทิศทางการเคลื่อนที่ทำให้ความเป็นอาพันธ์ลดลง ระยะทางที่แสงเลเซอร์เดินทางได้และยังคงความเป็นอาพันธ์ดั้งเดิม จะเรียกระยะทางดังกล่าวว่า ความยาวอาพันธ์ (Coherence length) แสงที่เดินทางผ่านตัวกลางแต่ละชนิดจะมีความยาวอาพันธ์ไม่ เท่ากันซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลาง ปริมาณจุดบกพร่องและความสม่ำเสมอของตัวกลางนั้นๆ ดังนั้นตัวกลางเลเซอร์ที่สมบูรณ์ มีจุดบกพร่องน้อยและมีเนื้อสารสม่ำเสมอจะให้แสงที่มีความยาว อาพันธ์สูง ตัวกลางดังกล่าวมักจะถูกเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ

#### 5) โพลาริเซชัน (Polarization)

แสงเลเซอร์ที่ผลิตออกมานั้นโดยทั่วไปจะไม่ใช่แสงโพลาไรซ์ แต่ในการสร้างเลเซอร์ให้มี ประสิทธิภาพสูงมักจะหาทางลดการสูญเสียพลังงานของคลื่นแสงที่สะท้อนกลับไปกลับมาในควิตี้ก่อน ที่จะได้แสงเลเซอร์กำลังสูงออกมา วิธีนี้ทำโดยตัดปลายหลอดเลเซอร์หรือตัวกลางเลเซอร์ให้เอียง ทำมุมบรีวสเตอร์ (Brewster's angle) กับแนวแกนของหลอดเลเซอร์หรือตัวกลางเลเซอร์ จะทำให้ แสงที่สะท้อนจากกระจกที่ประกอบเป็นเลเซอร์ควิตี้พุ่งเข้าสู่หลอดเลเซอร์ทั้งหมด ทำให้ไม่เกิดการ สูญเสียพลังงานของคลื่นแสงเนื่องจากการสะท้อนและการหักเห กระจกที่ปิดปลายหลอดเลเซอร์ และทำมุมบรีวสเตอร์นี้จะเรียกว่า บรีวสเตอร์วินโดว์ (Brewster window หรือ Brewster cut) ซึ่งการ ใช้บรีวสเตอร์วินโดว์นี้จะทำให้แสงเลเซอร์ที่ได้เป็นแสงโพลาไรซ์ที่สูงมาก เนื่องจากแสงจะต้อง สะท้อนกลับไปกลับมาในควิตี้หลายๆ รอบ จึงเสมือนเป็นการถ่วงการถ่วงความเป็นโพลาไรซ์ของ แสงเลเซอร์ให้สูงขึ้นและแสงเลเซอร์ที่ได้จะมีแนวของการโพลาไรซ์ขนานไปกับระนาบตกกระทบ กับกระจก

### 3.3.5 โหมดของแสงเลเซอร์

ออปติคัลควิตี้ของเลเซอร์มักจะทำหน้าที่เป็นอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบแฟบริ-เพอโรต์ (Fabry-Perot interferometer) มีผลทำให้แสงเลเซอร์ที่ผ่านออกมามีความถี่ต่างๆ อยู่จำนวนหนึ่ง ซึ่ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สอดคล้องกับคุณสมบัติของออปติคัลควิตี้นั้นๆ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดโหมดของแสงเลเซอร์ 2 แบบด้วยกันคือ โหมดตามยาว (Longitudinal modes) และ โหมดตามขวาง (Transverse modes) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

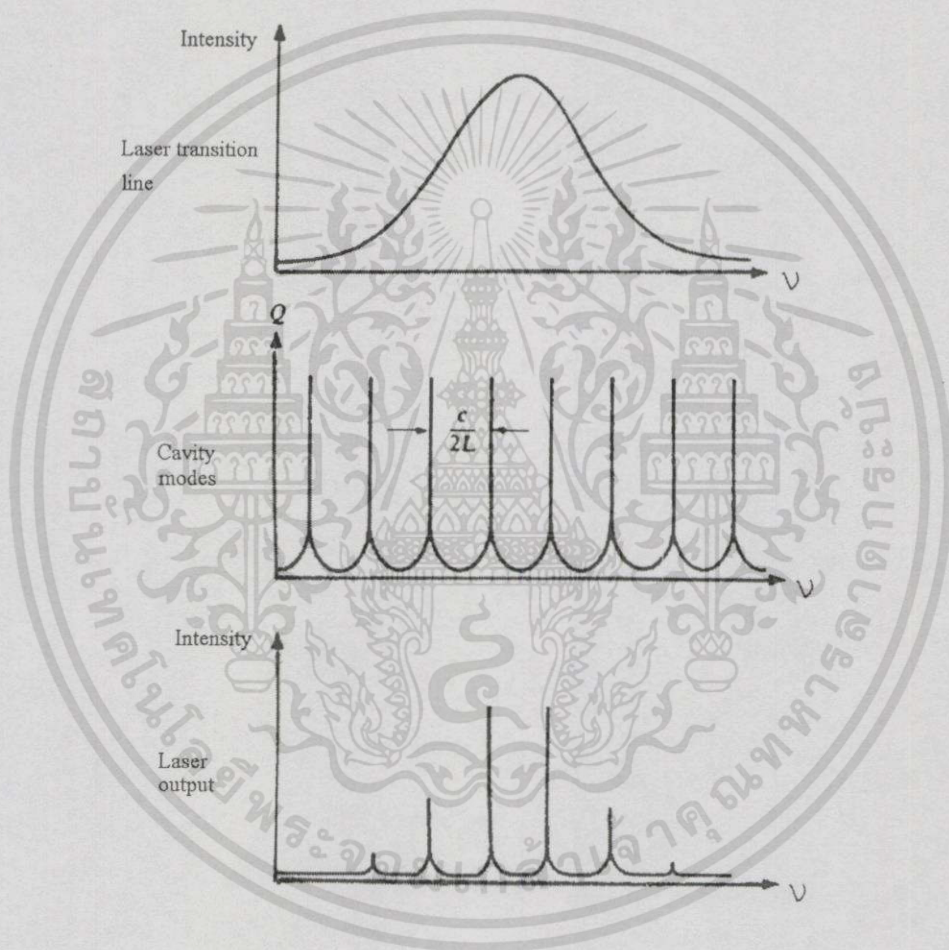
### 3.3.5.1 โหมดตามยาว (Longitudinal modes) หรือ โหมดตามแกน (Axial modes)

โดยทั่วไปควิตี้ของเลเซอร์จะกำหนดกับความถี่ของแสงที่ทำให้ค่า  $Q$  (Quality factor) มีค่าสูงและค่าการสูญเสีย (Loss) ต่ำ ถ้าค่าการสูญเสียนี้มีค่าน้อยกว่าอัตราขยาย (Gain) ในตัวกลางเลเซอร์ก็จะเกิดแสงเลเซอร์ แต่เงื่อนไขที่ค่า  $Q$  สูงนี้ไม่ได้เกิดขึ้นในทุกๆ ความถี่ของแสงเลเซอร์ที่เกิดขึ้นในเลเซอร์ควิตี้จะมีเฉพาะบางความถี่เท่านั้นที่เข้าเงื่อนไขของการกำหนด เช่นเดียวกับเงื่อนไขของการผ่านออกไปได้ของแสงในอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพอโรต์ ดังนั้นเอาต์พุตของเลเซอร์จึงไม่ได้มีรูปร่างเหมือนกับสเปกตรัมของการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง แต่จะประกอบด้วยชุดของเส้นสเปกตรัมตามค่าความถี่ที่มีค่า  $Q$  สูงภายในควิตี้ของเลเซอร์นั้น

ในการกำหนดเงื่อนไขที่ทำให้ค่า  $Q$  สูงในเลเซอร์ควิตี้ จะพิจารณาจากคลื่นระนาบที่เคลื่อนที่ในทิศทางตั้งฉากกับกระจกที่ประกอบกันเป็นเลเซอร์ควิตี้ ระยะทางที่แสงเดินทางได้ครบรอบโดยสะท้อนกับกระจกทั้งสองนั้นมีค่าเท่ากับ  $2L$  เมื่อ  $L$  คือระยะห่างระหว่างกระจกทั้งสอง เฟสรวมที่เปลี่ยนไปจากการเดินทางของคลื่นแสงที่เดินทางครบหนึ่งรอบจะเท่ากับ  $\frac{4\pi L}{\lambda}$  ถ้าคลื่นแสงที่สะท้อนกลับมามีการกลับเฟสไป  $180^\circ$  กับคลื่นแสงเดิมและมีขนาดเท่าเดิม จะทำให้ไม่เกิดคลื่นแสงรวมที่มีพลังงานสูงพอที่จะไปกระตุ้นให้เกิดการเปล่งแสงแบบถูกเร้าได้ แม้จะมีสภาพประชากรผกผันอยู่ก็ตาม แต่ถ้าคลื่นแสงที่มีความถี่ที่ทำให้เกิดการสะท้อนในลักษณะเฟสตรงกัน (In phase) กับคลื่นแสงเดิม คลื่นแสงจะซ้อนทับกันแบบเสริม ทำให้คลื่นแสงมีพลังงานสูงขึ้นและเพียงพอต่อการชักนำให้เกิดการเปล่งแสงแบบถูกเร้าที่ความถี่นี้ หรือพูดอีกอย่างว่ากระจกที่ประกอบกันเป็นเลเซอร์ควิตี้ จะทำให้แสงเกิดการสะสมพลังงานขึ้น และเมื่อคลื่นแสงซ้อนทับกันพอดีควิตี้นั้นก็จะมีค่า  $Q$  สูง เงื่อนไขที่ทำให้เกิดการซ้อนทับกันพอดีหรือการซ้ำตัวเองของคลื่นแสงคือการกำหนดให้ความยาวของเลเซอร์ควิตี้มีขนาดเท่ากับเลขจำนวนเต็มของครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น  $L = q\left(\frac{\lambda}{2}\right)$  เมื่อ  $q$  เป็นเลขจำนวนเต็มซึ่งปกติจะมีค่ามาก เนื่องจากค่า  $q$  เป็นเลขจำนวนเต็มจึงทำให้มีค่าความยาวคลื่นหลายค่าที่เข้าเงื่อนไขที่คลื่นแสงหรือสนามไฟฟ้าเกิดการซ้ำตัวเอง เรียกรูปแบบ (Pattern) ที่สนามไฟฟ้าซ้ำตัวเองนี้ว่า โหมดตามแกน หรือ โหมดตามยาว โดยความถี่ของแต่ละโหมดหาได้จาก  $\nu_q = q\left(\frac{c}{2L}\right)$  ซึ่งเป็นความถี่ของแสงที่เลเซอร์ควิตี้นั้นกำหนด เมื่อ  $c$  คือความเร็ว

แสงในสูญญากาศ ค่าความถี่ของโหมดที่อยู่ติดกันหรือระยะห่างระหว่างโหมดหาได้จาก  $\Delta\nu = \nu_{q+1} - \nu_q = \frac{c}{2L}$  ซึ่งจะเห็นว่าระยะห่างระหว่างโหมดของแสงเลเซอร์ขึ้นอยู่กับค่า  $L$  เท่านั้น

เนื่องจากสเปกตรัมความยาวคลื่น (ไลน์วิคซ์) ของเลเซอร์ส่วนใหญ่จะมีความกว้าง ดังนั้นจะพบว่าแสงเลเซอร์จะมีหลายโหมดตามแกนอยู่ในสเปกตรัม เอกลักษณ์ของเลเซอร์จึงประกอบด้วยเส้นความถี่เดี่ยวๆ จำนวนหนึ่งที่ห่างกันเท่ากับ  $\frac{c}{2L}$  ดังรูปที่ 3.12 ความถี่เหล่านี้เรียกว่า ความถี่ของโหมดตามแกนของเลเซอร์



รูปที่ 3.12 แสดงการเกิดโหมดตามแกนของเลเซอร์เมื่อใช้เลเซอร์ควาวิตียาว  $L$  โดยที่รูปบนแสดงไลน์วิคซ์ของแสงเลเซอร์ รูปกลางแสดงโหมดตามแกนซึ่งเกิดจากความถี่ของแสงที่กำกับกับเลเซอร์ควาวิตีความยาว  $L$  รูปล่างแสดงแสงเอกลักษณ์ของเลเซอร์ซึ่งประกอบด้วยโหมดตามแกนจำนวนหนึ่งที่ห่างกัน  $\frac{c}{2L}$  ซึ่งอยู่ในความกว้างของไลน์วิคซ์ของเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.5.2 โหมดตามขวาง (Transverse modes)

เนื่องจากการพิจารณาโหมดตามแกนจะพิจารณาเฉพาะคลื่นแสงที่เดินทางในแนวแกนของเลเซอร์ควิตี้ แต่ในความเป็นจริงแสงที่เดินทางในเลเซอร์ควิตี้นั้นประกอบไปด้วยแสงตามแนวแกนและแสงที่เบนห่างจากแนวแกนแสงออกมาเล็กน้อย ซึ่งคลื่นแสงเหล่านี้ก็จะมีการซ้อนทับกันเมื่อแสงเดินทางสะท้อนกลับไปกลับมาในควิตี้ รูปแบบของสนามไฟฟ้าที่ซ้อนทับตัวเองจึงมีโหมดตามขวางเกิดขึ้นภายในควิตี้ของเลเซอร์ด้วย

การแสดงลักษณะโหมดของแสงเลเซอร์ (ความถี่) โดยมีทั้งโหมดตามแกนและโหมดตามขวางสามารถกำหนดได้คือ

$$v_{mnq} = \left( q + (m+n+1) \frac{\cos^{-1}(g_1 g_2)}{\pi} \right) \frac{c}{2L} \quad (3.28)$$

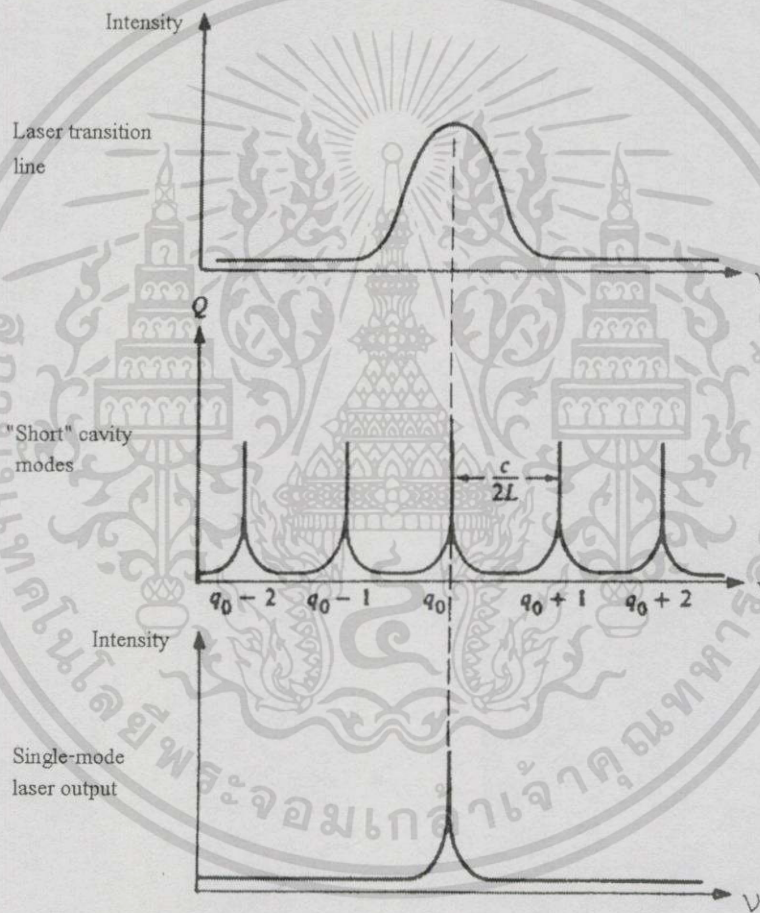
เมื่อ  $m$ ,  $n$  และ  $q$  เป็นเลขจำนวนเต็ม  $g_1$  และ  $g_2$  เป็นพารามิเตอร์ (g-parameter) ของกระจก ในกรณีที่เลเซอร์ควิตี้ประกอบด้วยกระจกที่โค้งเล็กน้อยและเหมือนกันจะได้  $g_1 = g_2$  และ  $\frac{L}{R} \ll 1$  ดังนั้นสมการที่ (3.28) เขียนใหม่ได้

$$v_{mnq} \approx \left( q + \frac{m+n+1}{\pi} \sqrt{\frac{2L}{R}} \right) \frac{c}{2L} \quad (3.29)$$

จากสมการที่ (3.29) ค่า  $q$  แสดงถึงโหมดตามแกน ส่วนค่า  $m$  และ  $n$  แสดงถึงโหมดตามขวาง ดังนั้นโหมดหนึ่งๆ ของแสงเลเซอร์จะแสดงด้วยตัวเลข 3 ตัว โดยสัญลักษณ์ของโหมดของแสงเลเซอร์จะเขียนแทนด้วย  $TEM_{mnq}$  โดยที่ TEM ย่อมาจาก Transverse Electro-Magnetic Wave เนื่องจากค่า  $q$  มีจำนวนมากมาย สำหรับขนาดของเลเซอร์ที่ใช้งานโดยทั่วไป ดังนั้นค่าที่เหมาะสมของ  $q$  จึงไม่มี ทำให้ไม่มีความหมายนักในทางปฏิบัติ ดังนั้นในการเขียนบอกโหมดของเลเซอร์จึงมักตัดค่า  $q$  ออกเหลือเพียง  $TEM_{mn}$  แต่ก็ยังหมายความว่าค่า  $q$  อยู่ในคลื่นแสงนั้นเสมอ ดังรูปที่ 3.14

เนื่องจากจำนวนโหมดตามแกนนั้นถูกกำหนดจากความกว้างของไลน์วิดซ์และความยาวของเลเซอร์ควิตี้ ดังนั้นยิ่งเลเซอร์ควิตี้มีขนาดยาวมากเท่าไร ระยะห่างระหว่างโหมดก็จะแคบลงเท่านั้น จึงมีจำนวนโหมดตามแกนเกิดขึ้นมากมายภายในช่วงความกว้างของไลน์วิดซ์ ส่วนจำนวนของโหมดตามขวางนั้นกำหนดได้จากรูปร่างและขนาดของกระจกตลอดจนโครงสร้างของเลเซอร์ เมื่อมีจำนวนโหมดเกิดขึ้นมากมายในแสงเลเซอร์ จึงเรียกเลเซอร์แบบนี้ว่า เลเซอร์หลายโหมด (Multimode laser)

เมื่อมีการใส่องค์ประกอบบางชนิดที่เหมาะสมไว้ภายในเลเซอร์ควาวิตี้ก็สามารถปรับแต่งเลเซอร์หลายโหมดให้เป็นเลเซอร์โหมดเดียวได้ เช่นการใส่รูแสงไว้ในแกนแสงเพื่อตัดโหมดตามขวางออกเหลือแต่โหมด  $TEM_{00}$  ออกมา จากนั้นจึงมาจัดการกับโหมดตามแกนโดยการออกแบบควาวิตี้ที่สามารถให้โหมดตามแกนเพียงโหมดเดียว ซึ่งควาวิตี้ดังกล่าวจะต้องให้ไลน์วิดซ์ที่แคบมาก ส่วนระยะห่างของควาวิตี้ที่ทำให้เกิดโหมดเดี่ยวนั้นจะต้องมีค่ากว้างกว่าไลน์วิดซ์ของแสงเลเซอร์เล็กน้อย ซึ่งค่าไลน์วิดซ์ของเลเซอร์นี้ไม่สามารถควบคุมได้เพราะเป็นลักษณะเฉพาะของแสงเลเซอร์แต่ละชนิด ดังนั้นระยะห่างของควาวิตี้โหมดเดี่ยวนั้นจึงถูกจำกัดด้วยค่าไลน์วิดซ์ของเลเซอร์ที่เล็กมาก ดังรูปที่ 3.13 เมื่อควาวิตี้มีขนาดสั้นจึงเป็นสาเหตุของขีดจำกัดด้านกำลังของเลเซอร์

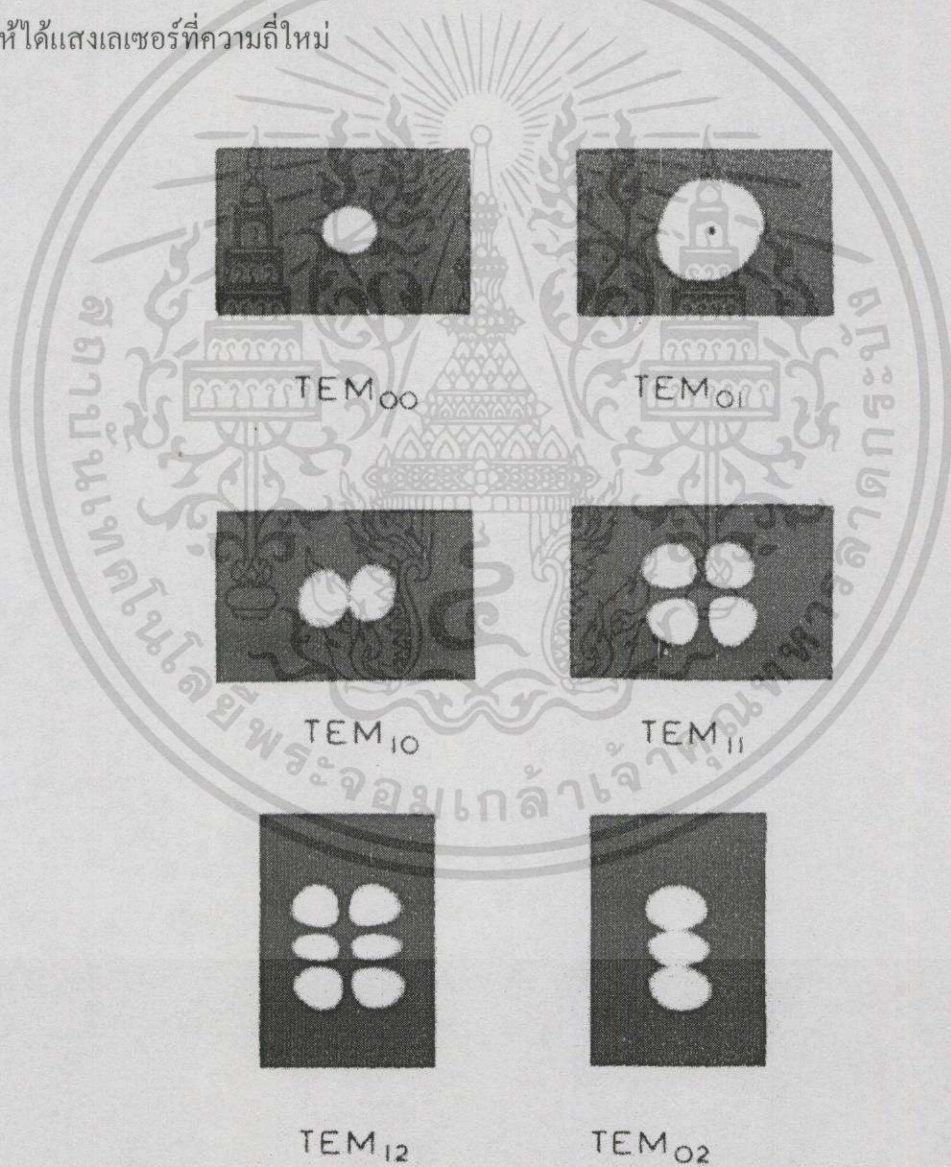


รูปที่ 3.13 แสดงวิธีการทำให้แสงเลเซอร์หลายโหมดกลายเป็นแสงเลเซอร์โหมดเดียวโดยการใช้ควาวิตี้ที่มีขนาดสั้นๆ โดยรูปบนแสดงไลน์วิดซ์ของแสงเลเซอร์ที่แคบมากเนื่องจากการออกแบบเลเซอร์ควาวิตี้ รูปกลางแสดงโหมดตามแกนที่เกิดจากการใช้เลเซอร์ควาวิตี้ที่มีขนาดสั้น (Short cavity) ซึ่งทำให้ระยะห่างระหว่างโหมดมากขึ้น รูปล่างแสดงแสงเลเซอร์โหมดเดียวที่เกิดจากการใช้เลเซอร์ควาวิตี้ที่มีขนาดสั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำให้แสงเลเซอร์เป็นแสงโหมดเดียวอีกวิธีหนึ่งคือการทำให้เกิดการสูญเสียแก้มอดอื่นๆ และเหลือไว้เพียงโหมดตามแกนเพียงโหมดเดียว ซึ่งทำได้โดยการใส่ควาวิตี้แบบเพบริ-เพอโรต์ที่มีขนาดคงที่เข้าไปในเลเซอร์ควาวิตี้ ควาวิตี้ที่ใส่เพิ่มเข้ามานี้เรียกว่า อีตาลอน (Etalon) เป็นแผ่นแก้วพิเศษซึ่งผิวทั้งสองขัดจนเรียบและไม่มีการเคลือบสารใดๆ จึงมีการสะท้อนแสงน้อยมาก เนื่องจากมีการสะท้อนแสงต่ำ ทำให้การกำรของอีตาลอนมีค่ากว้างกว่าการกำรของเลเซอร์ควาวิตี้ เนื่องจากระยะห่างของควาวิตี้ของอีตาลอนสั้นกว่าเลเซอร์ควาวิตี้ ทำให้ระยะห่างระหว่างค่าความถี่ที่กำรของอีตาลอนจึงกว้างกว่าระยะห่างระหว่างค่าความถี่ที่กำรของเลเซอร์ควาวิตี้ ดังนั้นจึงทำให้เหลือโหมดตามแกนเพียงโหมดเดียว เรียกเลเซอร์แบบนี้ว่า เลเซอร์โหมดเดียว (Single-mode laser)

ถ้าเอียงอีตาลอนให้ทำมุมกับแกนแสง ค่าความถี่ที่กำรของอีตาลอนจะเปลี่ยนไป ซึ่งจะทำได้แสงเลเซอร์ที่ความถี่ใหม่



รูปที่ 3.14 แสดงลักษณะของโหมดตามขวาง  $TEM_{00}$   $TEM_{01}$   $TEM_{10}$   $TEM_{11}$   $TEM_{12}$  และ  $TEM_{02}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 เลเซอร์ก๊าซ (Gas lasers)

เลเซอร์ก๊าซมีตัวกลางเลเซอร์อยู่ในสถานะก๊าซและอาศัยวิถีก๊าซดิสชาร์จเพื่อทำให้เกิดประชากรผกผันและการเปล่งแสงแบบถูกเร้า วิถีก๊าซดิสชาร์จพลังงานจะถูกถ่ายเทให้แก่อะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซโดยการชนด้วยอิเล็กตรอนอิสระและการชนกันเองระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซนั้น แสงเลเซอร์ที่ได้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง (Continuous wave : CW) トラบเท่าที่ ยังคงป้อนกระแสไฟฟ้าแก่ขั้วทั้งสองของหลอดเลเซอร์ เนื่องจากก๊าซสามารถเคลื่อนที่ได้ทั่วทั้งหลอดเลเซอร์ ทำให้การถ่ายเทความร้อนสามารถทำได้ดีทั้งแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air cooling) และแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water cooling) ตัวอย่างของเลเซอร์ก๊าซเช่น เลเซอร์ฮีเลียมนีออน (He-Ne laser) เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> laser) เลเซอร์เลเซอร์ไนโตรเจน (N<sub>2</sub> Laser) เลเซอร์อาร์กอน (Ar<sup>+</sup> Laser) เลเซอร์ฮีเลียมแคดเมียม (He-Cd laser) และเลเซอร์เอกไซเมอร์ (Eximer laser) เป็นต้น

### 3.5 เลเซอร์ฮีเลียมนีออน (He-Ne Laser)

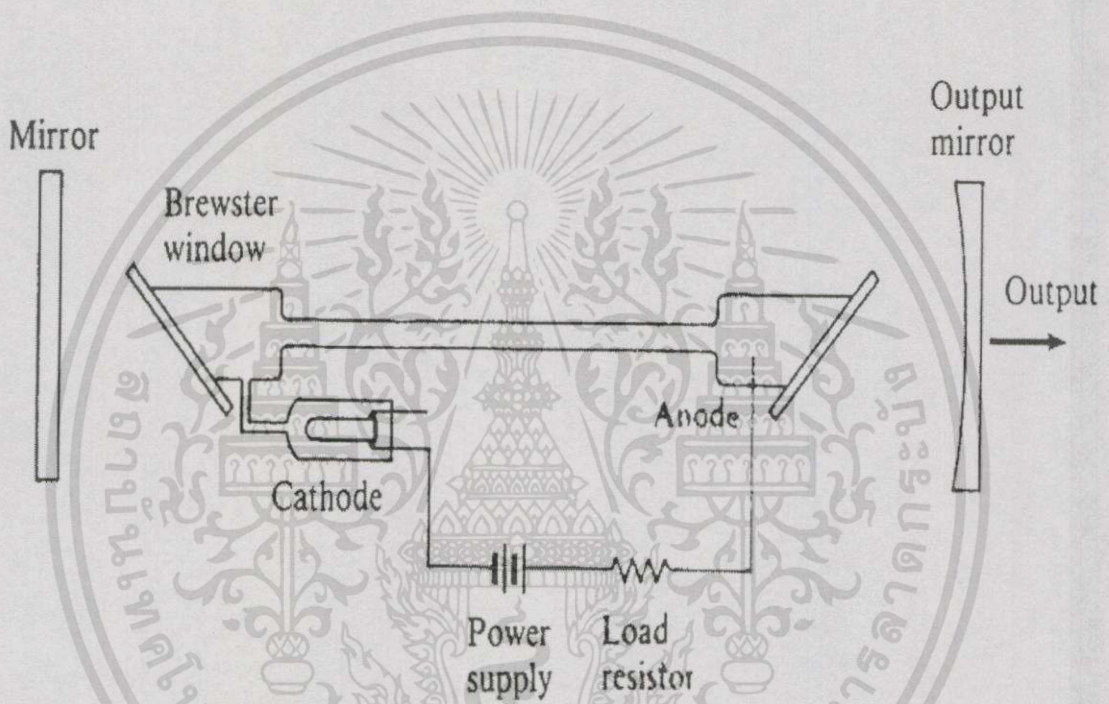
เลเซอร์ฮีเลียมนีออนเป็นเลเซอร์ก๊าซระบบแรกของโลกซึ่งถูกสร้างขึ้นในปี ค.ศ. 1961 โดย จาวาน (A. Javan) และคณะที่ห้องทดลองเบลล์ (Bell telephone laboratory Co.) โดยใช้ก๊าซฮีเลียมผสมกับก๊าซนีออนเป็นตัวกลางเลเซอร์ แสงเลเซอร์ที่ได้มีความยาวคลื่นเท่ากับ 1150 nm (อินฟราเรด) และต่อมาภายหลังพบว่าเลเซอร์ระบบนี้ยังสามารถให้แสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 3390 nm (อินฟราเรด) ในปี ค.ศ. 1962 ไวท์ (A. D. White) และคณะสามารถผลิตแสงเลเซอร์จากเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่มีความยาวคลื่น 632.8 nm (สีแดง) ซึ่งเป็นแสงที่ตามองเห็นได้ทำให้เลเซอร์ชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ปัจจุบันได้มีการผลิตแสงเลเซอร์สีเขียว สีเหลือง และสีส้มจากเลเซอร์ฮีเลียมนีออน เพื่อสนองต่อความต้องการในการใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีค่าความยาวคลื่นต่างๆ กัน

#### 3.5.1 โครงสร้างภายในของเลเซอร์ฮีเลียมนีออน

จากรูปที่ 3.15 โครงสร้างพื้นฐานของเลเซอร์ฮีเลียมนีออนจะประกอบด้วยหลอดเลเซอร์ ซึ่งภายในหลอดเลเซอร์จะบรรจุก๊าซที่ผสมกันระหว่างก๊าซฮีเลียมและก๊าซนีออน ที่ปลายของหลอดเลเซอร์จะเป็นขั้วไฟฟ้าคือแอโนด (Anode) และแคโทด (Cathode) ซึ่งอยู่คนละด้านของหลอด ขั้วแอโนดทำจากโลหะทั้งสเต็มส่วนแคโทดทำจากอะลูมิเนียมมีลักษณะเป็นแฮลโลว์แคโทด (Hallow cathode) โดยขั้วทั้งสองต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (Power supply) เมื่อก๊าซนีออนเกิดการเปล่งแสงแบบถูกเร้าให้แสงที่มีความยาวคลื่น 1150, 3390 และ 632.8 nm ออกมา แสงเหล่านี้จะถูกทำให้มีความเข้มสูงขึ้น โดยการสะท้อนกลับไปกลับมาระหว่างกระจกทั้งสองด้านของออปติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คัลควาตี กระจก (Mirror) ข้างหนึ่งฉาบด้วยไอโลหะที่ให้การสะท้อนแสง 100 % ส่วนอีกข้างหนึ่ง (Output mirror) เป็นกระจกที่ฉาบด้วยสารไดอิเล็กทริกบางๆ หลายชั้น เพื่อให้การสะท้อนแสงมีขนาดที่เหมาะสมเพื่อให้แสงส่วนหนึ่งสะท้อนกลับมายังออปติคัลควาตีและแสงอีกส่วนสามารถทะลุออกไปเป็นแสงเลเซอร์ ที่ปลายของหลอดเลเซอร์จะถูกทำให้เอียง (Brewster window) เป็นมุมที่เรียกว่า มุมบริวสเตอร์ (Brewster Angle) เพื่อให้เมื่อมีแสงมาตกกระทบจะทำให้แสงสะท้อนเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น ดังนั้นแสงเลเซอร์ที่ได้จากเลเซอร์ฮีเลียมนีออนจึงเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น



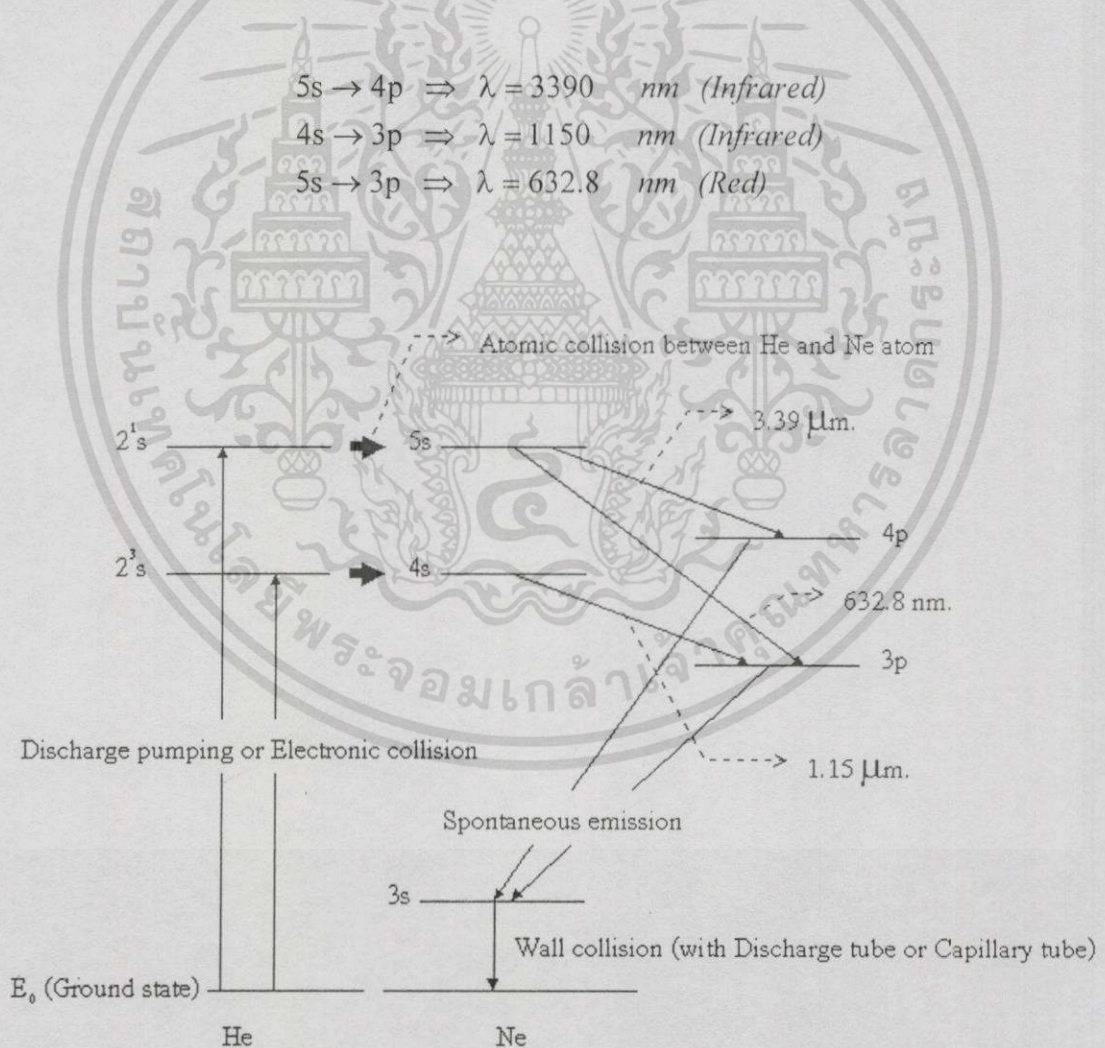
รูปที่ 3.15 แสดงโครงสร้างพื้นฐานในการเกิดแสงเลเซอร์ของเลเซอร์ฮีเลียมนีออน

### 3.5.2 หลักการเกิดแสงเลเซอร์ของเลเซอร์ฮีเลียมนีออน

เมื่อป้อนพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ( $\approx 10$  kV) จากแหล่งจ่ายกระแสให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสอง จะทำให้เกิดการดีสชาร์จภายในหลอดเลเซอร์ (Discharge pumping) เกิดอิเล็กตรอนอิสระ เนื่องจากก๊าซฮีเลียมเป็นก๊าซที่ถูกไอออไนซ์ (Ionized) ได้ง่ายกว่าก๊าซนีออน ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนอิสระชนกับก๊าซฮีเลียมจะถ่ายเทพลังงานให้กับก๊าซฮีเลียม ทำให้ก๊าซฮีเลียมที่สถานะพื้น (Ground state) ถูกกระตุ้นไปอยู่ที่สถานะกระตุ้น (Excited state)  $2^1s$  และ  $2^3s$  เมื่อก๊าซฮีเลียมที่สถานะกระตุ้นชนกับก๊าซนีออนที่สถานะพื้น (Atomic collision between He and Ne atom) ก๊าซฮีเลียมจะถ่ายเทพลังงานให้กับก๊าซนีออน จากนั้นก๊าซฮีเลียมก็จะกลับไปยังสถานะพื้น เมื่อก๊าซ

นีออนได้รับพลังงานก็จะถูกกระตุ้นไปอยู่ที่สถานะกระตุ้น 4s และ 5s ตามลำดับ โดยที่สถานะกระตุ้น 2<sup>1</sup>s กับ 4s และ 2<sup>3</sup>s กับ 5s จะมีระดับพลังงานใกล้เคียงกัน

ที่สถานะกระตุ้น 4s และ 5s ก๊าซนีออนจะเกิดการเปล่งแสงแบบถูกเร้าให้แสงที่มีความยาวคลื่น 1150, 3390, 632.8 nm แล้วย้าย (Transition) ไปยังระดับพลังงาน 3p และ 4p ตามลำดับ ที่ระดับพลังงาน 3p และ 4p ก๊าซนีออนจะเกิดการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous emission) และลดระดับพลังงานอย่างรวดเร็ว (Fast decay) มาสู่ระดับพลังงาน 3s ที่ระดับพลังงานนี้ ก๊าซนีออนจะชนกับผนังของหลอดเลเซอร์ (Wall collision) สูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน แล้วย้ายกลับมายังสถานะพื้น ถ้าหลอดเลเซอร์มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กๆ จะทำให้ก๊าซนีออนที่ระดับพลังงาน 3s ชนกับผนังของหลอดเลเซอร์มากขึ้น ก๊าซนีออนจะกลับสู่สถานะพื้นได้เร็วและมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่หลอดเลเซอร์ถูกออกแบบให้มีขนาดเล็ก ผลอีกอย่างหนึ่งคือจะทำให้เกิดประชากรผกผันได้เร็วขึ้นและต่อเนื่อง (CW)



รูปที่ 3.16 แสดงไดอะแกรมระดับพลังงาน (Energy level diagram) ของเลเซอร์ฮีเลียมนีออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

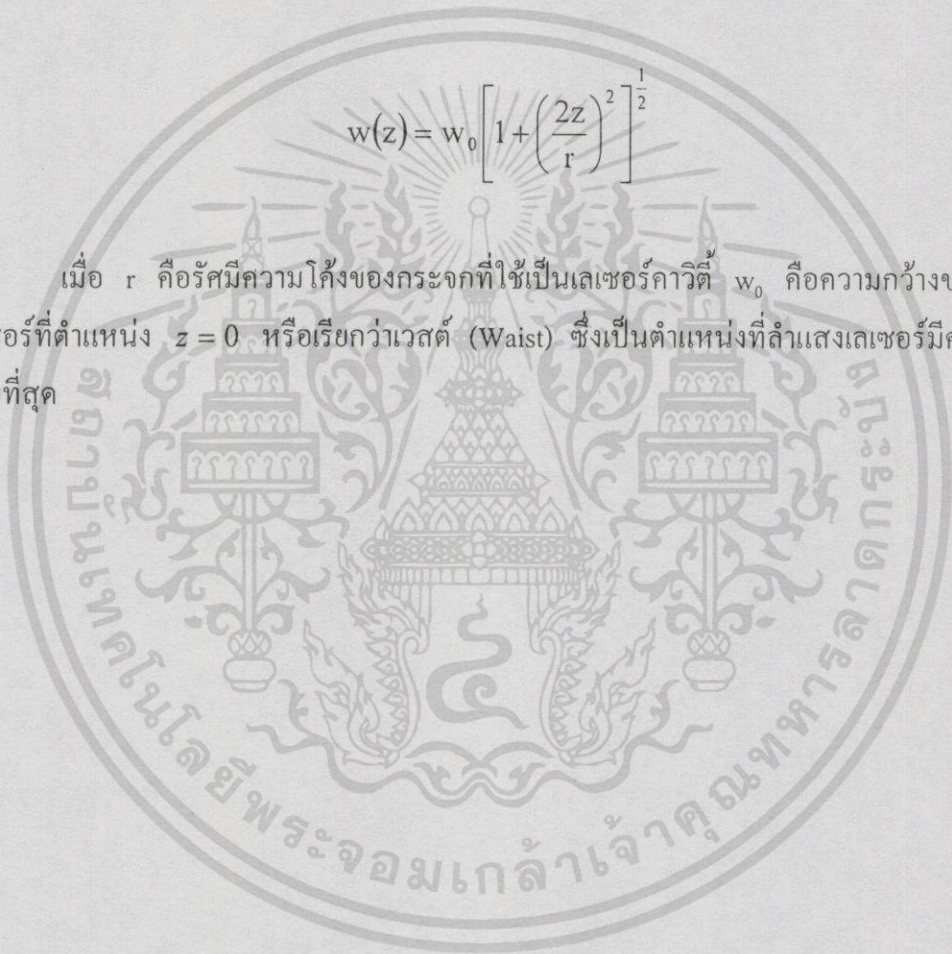
เนื่องจากเลเซอร์ฮีเลียมนีออนให้แสงเลเซอร์เป็นแบบโหมดเดียว  $TEM_{00}$  ดังนั้นลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าจึงเป็นแบบเกาส์เซียน (Gaussian) ดังสมการ

$$E(x, y) = E_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w^2}\right) \quad (3.30)$$

เมื่อ  $x$  และ  $y$  คือตำแหน่งของลำแสงเลเซอร์ในแต่ละแนวแกน  $w$  คือความกว้างของลำแสงในทิศการเคลื่อนที่ซึ่งมีค่าดังสมการ

$$w(z) = w_0 \left[ 1 + \left( \frac{2z}{r} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.31)$$

เมื่อ  $r$  คือรัศมีความโค้งของกระจกที่ใช้เป็นเลเซอร์ควิตี้  $w_0$  คือความกว้างของลำแสงเลเซอร์ที่ตำแหน่ง  $z = 0$  หรือเรียกว่าเวสต์ (Waist) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ลำแสงเลเซอร์มีความกว้างน้อยที่สุด



### 3.6 อาพันธ์ (Coherence)

การศึกษาคุณสมบัติความเป็นอาพันธ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าของสนามไฟฟ้ากับตำแหน่งและเวลาของการเคลื่อนที่ว่า เมื่อตำแหน่งและเวลาของการเคลื่อนที่เปลี่ยนไปจะทำให้ค่าของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนไปอย่างไร การศึกษาคุณสมบัติความเป็นอาพันธ์สามารถพิจารณาได้ 2 แบบคือ อาพันธ์ตามเวลา (Temporal coherence) และอาพันธ์ตามตำแหน่ง (Spatial coherence)

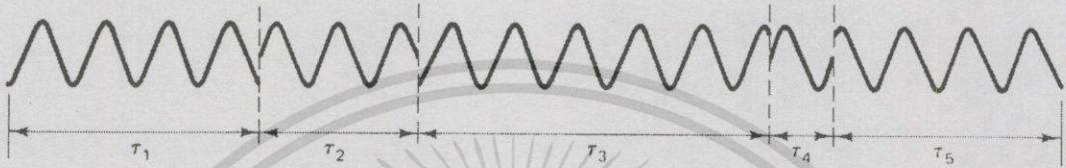
การพิจารณาอาพันธ์ตามตำแหน่งหรืออาพันธ์ตามขวาง (Lateral coherence) มีดังนี้ เมื่อให้แสงเดินทางผ่านจุดสองจุดคือ จุด  $P_1$  และ  $P_2$  พร้อมกัน ที่เวลา  $t=0$  โดยที่  $P_1$  และ  $P_2$  อยู่ในแนวหน้าคลื่นเดียวกัน ถ้าให้  $E_1(t)$  และ  $E_2(t)$  เป็นค่าแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าที่จุด  $P_1$  และ  $P_2$  ตามลำดับและให้ค่าความต่างเฟสระหว่าง  $E_1(t=0)$  และ  $E_2(t=0)$  มีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อเวลาผ่านไป  $t = \tau$  จะทำให้ตำแหน่งของสนามไฟฟ้า  $E_1(t)$  และ  $E_2(t)$  เปลี่ยนไปด้วย ถ้าที่เวลา  $t = \tau$  ค่าความต่างเฟสระหว่าง  $E_1(t=\tau)$  และ  $E_2(t=\tau)$  ยังคงมีค่าเท่ากับศูนย์อยู่เช่นเดิม จะเรียกสนามไฟฟ้า  $E_1(t)$  และ  $E_2(t)$  ว่ามีความเป็นอาพันธ์ตามตำแหน่งโดยสมบูรณ์ (Perfect spatial coherence) แต่ถ้าที่เวลา  $t = \tau$  ค่าความต่างเฟสระหว่าง  $E_1(t=\tau)$  และ  $E_2(t=\tau)$  มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ จะเรียกสนามไฟฟ้า  $E_1(t)$  และ  $E_2(t)$  ว่ามีความเป็นอาพันธ์ตามตำแหน่งบางส่วน (Partial spatial coherence)

การพิจารณาอาพันธ์ตามเวลาหรืออาพันธ์ตามยาว (Longitudinal coherence) มีดังนี้ เมื่อให้แสงเดินทางผ่านจุด  $P_1$  ที่เวลา  $t$  และ  $t + \tau$  การเปลี่ยนแปลงของค่าความต่างเฟสระหว่าง  $E_1(t)$  และ  $E_1(t+\tau)$  จะเป็นตัวบอกความเป็นอาพันธ์ตามเวลาของแสงนั้นๆ ถ้าค่าความต่างเฟสของแสงที่เดินทางผ่านจุด  $P_1$  ที่เวลา  $t$  และ  $t + \tau$  มีค่าคงที่ จะเรียกสนามไฟฟ้า  $E_1(t)$  ว่ามีความเป็นอาพันธ์ตามเวลาโดยสมบูรณ์ (Perfect temporal coherence) แต่ถ้าค่าความต่างเฟสมีการเปลี่ยนแปลง จะเรียกสนามไฟฟ้า  $E_1(t)$  ว่ามีความเป็นอาพันธ์ตามเวลาบางส่วน (Partial temporal coherence)

การหาความเป็นอาพันธ์ของแสงใดๆ สามารถพิจารณาจากการเกิดการแทรกสอดของแสงนั้น โดยอาศัยเครื่องมือที่เรียกว่า ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ ดังรูปที่ (4.1) ถ้านำฉากมารับภาพแทนดีเทคเตอร์ จะเห็นริ้วการแทรกสอดเป็นวงมืด-สว่างสลับกันไป โดยริ้วการแทรกสอดเหล่านี้จะชัดเจนมากน้อยเพียงใดนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติความเป็นอาพันธ์ของแสงที่มาแทรกสอดกัน โดยความคมชัดของริ้วการแทรกสอด (Visibility) หาได้จาก 
$$\text{Visibility} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$
 เมื่อ  $I_{\max}$  และ  $I_{\min}$  คือค่าความเข้มแสงสูงสุดและต่ำสุดของริ้วการแทรกสอดตามลำดับ เมื่อแสง 2 ลำเกิดการแทรกสอดกันแล้วทำให้ค่า  $\text{Visibility} = 1$  นั้นหมายความว่าแสงทั้งสองมีคุณสมบัติความเป็นอาพันธ์โดยสมบูรณ์ (Perfect coherence) แต่ถ้า  $\text{Visibility} = 0$  แสดงว่าแสงทั้งสองไม่มีคุณสมบัติความเป็นอาพันธ์ (Incoherence) ถ้า  $0 < \text{Visibility} < 1$  แสดงว่าแสงทั้งสองมีคุณสมบัติความเป็นอาพันธ์บาง

ส่วน (Partial coherence) สำหรับกรณีของแสงเลเซอร์จะพบว่าค่า  $\text{Visibility} \approx 1$

พิจารณาแหล่งกำเนิดแสงที่ให้แสงออกมาในช่วงชีวิตเฉลี่ย  $\tau_0$  ดังรูปที่ 3.17 แต่ละคลื่นจะมีความยาวหรือช่วงชีวิต ( $\tau$ ) ต่างๆ กัน โดยแต่ละคลื่นจะแยกจากกันด้วยความไม่ต่อเนื่องของเฟส เรียกค่าเฉลี่ยของช่วงชีวิต ( $\tau_0$ ) ว่า เวลาอาพันธ์ (Coherent time) ของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง เนื่องจากความกว้างของสเปกตรัมความถี่จะแปรผกผันกับเวลาอาพันธ์ ดังนั้นยิ่งเวลาอาพันธ์มีค่ามาก แสดงว่าแหล่งกำเนิดแสงนั้นมีโอกาสให้แสงที่มีความยาวคลื่นเดียวมากขึ้น



รูปที่ 3.17 แสดงคลื่นฮาร์มอนิกที่มีช่วงชีวิต ( $\tau$ ) ต่างๆ กัน

ถ้ากำหนดให้ ความยาวอาพันธ์ (Coherent length :  $L_c$ ) เป็นความยาวของคลื่นที่มีช่วงชีวิตเฉลี่ย  $\tau_0$  ดังนั้น

$$L_c = c\tau_0 = \frac{c}{\Delta\nu} \quad (3.32)$$

เมื่อ  $c$  คือ ความเร็วแสง และจาก  $v = \frac{c}{\lambda}$  จะได้

$$L_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (3.33)$$

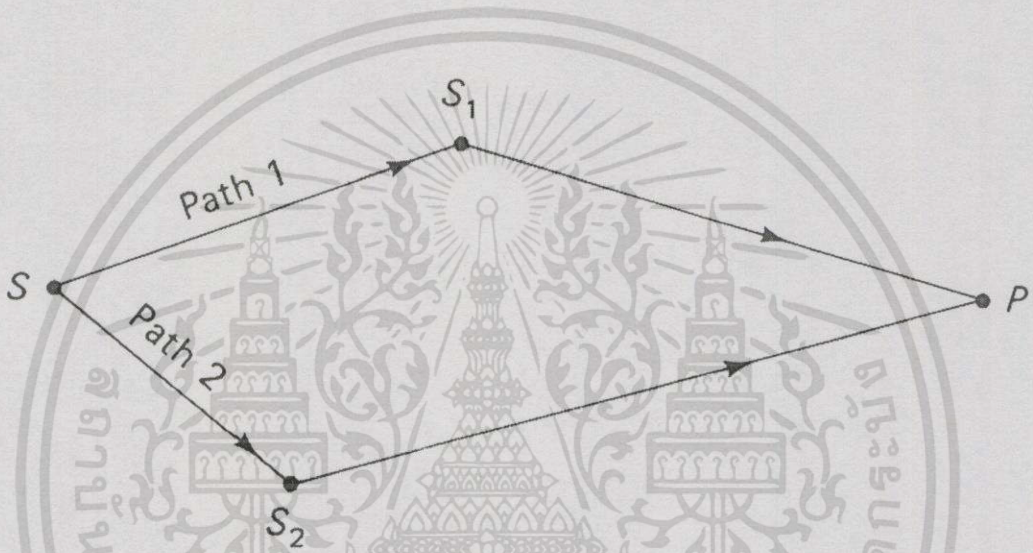
จากสมการที่ (3.33) จะเห็นว่าถ้าทราบความกว้างของสเปกตรัมความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงก็จะหาความยาวอาพันธ์ได้เช่น แสงขาวมีความกว้างของสเปกตรัมความยาวคลื่นประมาณ 300 นาโนเมตรและมีความยาวคลื่นกลางเท่ากับ 550 นาโนเมตร ดังนั้นความยาวอาพันธ์คือ 1008.33 นาโนเมตร จะเห็นว่าความยาวอาพันธ์ของแสงขาวมีค่าน้อยมาก ทำให้เมื่อแสงขาวเกิดการแทรกสอดกันจะไม่สามารถสังเกตเห็นริ้วของการแทรกสอดได้ ส่วนแสงเลเซอร์เช่น เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์มีความยาวคลื่นเท่ากับ 1.06 ไมโครเมตรและความกว้างของสเปกตรัมความยาวคลื่นประมาณ  $10^{-5}$  นาโนเมตร ดังนั้นจะมีความยาวอาพันธ์ประมาณ 11 กิโลเมตร สำหรับเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่ใช้กันทั่วไปในห้องปฏิบัติการจะมีความยาวอาพันธ์ที่แตกต่างกันไปคือมีค่าอยู่ในช่วง 10-20 เซนติเมตร จะเห็นว่าแสงเลเซอร์มีความเป็นอาพันธ์สูงและมีคุณสมบัติที่เด่นกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงชนิดอื่นๆ จึงทำให้เลเซอร์ถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางเช่น การศึกษาโฮโลกราฟี (Holography) เป็นต้น

### 3.6.1 อาพันธ์ตามเวลา (Temporal coherence) และอาพันธ์บางส่วน (Partial coherence)

ถ้าคลื่นแสง 2 ลำมีเฟสต่างกันคงที่ หมายความว่าแสงทั้งสองมีความเป็นอาพันธ์ซึ่งกันและกัน แต่ในทางปฏิบัติการที่แสง 2 ลำจะมีเฟสต่างกันคงที่ตลอดนั้นเป็นไปได้ยาก จึงกล่าวได้ว่าแสงทั้งสองมีความเป็นอาพันธ์บางส่วน การศึกษาความเป็นอาพันธ์บางส่วนกระทำได้ดังนี้



รูปที่ 3.18 แสดงการแทรกสอดของแสง 2 ลำที่มาจากแหล่งกำเนิดแสง  $S_1$  และ  $S_2$

พิจารณาการแทรกสอดของแสงดังรูปที่ 3.18 ให้  $S_1$  และ  $S_2$  เป็นแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ และจุด P เป็นจุดที่เกิดการแทรกสอด ถ้าให้แสงที่มาจาก  $S_1$  และ  $S_2$  เป็นดังสมการ

$$E_1(r, t) = E_{01} e^{i(k_1 r - \omega t + \alpha_1)} \quad (3.34)$$

$$E_2(r, t) = E_{02} e^{i(k_2 r - \omega t + \alpha_2)} \quad (3.35)$$

ที่จุด P แสงทั้งสองจะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเท่านั้น เนื่องจากระยะทางที่แสงทั้งสองเดินทางได้ไม่เท่ากัน ถ้าให้ระยะ  $S_2 P$  มากกว่าระยะ  $S_1 P$  และเวลาที่แสงใช้ในการเดินทางจาก  $S_2$  มาถึง P มากกว่าเวลาของแสงจาก  $S_1$  มาถึง P อยู่  $\tau$  เนื่องจาก  $S_1$  และ  $S_2$  เป็นแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์

ซึ่งกันและกันแสดงว่าเฟสเริ่มต้นของแสงทั้งสองมีค่าตรงกัน ( $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ ) ดังนั้นสมการคลื่นแสงรวมที่จุด P คือ

$$\begin{aligned} E(t) &= E_1(t) + E_2(t + \tau) \\ &= E_{01}e^{-i\omega t} + E_{02}e^{-i\omega(t+\tau)} \end{aligned} \quad (3.36)$$

และความเข้มแสง (Intensity หรือ Irradiance) คือ

$$\begin{aligned} I &= \langle E \cdot E^* \rangle \\ &= \langle (E_1 + E_2) \cdot (E_1^* + E_2^*) \rangle \end{aligned} \quad (3.37)$$

เครื่องหมาย  $\langle \rangle$  หมายถึงค่าเฉลี่ยตลอดช่วงเวลา (Time average) จากสมการที่ (3.37) จะได้

$$\begin{aligned} I &= \langle E_1^2 + E_2^2 + (E_1 \cdot E_2^*) + (E_2 \cdot E_1^*) \rangle \\ &= I_1 + I_2 + 2\text{Re}[\langle E_1 \cdot E_2^* \rangle] \end{aligned} \quad (3.38)$$

เมื่อ  $I_1$  และ  $I_2$  คือความเข้มแสงของแสงที่มาจากแหล่งกำเนิดแสง  $S_1$  และ  $S_2$  ตามลำดับ จากสมการที่ (3.38) จะเห็นว่าเทอมที่สามของสมการจะมีผลต่อความเข้มแสงของริ้วการแทรกสอด (ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของแสงทั้งสอง) ดังนั้นถ้านิยามให้

$$\Gamma(\tau) = \langle E_1(t) \cdot E_2^*(t + \tau) \rangle \quad (3.39)$$

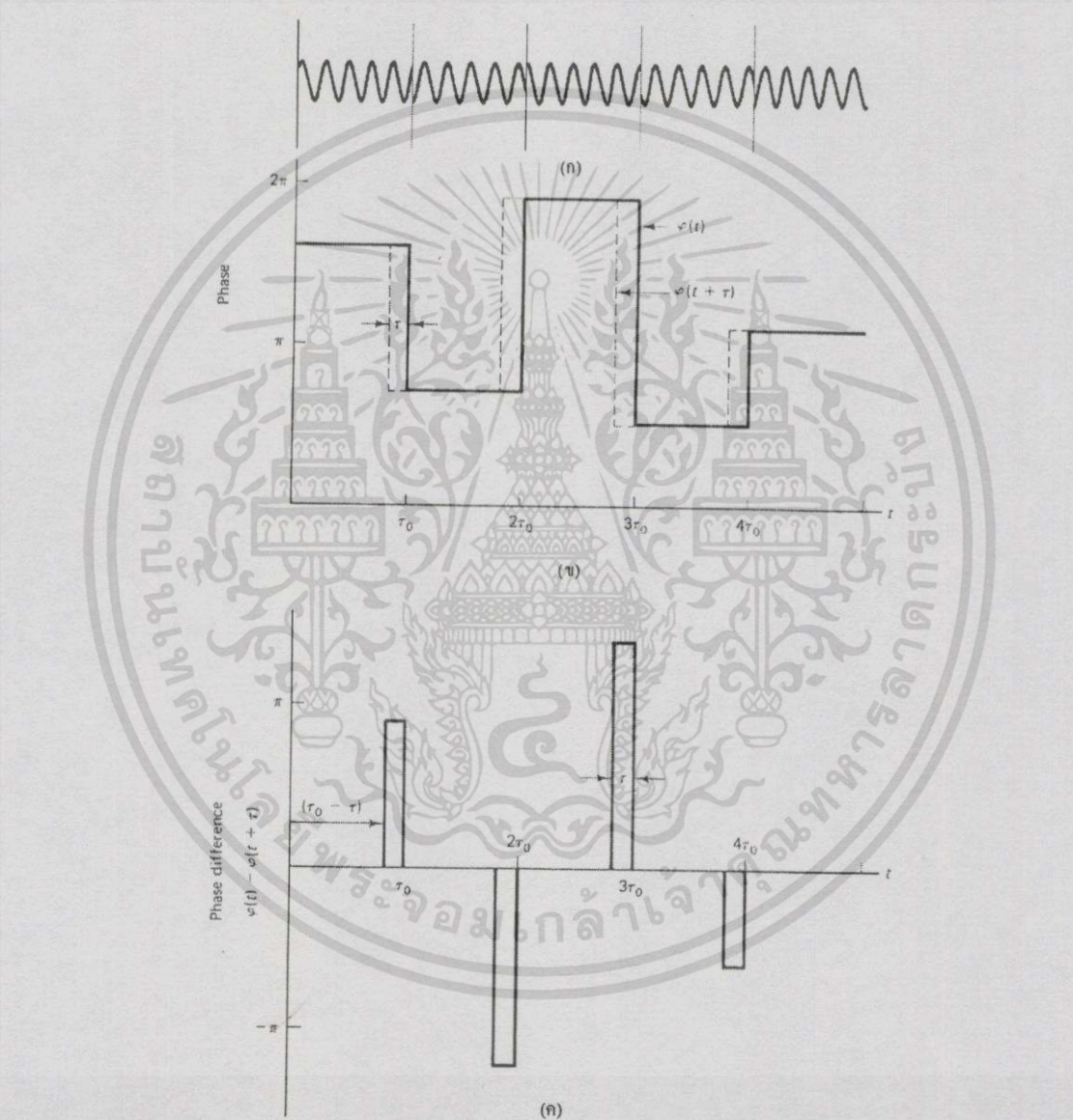
$\Gamma(\tau)$  เรียกว่า ฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (Correlation function) เมื่อทำการนอร์มอไลซ์ฟังก์ชันสหสัมพันธ์จะได้

$$\gamma(\tau) = \frac{\Gamma(\tau)}{\Gamma(0)} = \frac{\Gamma(\tau)}{\sqrt{I_1 I_2}} \quad (3.40)$$

ดังนั้นจะได้ความเข้มแสงที่จุด P คือ

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \text{Re}[\gamma(\tau)] \quad (3.41)$$

จากสมการที่ (3.41) จะเห็นว่า  $\gamma(\tau)$  เป็นเทอมที่เกี่ยวข้องกับการแทรกสอดของแสงโดยตรง ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า  $\tau$  ซึ่งเป็นความแตกต่างของเวลาที่แสงทั้งสองใช้ในการเดินทางไปยังจุด P ดังนั้นถ้าทราบความแตกต่างของเวลาที่แสงทั้งสองใช้เดินทาง ( $\tau$ ) ว่าสัมพันธ์กับเวลาอาพันธ์ของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง ( $\tau_0$ ) อย่างไร ก็สามารถหาระดับอาพันธ์ของแสงที่แทรกสอดกันได้ ซึ่งพบว่าถ้า  $\tau > \tau_0$  จะทำให้แสงทั้งสองที่มาพบกันที่จุด P อาจไม่เป็นแสงอาพันธ์ซึ่งกันและกัน



รูปที่ 3.19 แสดงความไม่ต่อเนื่องของเฟสของคลื่น ซึ่งจะเปลี่ยนเฟสทุกๆ ช่วงเวลา  $\tau$  (ก)

รูป (ข) แสดงการเปลี่ยนเฟสที่เกิดขึ้นทุกๆ ช่วงเวลา  $\tau$  และ  $\tau_0$

รูป (ค) เป็นความต่างเฟสของคลื่นทั้งสองที่มีการเปลี่ยนเฟสทุกๆ ช่วงเวลา  $\tau$  และ  $\tau_0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าให้  $E_{01} = E_{02} = E_0$  และช่วงเวลาอาพันธ์ของแสงจากแหล่งกำเนิดมีค่า  $\tau_0$  ซึ่งเป็นค่าคงที่ จากรูปที่ 3.19(ก) คลื่นจะมีความไม่ต่อเนื่องของเฟสเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอที่ทุกๆ ช่วงเวลา  $\tau$  รูปที่ 3.19(ข)  $\phi(t)$  ของคลื่นลำแรกจะเปลี่ยนไปทุกๆ ช่วงเวลา  $\tau_0$  ส่วน  $\phi(t+\tau)$  แสดงถึงเฟสของคลื่นแสง ลำที่สองซึ่งจะเปลี่ยนไปทุกๆ ช่วงเวลา  $\tau$  โดยที่  $\phi(t+\tau)$  จะมีลักษณะเช่นเดียวกับ  $\phi(t)$  แต่เกิดขึ้น ต่างกันด้วยเวลา  $\tau$  ส่วนรูปที่ 3.19(ค) เป็นความต่างเฟสของคลื่นทั้งสอง ดังนั้นจากสมการที่ (3.41) เขียนใหม่ได้

$$\gamma(\tau) = \frac{\langle E(t) \cdot E^*(t+\tau) \rangle}{E_0^2} \quad (3.42)$$

จาก

$$E(t) = E_0 e^{-i[\omega t - \phi(t)]}$$

ดังนั้น

$$E(t) \cdot E^*(t+\tau) = E_0^2 e^{i\omega\tau} e^{i[\phi(t) - \phi(t+\tau)]} \quad (3.43)$$

แทนสมการที่ (3.43) ลงในสมการที่ (3.42) จะได้

$$\begin{aligned} \gamma(\tau) &= e^{i\omega\tau} \langle e^{i[\phi(t) - \phi(t+\tau)]} \rangle \\ &= e^{i\omega\tau} \left( \frac{1}{T} \int_0^T e^{i[\phi(t) - \phi(t+\tau)]} dt \right) \\ &= \left( 1 - \frac{\tau}{\tau_0} \right) e^{i\omega\tau} \end{aligned} \quad (3.44)$$

และ

$$\text{Re}[\gamma(t)] = \left( 1 - \frac{\tau}{\tau_0} \right) \cos(\omega\tau) \quad (3.45)$$

เมื่อ  $T$  เป็นเวลาที่นานมากพอ (มีค่ามากกว่า  $\tau_0$  มากๆ) จากสมการที่ (3.45) จะเห็นว่าถ้า  $\tau = 0$  สมการจะมีค่าเป็น 1 (ความต่างเฟสของแสงทั้งสองเท่ากับศูนย์) ถ้า  $\tau = \tau_0$  สมการจะมีค่าเป็น 0 (ผลต่างทางเดินของแสงมีค่าเท่ากับความยาวอาพันธ์) และมีค่าอยู่ระหว่าง 0 กับ 1 ถ้า  $0 < \tau < \tau_0$  จากสมการที่ (3.44) และ (3.45) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|\gamma(\tau)| = 1 - \frac{\tau}{\tau_0} \quad (3.46)$$

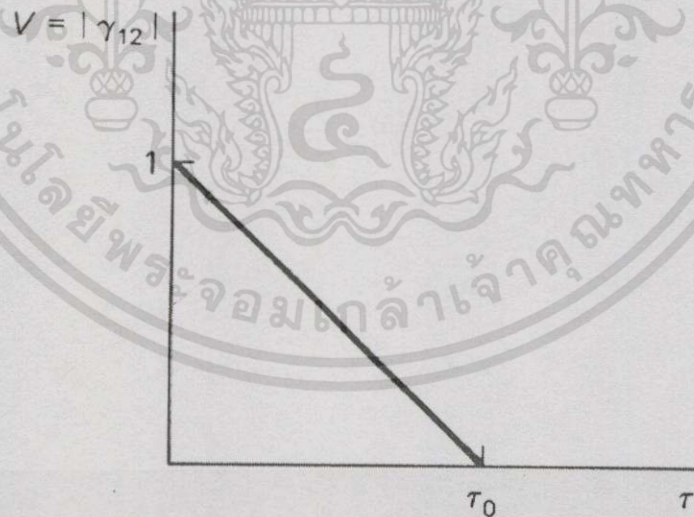
ดังนั้น

$$\gamma(\tau) = |\gamma(\tau)| e^{i\omega\tau} \quad (3.47)$$

และ

$$\text{Re}[\gamma(\tau)] = |\gamma(\tau)| \cos(\omega\tau) \quad (3.48)$$

ค่า  $|\gamma(\tau)|$  นี้จะเปลี่ยนแปลงตามความสัมพันธ์ระหว่าง  $\tau$  กับ  $\tau_0$  หรือกล่าวว่าเป็นค่าที่บอกให้ทราบถึงความเป็นคลื่นอาพันธ์ของคลื่นแสงที่มาแทรกสอดกัน ถ้าคลื่นทั้งสองเป็นคลื่นอาพันธ์ซึ่งกันและกันคือมีเฟสต่างกันคงที่ตลอด จะได้  $|\gamma(\tau)| = 1$  แต่ถ้าคลื่นทั้งสองไม่เป็นคลื่นอาพันธ์ซึ่งกันและกันคือมีเฟสต่างกันไม่คงที่ จะได้  $|\gamma(\tau)| = 0$  ดังนั้นจะเรียก  $|\gamma(\tau)|$  ว่า ระดับของอาพันธ์ (Degree of coherence) ดังรูปที่ 3.20 และค่านี้จะเป็นตัวกำหนดความคมชัดของริ้วการแทรกสอด (Fringe visibility) ด้วย จากรูปที่ 3.20 จะเห็นว่าถ้าคลื่นทั้งสองใช้เวลาในการเดินทางเท่ากัน (เฟสต่างกันคงที่) จะทำให้ความเป็นอาพันธ์ของแสงทั้งสองมีค่าสูงสุดคือ 1 แต่ถ้าคลื่นทั้งสองใช้เวลาเดินทางต่างกันเท่ากับเวลาอาพันธ์ ( $\tau_0$ ) ความเป็นอาพันธ์ของคลื่นทั้งสองจะเป็นศูนย์



รูปที่ 3.20 แสดงระดับอาพันธ์ของคลื่นแสงที่มาแทรกสอดกัน

สมบัติความเป็นอาพันธ์ของคลื่น 2 ลำที่มาจากแหล่งกำเนิดเดียวกันและมีแอมพลิจูดเท่ากัน

( $I_1 = I_2 = I_0$ ) สามารถสรุปได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) คลื่นทั้งสองไม่เป็นคลื่นอาพันธ์ซึ่งกันและกัน (Complete incoherence)

ในกรณีนี้คือ  $\tau \rightarrow \tau_0$  และ  $|\gamma(\tau)| = 0$  จะได้

$$I = I_1 + I_2 = 2I_0$$

$$\text{Visibility} = 0$$

- 2) คลื่นทั้งสองเป็นคลื่นอาพันธ์ซึ่งกันและกัน (Complete coherence)

ในกรณีนี้คือ  $\tau = 0$  และ  $|\gamma(\tau)| = 1$  จะได้

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\omega\tau)$$

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} = 4I_0$$

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} = 0$$

$$\text{Visibility} = 1$$

- 3) คลื่นทั้งสองเป็นคลื่นอาพันธ์บางส่วน (Partial coherence)

ในกรณีนี้คือ  $0 < \tau < \tau_0$  และ  $0 < |\gamma(\tau)| < 1$  จะได้

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \text{Re}[\gamma(\tau)] = 2I_0 (1 + \text{Re}[\gamma(\tau)])$$

$$I_{\max} = 2I_0 [1 + |\gamma(\tau)|]$$

$$I_{\min} = 2I_0 [1 - |\gamma(\tau)|]$$

$$\text{Visibility} = |\gamma(\tau)|$$

ในกรณีที่คลื่นทั้งสองมีแอมพลิจูดเท่ากันจะเห็นว่า ความคมชัดของริ้วการแทรกสอดจะเท่ากับ แอมพลิจูดของ  $|\gamma(\tau)|$  ซึ่งทั้งสองเทอมนี้ต่างก็ใช้เป็นตัววัดระดับของอาพันธ์ของแสงได้เช่นกัน

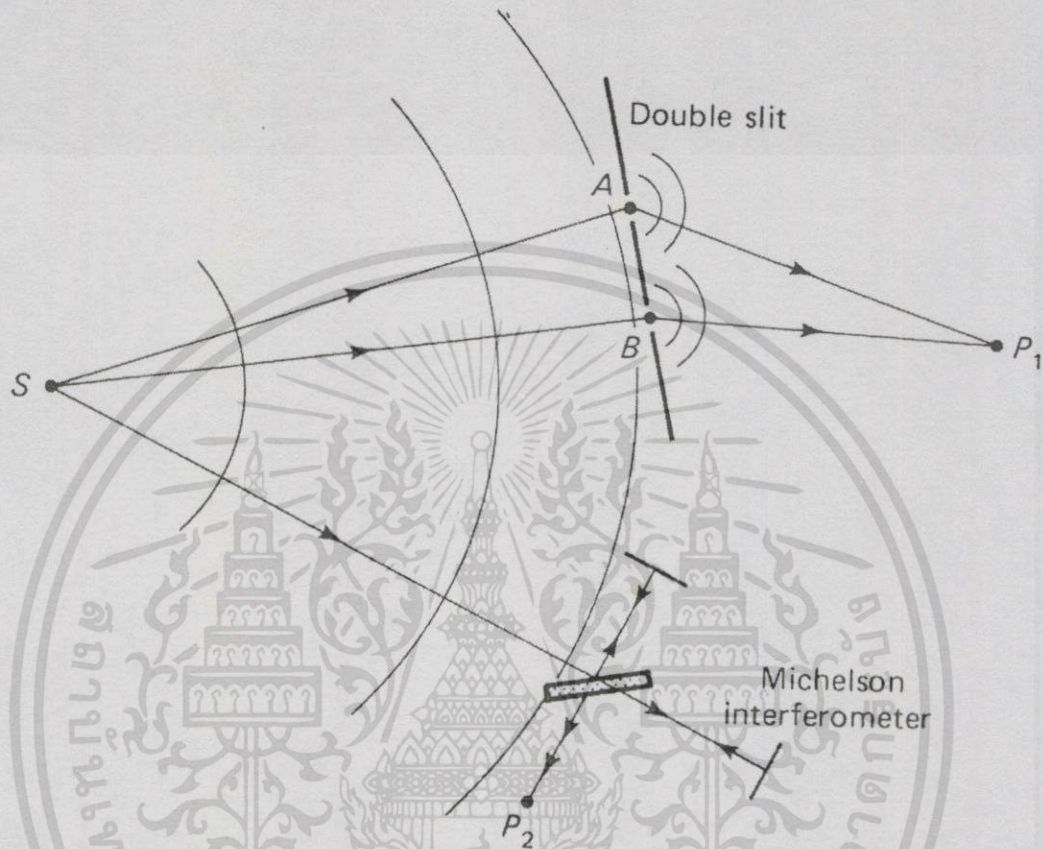
### 3.6.2 อาพันธ์ตามตำแหน่ง (Spatial coherence)

จากการพิจารณาอาพันธ์ตามเวลาจะเห็นว่าต้องอาศัยความสัมพันธ์ของเฟสที่จุดต่างๆ ในรูปของเวลาของคลื่นแสงที่เดินทางออกไปจากแหล่งกำเนิด ด้วยเหตุนี้จึงเรียกอาพันธ์ตามเวลาว่าเป็นอาพันธ์ตามยาว (Longitudinal coherence) ระดับอาพันธ์แบบนี้จะสังเกตได้จากความคมชัดของริ้วการแทรกสอดโดยอาศัยเครื่องมือประเภทที่มีการแยกแอมพลิจูดของแสงออกแล้วนำกลับมารวมกันใหม่เช่น ไมเคลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ อาพันธ์ตามเวลานี้ใช้วัดความยาวอาพันธ์ของคลื่นที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดได้ แต่ถ้าเป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ของเฟสระหว่างจุดต่างๆ ในรูปของตำแหน่งบนหน้าคลื่นที่ออกจากแหล่งกำเนิด เรียกอาพันธ์ชนิดนี้ว่า อาพันธ์ตามตำแหน่งหรือ

อาพันธ์ตามขวาง (Lateral coherence) ซึ่งอาพันธ์ลักษณะนี้มักใช้พิจารณาในกรณีของการแทรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายกเว้นกรณีอื่น มิฉะนั้นจะถือว่าผิดกฎหมาย  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สอดที่เกิดจากการแบ่งหน้าคลื่น (Wavefront division interference) เช่น ในเรื่องการแทรกสอดที่เกิดจากสลิตคู่ของยัง ซึ่งความคมชัดของริ้วการแทรกสอดจะขึ้นอยู่กับระดับอาพันธ์ระหว่างหน้าคลื่นบนสลิตทั้งสอง



รูปที่ 3.21 แสดงการแทรกสอดในแบบแบ่งหน้าคลื่น (Double slit) และแบ่งแอมพลิจูดของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง (Michelson interferometer)

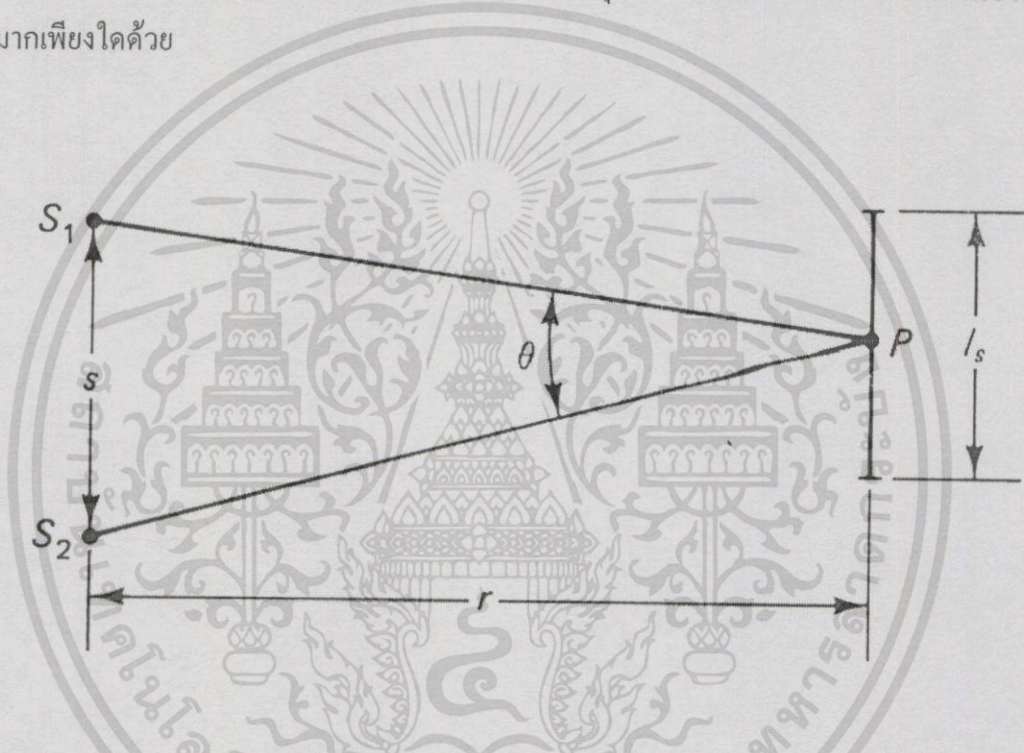
จากรูปที่ 3.21 แสงจากแหล่งกำเนิดแสง S ผ่านสลิตคู่ A และ B จะเป็นคลื่นอาพันธ์ตามตำแหน่ง ถ้า S เป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดซึ่งให้แสงที่มีหน้าคลื่นทรงกลมออกมาและบนหน้าคลื่นหนึ่งๆ จะมีเฟสเท่ากันทุกจุด ภาพการแทรกสอดที่เกิดขึ้นที่จุด  $P_1$  จะเป็นอย่างไรย่อมเป็นผลมาจากทั้งสมบัติของอาพันธ์ตามเวลาและอาพันธ์ตามตำแหน่งของแสงที่มาตามแนว  $SAP_1$  และ  $SBP_1$  ถ้าระดับอาพันธ์ของแสงทั้งสองต่ำสูงก็จะเห็นภาพของการแทรกสอดชัด สมบัติของอาพันธ์ตามเวลาจะทราบได้จากการเปรียบเทียบผลต่างทางเดินของแสงกับความยาวอาพันธ์คือ

$$OPD = SAP_1 - SBP_1 \quad (3.49)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคิดเช่นนี้จะเสมือนกับการเปรียบเทียบคลื่น 2 คลื่นที่เคลื่อนมาในแนวรัศมีเดียวกัน ณ ตำแหน่งของหน้าคลื่น 2 หน้าคลื่นที่อยู่ห่างกันเท่ากับ OPD อาพันธ์ตามเวลาของคลื่นนี้สามารถวัดได้ด้วยไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ ซึ่งภาพของการแทรกสอดจะชัดเจนถ้า OPD มีค่าน้อยกว่าความยาวอาพันธ์  $L_c$  มากและอาจไม่เห็นภาพการแทรกสอดเลยถ้า  $OPD \geq L_c$

ในทางปฏิบัติ นั้น  $S$  มักจะเป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบแผ่กระจาย ดังนั้นแสงที่มาถึงจุด  $A$  และ  $B$  จะมาจากหลายจุดบนแหล่งกำเนิด ซึ่งแสงจากจุดต่างๆ ของแหล่งกำเนิดนี้จะไม่เป็นแสงอาพันธ์ซึ่งกันและกัน ดังนั้นอาพันธ์ตามตำแหน่งของแสงที่จุด  $A$  และ  $B$  จะดีเพียงใดขึ้นอยู่กับว่าแหล่งกำเนิดแสงมีสมบัติใกล้เคียงกับแหล่งกำเนิดแบบจุดทั้งในด้านขนาดและสมบัติด้านอาพันธ์ได้มากเพียงใดด้วย



รูปที่ 3.22 แสดงบริเวณของการแทรกสอดที่มีขนาดขนาด  $l_s$  ซึ่งแสงที่มาจาก  $S_1$  และ  $S_2$  ยังคงเป็นแสงอาพันธ์อยู่

จากรูปที่ 3.22 ถ้าให้แสงจากแหล่งกำเนิด  $S_1$  และ  $S_2$  อยู่ห่างกันเป็นระยะ  $s$  และให้แสงความยาวคลื่น  $\lambda$  ไปพบกันที่จุด  $P$  บนฉากที่อยู่ไกลออกไปเป็นระยะ  $r$  บนฉากนี้จะมีบริเวณที่มีขนาด  $l_s$  ซึ่งแสงที่มาจาก  $S_1$  และ  $S_2$  ยังคงเป็นแสงอาพันธ์อยู่ ดังนั้น

$$l_s < \frac{r\lambda}{s} \approx \frac{\lambda}{\theta} \quad (3.50)$$

เมื่อ  $\theta$  เป็นมุมที่จุด  $P$  รองรับแสงจาก  $S_1$  และ  $S_2$  ซึ่งอาจจะสรุปได้ว่า ณ จุดใดๆ ที่แสงจากแหล่งกำเนิดไปถึง จะมีบริเวณหนึ่งที่แสงที่มาถึงเป็นแสงอาพันธ์ซึ่งกันและกัน บริเวณนี้จะมีขนาด  $\frac{\pi l_s^2}{4}$  รอบจุด  $P$  และภายในบริเวณนี้จะสามารถมองเห็นภาพการแทรกสอดได้

### 3.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยและหลักการงานเบื้องต้นของอุปกรณ์ ซึ่งได้แก่ ใยแก้วนำแสง โดยกล่าวถึงส่วนประกอบพื้นฐานของใยแก้วนำแสง ลักษณะของแสงที่แพร่กระจายในใยแก้วนำแสง พารามิเตอร์ที่สำคัญเกี่ยวกับใยแก้วนำแสง ชนิดของใยแก้วนำแสงได้แก่ ใยแก้วนำแสงชนิดสเต็ปอินเด็กซ์และใยแก้วนำแสงชนิดเกรดอินเด็กซ์ การกระจายของแสงในใยแก้วนำแสง ในส่วนของเลเซอร์กล่าวถึงความเป็นมาของเลเซอร์ ระบบเลเซอร์ หลักการเกิดแสงเลเซอร์ คุณสมบัติของแสงเลเซอร์ โหมดตามยาวและโหมดตามขวางของแสงเลเซอร์ เลเซอร์ก๊าซและเลเซอร์ฮีเลียมนีออน พร้อมทั้งโครงสร้างภายในของเลเซอร์ฮีเลียมนีออนและหลักการเกิดแสงเลเซอร์ของเลเซอร์ฮีเลียมนีออน ในหัวข้อสุดท้ายได้กล่าวถึงความเป็นอาพันธ์ของแสง ซึ่งได้แก่ อาพันธ์ตามเวลา อาพันธ์ตามตำแหน่งและอาพันธ์บางส่วน

## บทที่ 4

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัย โดยในงานวิจัยนี้ได้แบ่งเนื้อหาที่ทำการศึกษาวิจัย ออกเป็น 4 ส่วน คือ

- 1) ศึกษาการวัดระยะทางด้วยไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม นีออนที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร
- 2) ศึกษาการลดความยาวอาพันธ์ของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ด้วยเทคนิคการสแกรมเบิลโหมคโดยใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมคชนิดสเต็ปอิน เด็กซ์ที่มีความยาวต่างๆ
- 3) ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรง
- 4) ประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ศึกษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นทางแสงของอะรัล ไครท์ และเปอร์สเปกซ์โดยการให้แรงกดกับวัสดุ

ในหัวข้อแรกจะกล่าวถึงการทำงานและหลักการวัดของไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ที่ใช้ ในงานวิจัยนี้ จากนั้นก็จะเป็นวิธีการดำเนินงานวิจัยทั้ง 4 ส่วน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ (Michelson interferometer)

ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่สามารถใช้วัดระยะทางอย่างละเอียดได้โดย อาศัยหลักการแทรกสอดชนิดแบ่งแอมพลิจูด (Amplitude division interferometry) ของแสงอาพันธ์ จากแหล่งกำเนิดแสง การแทรกสอดชนิดแบ่งแอมพลิจูดจะแยกลำแสงจากแหล่งกำเนิดแสงออกเป็น 2 ส่วน แล้วให้แต่ละส่วนเดินทางไปเป็นระยะทางต่างกัน ซึ่งจะมีผลต่อผลต่างทางเดินของแสงทั้งสอง จากนั้นจะจัดให้แสงทั้งสองกลับมารวมกันและแทรกสอดกันเกิดเป็นริ้วของการแทรกสอด จากรี้วการแทรกสอดที่ได้สามารถนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างทางเดินของแสง (หรือ ความเข้มแสง) กับปริมาณต่างๆ ในระบบตรวจวัดได้ ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ที่ใช้กัน โดยทั่วไปแสดงดังรูปที่ 4.1 แสงจากแหล่งกำเนิดแสง (Light source) จะถูกแยกออกเป็นสองลำแสง โดยตัวแยกลำแสง แสงแต่ละลำจะเดินทางไปเป็นระยะทางต่างกันตามเส้นทาง  $L_1$  และ  $L_2$  จากนั้น แสงทั้งสองจะถูกทำให้กลับมารวมกันอีกโดยการสะท้อนกับกระจก M1 และ M2 แสงสะท้อนทั้งสองจะผ่านตัวแยกลำแสงไปรวมกันที่ฉากรับภาพ (Screen) ซึ่งที่ฉากรับภาพจะปรากฏเป็นริ้วการแทรกสอดของแสงทั้งสอง ส่วนระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4.2

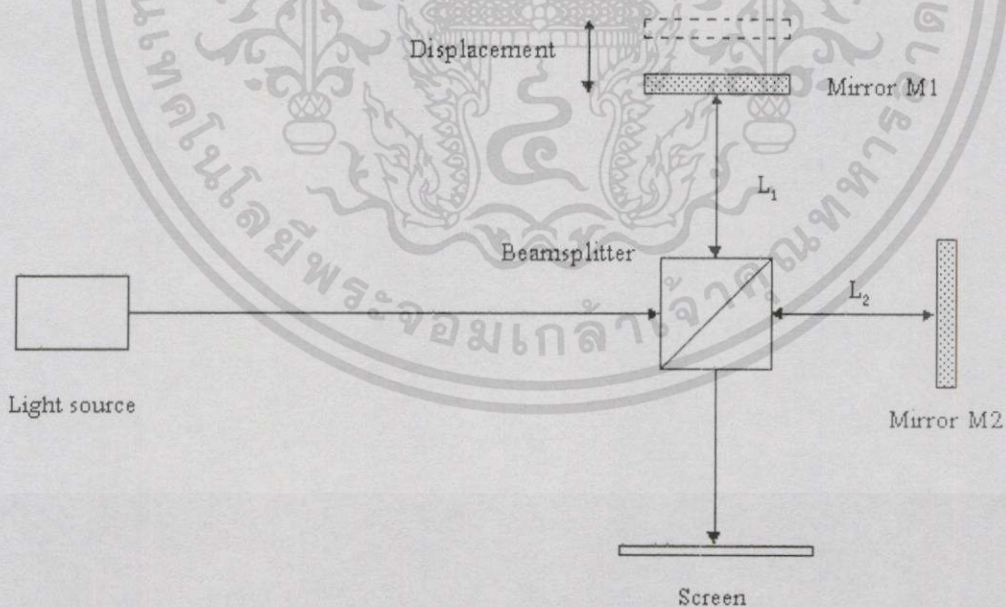
จะเห็นว่าไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มีการเพิ่มเติมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ บางส่วนได้แก่ โฟโตดีเทคเตอร์ ออสซิลโลสโคป ลำโพงและฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ เป็นต้น ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์เหล่านี้จะช่วยให้การวัดโดยใช้ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์มีประสิทธิภาพและถูกต้องมากขึ้น

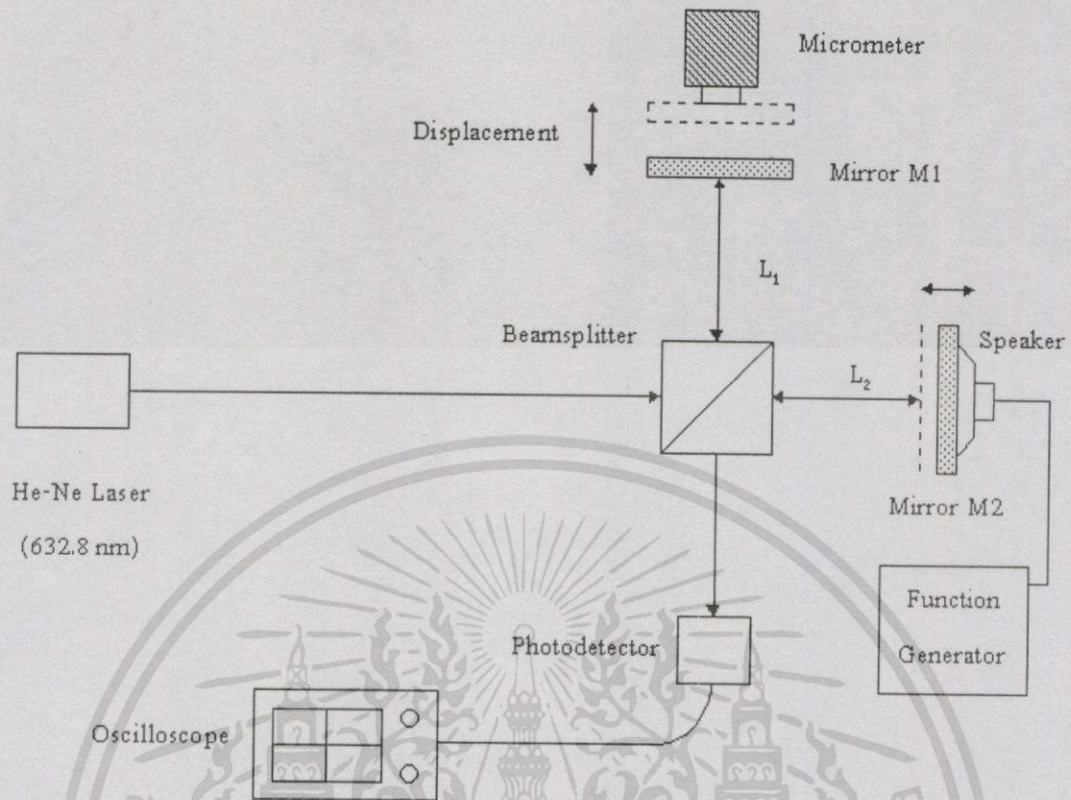
#### 4.1.1 หลักการ

จากรูปที่ 4.2 แหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ที่ใช้คือ เลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ให้แสงโหมดเดียว ( $TEM_{00}$ ) ชนิดโพลาไรซ์เชิงเส้น เมื่อฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงไปยังตัวแยกลำแสง (Beamsplitter : BS) เป็นแท่งแก้วที่มีคุณสมบัติให้แสงสะท้อนและทะลุผ่านได้ 50 % แสงจากแหล่งกำเนิดจะถูกแยกออกเป็น 2 ส่วนโดยมีแอมพลิจูดเท่ากัน ลำแสงส่วนที่ 1 จะสะท้อนกับ BS แล้วเดินทางไปตามเส้นทาง  $L_1$  จากนั้นจะสะท้อนกับกระจก M1 แล้วเดินทางกลับมายัง BS ทะลุผ่านไปยังโฟโตดีเทคเตอร์ ลำแสงส่วนที่ 2 จะทะลุผ่าน BS แล้วเดินทางไปตามเส้นทาง  $L_2$  จากนั้นจะสะท้อนกับกระจก M2 เดินทางกลับมายัง BS แสงจะสะท้อนกับ BS แล้วเดินทางไปยังโฟโตดีเทคเตอร์ แสงทั้งสองที่เดินทางมายังโฟโตดีเทคเตอร์จะเกิดการแทรกสอดกัน สัญญาณการแทรกสอดของแสงทั้งสองที่วัดได้จากโฟโตดีเทคเตอร์ก็จะปรากฏที่ออสซิลโลสโคป แต่ถ้านำฉากมารับภาพของการแทรกสอดแทนโฟโตดีเทคเตอร์ ภาพที่ปรากฏบนฉากจะเห็นริ้วของการแทรกสอดเป็นวงมืด-สว่างสลับกัน ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.1 ระบบไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้โดยทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ระบบพื้นฐานของไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.3 แสดงภาพการแทรกสอดที่ปรากฏบนจากรับภาพซึ่งจะเห็นว่าภาพการแทรกสอดจะเป็นวงมืด-สว่างสลับกัน (ลักษณะภาพของการแทรกสอดจะขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ BS แยกลำแสงจะทำให้แสงที่ถูกแยกมีความเข้มแสง (แอมพลิจูด) เท่ากัน เมื่อแสงทั้งสองแทรกสอดกันจะทำให้ความคมชัดของริ้วการแทรกสอด (Visibility หรือ Fringe contrast) มีค่าสูงสุดซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.4 (สมการที่ 2.20) แต่ถ้าความเข้มแสงของแสงทั้งสองลำไม่เท่ากันก็จะมีผลต่อความคมชัดของริ้วการแทรกสอดและกำลังแยกของไมเคลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ ทำให้ประสิทธิภาพด้านการวัดของของไมเคลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ลดลง

กระจก M1 และ M2 จะปรับให้ระนาบของกระจกตั้งฉากกับลำแสงที่มาตกกระทบและปรับให้ระนาบกระจกทั้งสองตั้งฉากซึ่งกันและกันเสมอ โดยการปรับสกรูที่ติดอยู่ด้านหลังของอุปกรณ์ปรับระดับกระจก กระจก M1 จะยึดติดอยู่กับไมโครมิเตอร์ซึ่งสามารถปรับให้เลื่อนเข้าหรือออก (Displacement) ได้ตามแนวของลำแสงโดยมีระยะเลื่อนเท่ากับ 39 มิลลิเมตรและความละเอียดของการเลื่อนเท่ากับ 10 ไมโครเมตร

เนื่องจาก  $L_1$  และ  $L_2$  เป็นระยะทางที่แสงลำที่ 1 และ 2 เดินทางได้ตามลำดับ จากรูปที่ 4.2 ถ้ากำหนดให้ระยะ  $L_2$  มีค่าคงที่ ส่วนระยะ  $L_1$  สามารถปรับระยะได้โดยการเลื่อนกระจก M1 เข้าหรือออก ในกรณีที่  $L_1 \neq L_2$  จะทำให้เกิดผลต่างทางเดินของแสงทั้งสองลำ ซึ่งผลต่างทางเดินของแสงจะมีผลต่อความต่างเฟสของแสงที่มาแทรกสอดกันดังสมการที่ (2.17) ถ้าผลต่างทางเดินของแสงมีค่าสอดคล้องตามสมการที่ (2.13) และ (2.14) จะทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมและหักล้างขึ้นตามลำดับ

จากรูปที่ 4.2 ผลต่างทางเดินของแสงทั้งสองคือ

$$OPD = 2L_1 - 2L_2 \quad (4.1)$$

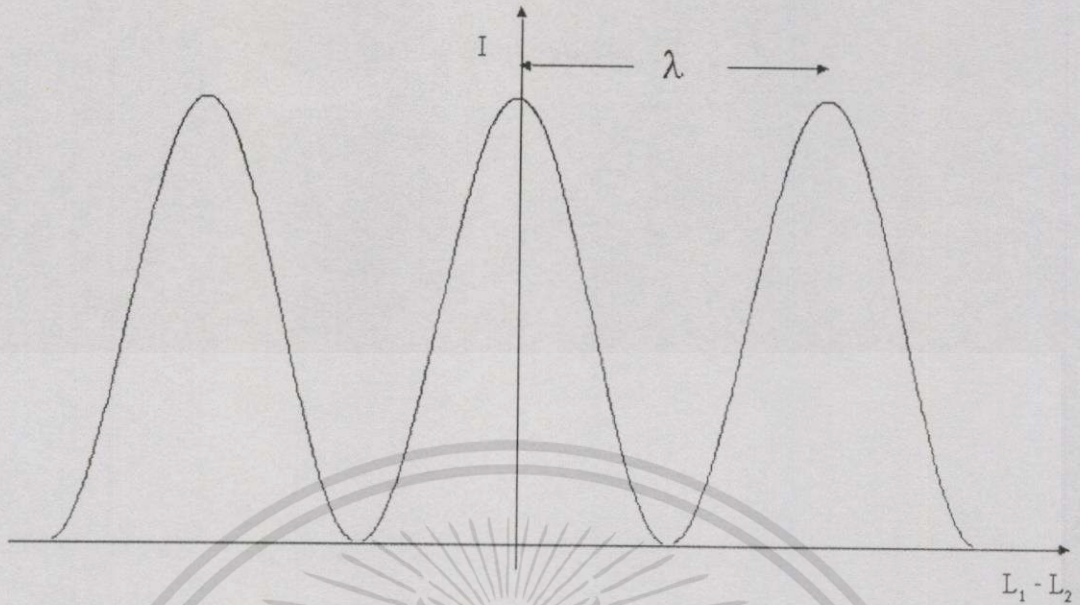
ดังนั้นจากสมการที่ (2.21) และ (2.22) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงที่เกิดจากการแทรกสอดกับผลต่างทางเดินของแสงคือ

$$I = 2I_0 \left[ 1 + \cos \left( \frac{4\pi}{\lambda} (L_1 - L_2) \right) \right] \quad (4.2)$$

หรือ

$$I = 4I_0 \cos^2 \left( \frac{2\pi}{\lambda} (L_1 - L_2) \right) \quad (4.3)$$

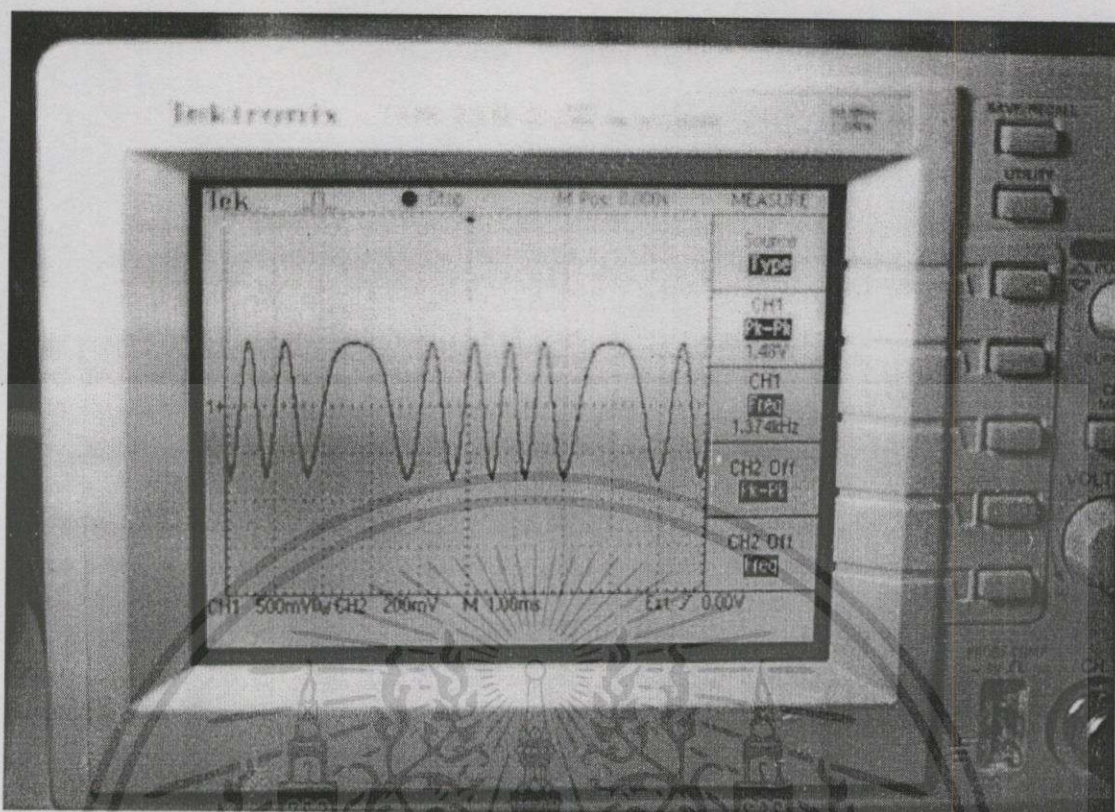
เมื่อนำสมการที่ (4.3) ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง ( $I$ ) กับผลต่างทางเดินของแสง ( $L_1 - L_2$ ) จะได้กราฟดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง ( $I$ ) กับผลต่างทางเดินของแสง ( $L_1 - L_2$ )

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าถ้าผลต่างทางเดินของแสงมีค่าเท่ากับศูนย์หรือจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่นของแสงที่มาแทรกสอดกัน ความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดจะมีค่าสูงสุด แต่ถ้าผลต่างทางเดินของแสงมีค่าเป็นจำนวนครึ่งของความยาวคลื่นของแสง ความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นถ้าพยายามปรับให้  $L_1 = L_2$  (ตำแหน่งที่  $OPD = 0$ ) โดยการเลื่อนกระจก  $M_1$  จะทำให้ความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดหรือแอมพลิจูดของสัญญาณที่วัดได้จากโฟโตดีเทคเตอร์มีค่าสูงสุด

จากรูปที่ 4.2 ถ้าให้กระจก  $M_2$  หยุดหนึ่งอยู่กับที่ จะทำให้สัญญาณที่วัดได้จากโฟโตดีเทคเตอร์ที่ปรากฏยังออสซิลโลสโคปมีลักษณะเป็นสัญญาณ DC (แรงดันคงที่ค่าหนึ่ง) เมื่อเลื่อนกระจก  $M_1$  เข้าหรือออกด้วยระยะทางน้อยๆ เช่นในระดับไมครอน จะทำให้ยากต่อการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่วัด ดังนั้นการแก้ปัญหาดังกล่าวคือ ทำให้กระจก  $M_2$  สั่นในแนวเดียวกับลำแสงที่มาตกกระทบ โดยการติดกระจก  $M_2$  เข้ากับลำโพงซึ่งถูกทำให้สั่นโดยป้อนสัญญาณรูปไซน์จากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ จะทำให้สัญญาณที่วัดได้จากโฟโตดีเทคเตอร์ที่ปรากฏยังออสซิลโลสโคปมีลักษณะคล้ายสัญญาณ AC (แรงดันเปลี่ยนแปลงไปตามการสั่นของลำโพง) และการวัดสัญญาณจะวัดในลักษณะแบบยอดถึงยอด (Peak to Peak) ทำให้สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่วัดได้เมื่อเลื่อนกระจก  $M_1$  เข้าหรือออกเป็นระยะทางน้อยๆ ลักษณะของสัญญาณ AC ที่วัดได้แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะของสัญญาณ AC ที่เกิดจากการทำให้กระจก M2 สั่นในแนวเดียวกับลำแสงที่มาตกกระทบ โดยการติดกระจก M2 เข้ากับลำโพงซึ่งถูกทำให้สั่นโดยการป้อนสัญญาณรูปไซน์จากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์

ในกรณีที่ตัวกลางที่อยู่ระหว่าง BS กับกระจก M1 และ M2 ไม่ใช่อากาศ แต่เป็นตัวกลางใดๆ ที่มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ  $n_1$  และ  $n_2$  ตามลำดับ ดังนั้นจากสมการที่ (4.1) จะได้ OPD คือ

$$OPD = 2(n_1L_1 - n_2L_2) \quad (4.4)$$

และความเข้มแสง คือ

$$I = 4I_0 \cos^2 \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (n_1L_1 - n_2L_2) \right] \quad (4.5)$$

สรุปหลักการใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ในการตรวจวัดคือ การทำให้ระยะห่างระหว่าง BS กับกระจก M1 และ M2 (แขนของไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์) มีค่าเท่ากัน (แขนอยู่ในสมดุล) ซึ่งจะให้ความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดมีค่าสูงสุด แต่ถ้าทำให้ระยะห่างดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่เท่ากัน (แขนเลียสมคูล) โดยการใส่ปริมาณที่ต้องการวัด (Physical parameters) ลงไปในแขนข้างใดข้างหนึ่งของไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ (ส่วนใหญ่มักจะใส่ที่แขน  $L_2$ ) จะทำให้ระยะห่างระหว่างแขนทั้งสองข้างไม่เท่ากันหรือเกิดผลต่างทางเดินของแสงนั่นเอง การเลื่อนกระจก  $M1$  เข้าหรือออกจะเป็นการปรับให้แขนทั้งสองกลับมาอยู่ในตำแหน่งสมคูลอีกครั้ง ( $OPD = 0$ ) หรือตำแหน่งที่ทำให้ความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดมีค่าสูงสุด การเลื่อนกระจก  $M1$  จะทำให้ทราบระยะทางที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการใส่ปริมาณที่ต้องการวัดที่แขนของไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างทางเดินของแสงกับปริมาณที่ต้องการวัดนั้น ซึ่งทั้งหมดเป็นหลักการง่ายๆ ในการใช้ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัด

#### 4.1.2 การทดลอง

ทำการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ตามรูปที่ 4.2 จากนั้นทำการจัดแนวและระนาบของแสงที่เดินทางในระบบไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ให้อยู่ในแนวและระนาบเดียวกัน เนื่องจากถ้าแสงไม่อยู่ในแนวและระนาบเดียวกัน จะทำให้เกิดแสงสะท้อนเป็นมุมต่างๆ ขึ้น ผลคือเกิดการกระจายของลำแสงทำให้ความเข้มของแสงในแต่ละลำแสงลดลง สำหรับกระจก  $M1$  และ  $M2$  จะปรับให้ระนาบของกระจกตั้งฉากกับลำแสงที่มาตกกระทบและตั้งฉากซึ่งกันและกัน โดยการปรับสกรูที่ติดอยู่ด้านหลังของอุปกรณ์ปรับระดับกระจก กระจก  $M1$  จะติดอยู่กับไมโครมิเตอร์ซึ่งสามารถปรับให้เลื่อนเข้าหรือออกได้ตามแนวของลำแสงโดยมีระยะเลื่อนเท่ากับ 39 มิลลิเมตรและความละเอียดของการเลื่อนเท่ากับ 10 ไมครอน ส่วนการจัดระยะห่างระหว่าง BS กับกระจก  $M1$  และ  $M2$  (ระยะ  $L_1$  และ  $L_2$ ) ควรให้มีระยะห่างใกล้เคียงกัน ( $L_1 \approx L_2$ ) เพื่อให้ง่ายต่อการหาค่าตำแหน่งที่ทำให้ความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดหรือสัญญาณที่วัดได้จากโฟโตดีเทคเตอร์มีค่าสูงสุด เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ เรียบร้อยแล้วก็ลองทำการวัดความเข้มแสงที่เกิดจากการแทรกสอดโดยใช้โฟโตดีเทคเตอร์ สัญญาณที่ปรากฏยังออสซิลโลสโคปจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.5 (ลักษณะของสัญญาณที่ปรากฏอาจจะมีการบิดเบี้ยวไปจากรูปที่ 4.5 บ้างเนื่องจากการเชตเครื่องมือยังไม่สมบูรณ์) จากนั้นลองเลื่อนไมโครมิเตอร์เข้าหรือออกเพื่อทำให้กระจก  $M1$  เคลื่อนที่แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ปรากฏยังออสซิลโลสโคป จากนั้นทำการหาค่าตำแหน่งของกระจก  $M1$  ที่ทำให้สัญญาณที่วัดได้มีขนาดโตที่สุด ซึ่งที่ตำแหน่งนี้คือ ตำแหน่งที่ระยะ  $L_1 = L_2$  หรือเป็นตำแหน่งที่ผลต่างทางเดินของแสงที่เดินทางตามเส้นทาง  $L_1$  และ  $L_2$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ( $OPD = 0$ ) ทำให้ความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดมีค่าสูงสุด จากนั้นทำการปรับสกรูที่ติดอยู่ด้านหลังของอุปกรณ์ปรับระดับกระจกเพื่อปรับแนวของลำแสงให้อยู่ในแนวเดียวกันมากขึ้น ซึ่งการปรับสกรูนี้จะมีผลต่อขนาดของสัญญาณที่วัดได้ ปรับจนกระทั่งได้ตำแหน่งที่ทำให้สัญญาณที่วัดได้มีค่าสูงสุดแล้วทำการปรับกระจกอีกข้างในลักษณะเดียวกัน จากนั้นลองเลื่อนไมโครมิเตอร์เพื่อเลื่อนกระจก  $M1$  อีกครั้งจนได้ตำแหน่งที่ทำให้สัญญาณมีค่าสูงสุด ทำสลับกันไปมาระหว่างการปรับกระจก  $M1$  และ  $M2$  กับการเล่นไมโครมิเตอร์ ทำเช่นนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้ตำแหน่งที่ทำให้สัญญาณที่วัดได้มีค่าสูงสุดจริงๆ ซึ่งตำแหน่งนี้คือ ตำแหน่งที่ผลต่างทางเดินของแสงที่เดินทางตามเส้นทาง  $L_1$  และ  $L_2$  มีค่าเท่ากับศูนย์จริงๆ บันทึกตำแหน่งดังกล่าวไว้โดยดูจากสเกลของไมโครมิเตอร์ ซึ่งขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นการเซตเครื่องมือที่สมบูรณ์แล้ว ลักษณะของสัญญาณที่ปรากฏยังออสซิลโลสโคปจะเหมือนกับสัญญาณดังรูปที่ 4.5 และสัญญาณจะไม่มีการบิดเบี้ยว

เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์และเซตเครื่องมือจนกระทั่งได้สัญญาณของการแทรกสอดมีค่าสูงสุดแล้ว เลื่อนไมโครมิเตอร์ไปยังตำแหน่งที่ทำให้กระจก M1 อยู่ใกล้กับ BS มากที่สุด ซึ่งก็คือตำแหน่งที่ 12 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งนี้สัญญาณของการแทรกสอดจะมีค่าน้อย (ขึ้นอยู่กับผลต่างทางเดินของแสงทั้งสองลำ) ทำการบันทึกค่าความเข้มแสงที่ปรากฏยังออสซิลโลสโคปที่ตำแหน่งดังกล่าว จากนั้นเลื่อนไมโครมิเตอร์ออกเป็นระยะทาง 1 มิลลิเมตร (กระจก M1 เลื่อนจากตำแหน่งเดิมเป็นระยะทาง 1 มิลลิเมตร) แล้วบันทึกค่าความเข้มแสงที่ปรากฏยังออสซิลโลสโคป ทำซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ โดยการเลื่อนไมโครมิเตอร์ออกทีละ 1 มิลลิเมตรแล้วบันทึกค่าความเข้มแสง กระจก M1 กระจก M1 อยู่ที่ตำแหน่งที่ทำให้กระจก M1 อยู่ไกลจาก BS มากที่สุด ซึ่งก็คือตำแหน่งที่ 51 มิลลิเมตร (ตำแหน่งที่ 12 ถึง 51 คือระยะสแกนของไมโครมิเตอร์) จากนั้นทำซ้ำการทดลองทั้งหมดอีก 2 ครั้ง นำข้อมูลที่บันทึกไว้ซึ่งก็คือความเข้มแสงทั้ง 3 ครั้งมาหาค่าเฉลี่ยแล้วนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับตำแหน่งของไมโครมิเตอร์

พิจารณากระจก M2 ที่ติดอยู่กับลำโพงซึ่งถูกทำให้สั่นโดยการป้อนสัญญาณรูปไซน์จากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ ความถี่และแอมพลิจูดของสัญญาณรูปไซน์ที่ป้อนให้กับลำโพงนั้นจะขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของลำโพงและความถี่กำลังของลำโพงนั้นๆ ซึ่งที่ความถี่กำลังลำโพงจะสั่นด้วยแอมพลิจูดสูงสุด สำหรับการเลือกความถี่และแอมพลิจูดของสัญญาณรูปไซน์ที่จะป้อนให้กับลำโพงให้ดูจากสัญญาณการแทรกสอดที่ปรากฏยังออสซิลโลสโคป ความถี่และแอมพลิจูดที่เลือกใช้จะต้องไม่ทำให้สัญญาณที่วัดได้บิดเบี้ยว แนวการสั่นของลำโพงจะต้องอยู่ในแนวขนานกับแสงที่มาตกกระทบเสมอและต้องไม่ทำให้กระจกที่ติดอยู่กับลำโพงสั่นในลักษณะส่ายไปส่ายมา เพราะจะทำให้ไม่สามารถวัดสัญญาณการแทรกสอดได้ เนื่องจากการที่กระจกสั่นแบบส่ายไปส่ายมาจะทำให้แสงที่มาตกกระทบจะไม่สะท้อนกลับไปในแนวเดิม ทำให้เกิดการกระจายของแสงขึ้น สำหรับสัญญาณรูปไซน์ที่ป้อนให้กับลำโพงที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีแอมพลิจูดเท่ากับ 134 มิลลิโวลต์ และมีความถี่ของสัญญาณเท่ากับ 278 Hz ซึ่งที่แอมพลิจูดและความถี่ดังกล่าวเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับลำโพงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (อาจจะไม่เหมาะสมกับลำโพงตัวอื่นๆ)

## 4.2 การวัดระยะทางด้วยไมเคลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

งานวิจัยส่วนนี้เป็นการนำไมเคลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ไปใช้งานด้านการตรวจวัดระยะทาง โดยใช้วัดความหนาของแผ่นแก้วสไลด์หนา 1 มิลลิเมตรและวัสดุเปอร์สเปกซ์หนา 1 เซนติเมตร ซึ่งความหนาดังกล่าวถูกวัดโดยใช้ไมโครมิเตอร์ ระบบไมเคลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดระยะทาง แสดงดังรูปที่ 4.6

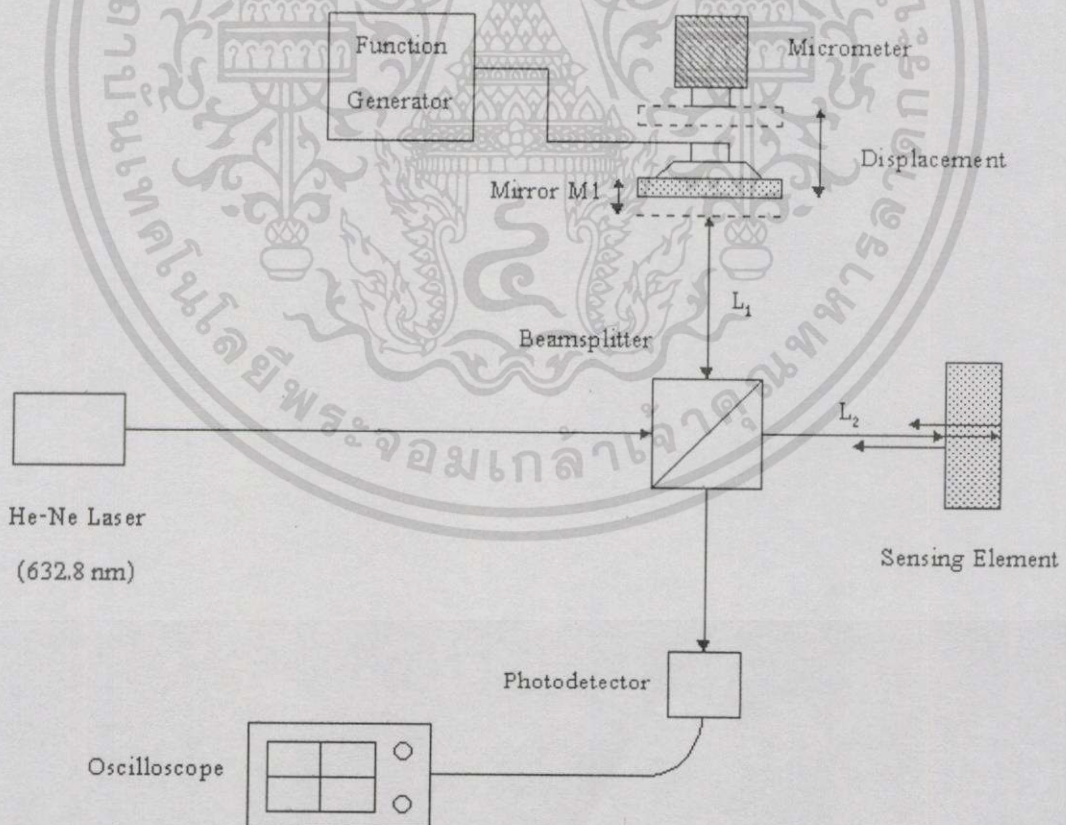
### 4.2.1 หลักการ

จากรูปที่ 4.6 พิจารณาแสงที่เดินทางในเส้นทาง  $L_2$  เมื่อแสงเดินทางถึงวัสดุทดสอบ (Sensing element) แสงส่วนหนึ่งจะตกกระทบที่ผิวหน้าของวัสดุแล้วสะท้อนกลับตามเส้นทางเดิม แสงอีกส่วนจะทะลุเข้าไปในวัสดุแล้วสะท้อนที่ผิวด้านหลังของวัสดุกลับมาตามเส้นทางเดิมเช่นกัน ดังนั้นแสงที่เดินทางมายังโฟโตดีเทกเตอร์มี 3 ลำแสงคือ แสงที่มาจากเส้นทาง  $L_1$  แสงที่สะท้อนมาจากผิวหน้าของวัสดุและแสงที่สะท้อนมาจากผิวด้านหลังของวัสดุ จะเห็นว่าผลต่างทางเดินของแสงที่สะท้อนจากผิวด้านหน้าและผิวด้านหลังของวัสดุทดสอบก็คือความหนาของวัสดุทดสอบนั่นเอง สำหรับการหาความหนาของวัสดุทดสอบทำได้โดยการเลื่อนกระจก  $M_1$  ที่ติดอยู่กับ ไมโครมิเตอร์ เข้าหรือออกเพื่อหาตำแหน่งที่ทำให้ระยะ  $L_1$  เท่ากับ  $L_2$  ซึ่งที่ตำแหน่งนี้จะทำให้ความเข้มแสงที่เกิดจากการแทรกสอดของแสงระหว่างแสงที่มาจากเส้นทาง  $L_1$  และแสงที่สะท้อนจากผิวด้านหน้าของวัสดุทดสอบมีค่าสูงสุด เมื่อรู้ตำแหน่งที่ทำให้ระยะ  $L_1$  เท่ากับ  $L_2$  แล้ว จากนั้นทำการเลื่อนกระจก  $M_1$  ออกมาเรื่อยๆ จนกระทั่งพบตำแหน่งที่ทำให้สัญญาณของการแทรกสอดที่วัดได้จากโฟโตดีเทกเตอร์มีค่าสูงสุดอีกครั้ง (แรงดันอาจจะไม่เท่ากับตำแหน่งแรก) ตำแหน่งนี้คือตำแหน่งที่เกิดการแทรกสอดระหว่างแสงที่มาจากเส้นทาง  $L_1$  และแสงที่สะท้อนจากผิวด้านหลังของวัสดุทดสอบ ระยะทางที่กระจก  $M_1$  เคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งแรกก็คือ ความหนาของวัสดุทดสอบนั่นเอง

### 4.2.2 การทดลอง

ทำการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ตามรูปที่ 4.6 จากรูปจะเห็นว่ากระจก  $M_2$  จะถูกแทนที่ด้วยวัสดุทดสอบ (วัสดุที่ต้องการหาความหนา) และลำโพงจะถูกติดตั้งที่กระจก  $M_1$  แทนเพื่อให้เหมาะสมกับการทดลอง หลังจากติดตั้งอุปกรณ์เสร็จทำการจัดแนวและระนาบของแสงที่เดินทางในระบบไมเคลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ให้อยู่ในแนวและระนาบเดียวกัน กระจก  $M_1$  จะปรับให้ระนาบของกระจกตั้งฉากกับลำแสงที่มาจากกระทบ ส่วนวัสดุทดสอบจะจัดให้ระนาบของผิวด้านหน้าและผิวด้านหลังตั้งฉากกับแสงที่มาจากกระทบและตั้งฉากกับระนาบของกระจก  $M_1$  โดยการหมุนสกรูที่แทนวางวัสดุทดสอบ (สามารถปรับได้แบบ 3 มิติ) กระจก  $M_1$  จะติดอยู่กับไมโครมิเตอร์ซึ่งสามารถปรับให้เลื่อนเข้าหรือออกได้ตามแนวของลำแสงโดยมีระยะเลื่อนเท่ากับ 39 มิลลิเมตรและความละเอียดของการเลื่อนเท่ากับ 10 ไมครอน ในการจัดระยะห่างระหว่าง BS กับกระจก  $M_1$  และผิวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าของวัสดุทดสอบ (ระยะ  $L_1$  และ  $L_2$ ) ควรให้มีระยะห่างใกล้เคียงกัน ( $L_1 \approx L_2$ ) เพื่อให้ง่ายต่อการหาตำแหน่งที่ทำให้ความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดหรือสัญญาณที่วัดได้จากโฟโตดีเทคเตอร์มีค่าสูงสุด เมื่อติดตั้งและเซตอุปกรณ์ต่างๆ เรียบร้อยแล้ว ทำการหาตำแหน่งของกระจก M1 ที่ทำให้สัญญาณที่วัดได้จากโฟโตดีเทคเตอร์มีขนาดโตที่สุด ซึ่งที่ตำแหน่งนี้คือ ตำแหน่งที่ระยะ  $L_1 = L_2$  หรือเป็นตำแหน่งที่ผลต่างทางเดินของแสงที่เดินทางตามเส้นทาง  $L_1$  และ  $L_2$  (ผิวด้านหน้าของวัสดุทดสอบ) มีค่าเท่ากับศูนย์ ( $OPD = 0$ ) สัญญาณที่ปรากฏยังออสซิลโลสโคปจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.5 (สัญญาณไม่มีการบิดเบี้ยว) ทำการบันทึกตำแหน่งดังกล่าวไว้ (ตำแหน่งนี้คือตำแหน่งของผิวด้านหน้าของวัสดุทดสอบ) จากนั้นทำการเลื่อนกระจก M1 ออกมาเรื่อยๆ จนกระทั่งพบตำแหน่งที่ทำให้สัญญาณการแทรกสอดที่วัดได้จากโฟโตดีเทคเตอร์มีค่าสูงสุดอีกครั้ง (ความเข้มแสงที่วัดได้จะน้อยกว่าตำแหน่งแรก เนื่องจากแสงที่เดินทางในวัสดุทดสอบจะมีความเข้มแสงลดลง ดังนั้นแสงที่มาแทรกสอดกันจะมีความเข้มแสงไม่เท่ากัน ทำให้ความคมชัดของริ้วการแทรกสอดลดลง ผลคือวัดความเข้มแสงที่เกิดจากการแทรกสอดได้น้อยกว่าตำแหน่งแรก) ตำแหน่งนี้คือตำแหน่งที่เกิดการแทรกสอดระหว่างแสงที่มาจากเส้นทาง  $L_1$  และแสงที่สะท้อนจากผิวด้านหลังของวัสดุทดสอบ ระยะทางที่กระจก M1 เคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งแรกก็คือ ความหนาของวัสดุทดสอบนั่นเอง

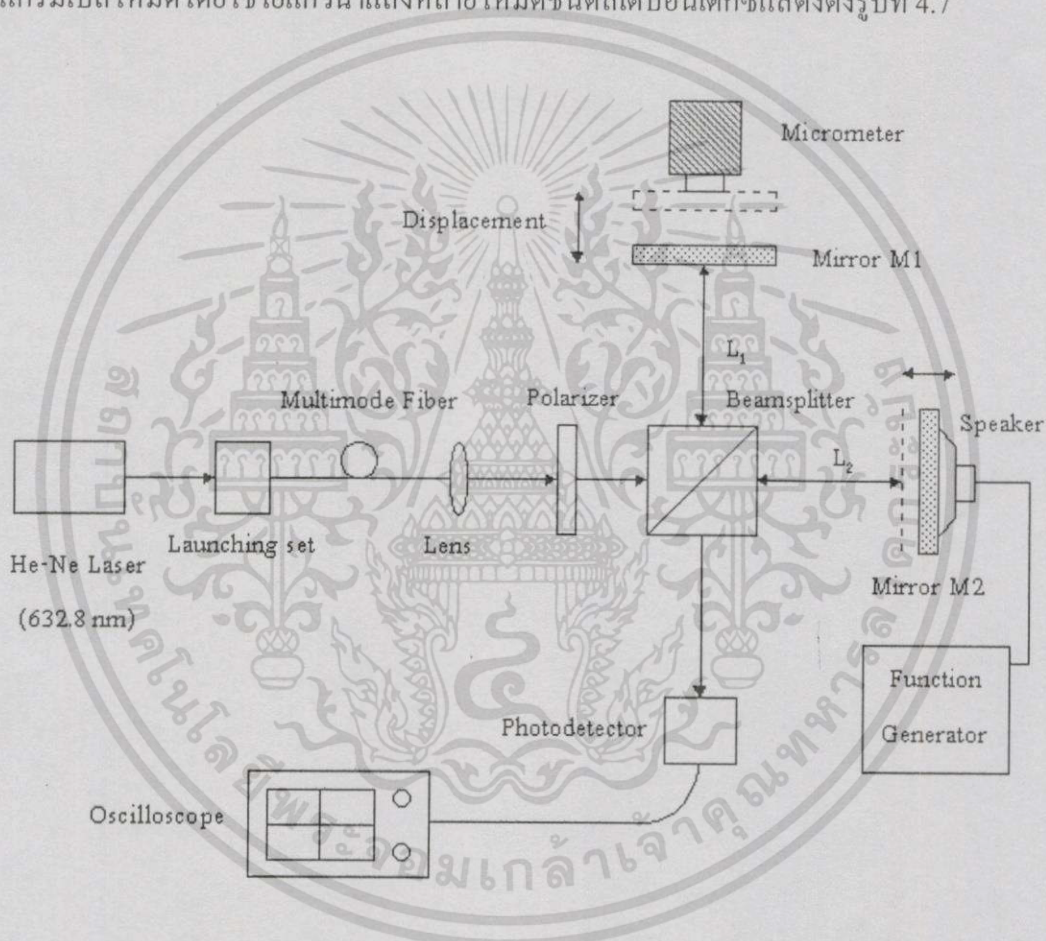


รูปที่ 4.6 แสดงระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดระยะทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การลดความยาวอาพันธ์ของแหล่งกำเนิดแสงด้วยเทคนิคการสแกรมเบิลโหมด

เนื่องจากระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงชนิดนี้ให้แสงที่มีความยาวอาพันธ์ยาวซึ่งไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงในระบบตรวจวัดอย่างละเอียด ดังนั้นจึงอาศัยเทคนิคการสแกรมเบิลโหมดโดยใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ เพื่อทำให้ความยาวอาพันธ์ของแสงก่อนที่จะเข้าสู่ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์สั้นลง ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาการลดความยาวอาพันธ์ของแหล่งกำเนิดแสงด้วยเทคนิคการสแกรมเบิลโหมดโดยใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาการลดความยาวอาพันธ์ของแหล่งกำเนิดแสงด้วยเทคนิคการสแกรมเบิลโหมดโดยใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์

#### 4.3.1 หลักการ

เทคนิคการสแกรมเบิลโหมดที่ทำการศึกษาวัดจะเริ่มต้นจากการจัดให้แสงจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตรผ่านเข้าไปในใยแก้วนำแสงหลายโหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดสเป็คอินเด็กซ์ที่ความยาวค่าหนึ่ง จากคุณสมบัติของใยแก้วนำแสงหลายโหมดพบว่า เมื่อแสงเดินทางในใยแก้วนำแสงหลายโหมดจะทำให้โหมดของแสงหรือเส้นทางเดินของแสงมีจำนวนเพิ่มขึ้น โหมดของแสงที่เพิ่มขึ้นนี้จะเกิดการรบกวนกัน (Mode scramble) เช่น เกิดการกระจาย (Dispersion) การซ้อนทับ (Superposition) และการแทรกสอดทั้งแบบเสริมและแบบหักล้างกันกับ โหมดข้างเคียงในระหว่างที่แสงเดินทางในใยแก้วนำแสง ทำให้คุณสมบัติความเป็นอาพันธ์ของแสงลดลง ถ้าใยแก้วนำแสงหลายโหมดมีความยาวเพิ่มขึ้นจำนวนโหมดของแสงก็จะเพิ่มขึ้นด้วย การรบกวนกันระหว่างโหมดก็ยิ่งเพิ่มมากขึ้น ทำให้คุณสมบัติความเป็นอาพันธ์ของแสงลดลงเรื่อยๆ ตามความยาวของใยแก้วนำแสงที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นแสงที่เดินทางออกจากปลายใยแก้วนำแสงจะมีความยาวอาพันธ์สั้นลง เมื่อหาความยาวที่เหมาะสมของใยแก้วนำแสงหลายโหมดจะได้แสงที่มีความยาวอาพันธ์เหมาะสมที่จะใช้เป็นแสงอินพุตให้กับ ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์สำหรับงานด้านการตรวจวัดต่อไป

สำหรับความยาวอาพันธ์ที่เหมาะสมหาได้จากการพิจารณาขีดจำกัด (Limitation) และความละเอียด (Resolution) ของไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้ รวมทั้งอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio : SNR) ของสัญญาณที่ทำการวัดและความเข้มของแสงที่ออกจากปลายใยแก้วนำแสง เนื่องจากเมื่อแสงเดินทางในใยแก้วนำแสงหลายโหมดจะเกิดการสูญเสีย (Loss) และการกระจายของแสงภายในใยแก้วนำแสง ทำให้ความเข้มแสงที่เอาต์พุตลดลง ดังนั้นยังใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมดยาวเท่าใดก็จะทำให้ความเข้มแสงที่เอาต์พุตลดลงมากด้วยเช่นกัน

จากการพิจารณาขีดจำกัดและความละเอียดของไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย จะพบว่า

$$OPD_{\min} \leq \frac{L_c}{2} \quad (4.6)$$

จากสมการที่ (4.6) แสดงให้เห็นว่าแสงเหมาะสมที่จะใช้เป็นแสงอินพุตให้กับไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์สำหรับงานด้านการตรวจวัดควรจะมีมีความยาวอาพันธ์อย่างน้อยเท่ากับสองเท่าของความละเอียดต่ำสุด (Minimal resolution) ของเครื่องมือวัด (ไมโครมิเตอร์)

#### 4.3.2 การทดลอง

ทำการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ตามรูปที่ 4.7 การเซตเครื่องมือต่างๆ จะคล้ายกับการทดลองในหัวข้อ 4.1.2 เพียงแต่ในการทดลองส่วนนี้ได้เพิ่มส่วนของใยแก้วนำแสงไว้ที่ส่วนหน้าของระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ เพื่อให้เกิดการสแกมเบิลโหมดของแสงโดยใยแก้วนำแสงหลายโหมด ทำให้ความยาวอาพันธ์ของแสงก่อนที่จะเข้าสู่ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์สั้นลง

เริ่มต้นแสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะถูกป้อนเข้าสู่ใยแก้วนำแสงโดยอุปกรณ์ป้อนแสงเข้าสู่ใยแก้วนำแสง (Launching set) ที่ประกอบด้วยตัวจับใยแก้วนำแสง (Fiber positioner) ชนิดไมโครบล็อก (Microblock) ซึ่งสามารถปรับเลื่อนแบบ 3 มิติได้ ที่ปลายใยแก้วนำแสงจะเป็นอุปกรณ์นำแสงออกจากใยแก้วนำแสง ซึ่งประกอบด้วยตัวจับใยแก้วนำแสง (Fiber chuck) ที่สามารถปรับเลื่อนเข้าหรือออกได้ในแนวราบและเลนส์ประกอบชุดหนึ่ง เลนส์ประกอบจะทำหน้าที่โฟกัสแสงที่ออกจากปลายใยแก้วนำแสงให้เป็นลำแสงขนานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก จากนั้นแสงก็จะเข้าสู่ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ สำหรับความยาวของใยแก้วนำแสงที่ใช้จะเริ่มต้นที่ความยาว 1 เมตร

เลื่อนไมโครมิเตอร์ไปยังตำแหน่งที่ทำให้กระจก M1 อยู่ใกล้กับ BS มากที่สุด ซึ่งก็คือตำแหน่งที่ 12 มิลลิเมตร ทำการบันทึกค่าความเข้มแสงที่ปรากฏยังออสซิลโลสโคปที่ตำแหน่งดังกล่าว จากนั้นเลื่อนไมโครมิเตอร์ออกเป็นระยะทาง 1 มิลลิเมตร (กระจก M1 เคลื่อนจากตำแหน่งเดิมเป็นระยะทาง 1 มิลลิเมตร) แล้วบันทึกค่าความเข้มแสงที่ปรากฏยังออสซิลโลสโคปที่ตำแหน่งนี้ ทำซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ โดยการเลื่อนไมโครมิเตอร์ออกทีละ 1 มิลลิเมตรแล้วบันทึกค่าความเข้มแสงกระทำจนกระทั่งไมโครมิเตอร์อยู่ที่ตำแหน่งที่ทำให้กระจก M1 อยู่ไกลจาก BS มากที่สุด ซึ่งก็คือตำแหน่งที่ 51 มิลลิเมตร (ตำแหน่งที่ 12 ถึง 51 คือระยะสแกนของไมโครมิเตอร์) จากนั้นทำซ้ำการทดลองทั้งหมดอีก 2 ครั้ง นำข้อมูลที่บันทึกไว้ซึ่งก็คือความเข้มแสงทั้ง 3 ครั้งมาหาค่าเฉลี่ยแล้วนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับตำแหน่งของไมโครมิเตอร์ ทำการทดลองซ้ำเช่นเดิมแต่เปลี่ยนความยาวของใยแก้วนำแสงเป็น 2 3 4 และ 5 เมตรตามลำดับ

เนื่องจากแสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสงหลายโหมดที่มีความยาวมากๆ จะเกิดการสูญเสียลดทอนและการกระจายของแสงภายในใยแก้วนำแสง ทำให้ความเข้มแสงที่ออกจากปลายใยแก้วนำแสงมีค่าน้อยมากซึ่งยากต่อการวัดและสัญญาณถูกรบกวนได้ง่าย (SNR มีค่าน้อย) ดังนั้นจะเห็นว่าการทดลองได้เลือกทำการศึกษาการลดควายาวอาพันธ์ของแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ในช่วงความยาว 0 - 5 เมตร เพราะว่าในช่วงความยาวดังกล่าวยังสามารถที่จะวัดความเข้มแสงที่ออกจากปลายใยแก้วนำแสงได้และความยาวอาพันธ์ของแสงที่ได้ยังอยู่ในช่วงที่สามารถนำไปใช้ตรวจวัดได้ (อยู่ในช่วงที่ไมโครมิเตอร์สามารถสแกนได้)

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าก่อนที่แสงจะเข้าสู่ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ แสงจะผ่านโพลาไรเซอร์ที่มีแกนส่งผ่านเอียงทำมุม  $45^{\circ}$  กับแนวราบก่อน ทั้งนี้เพื่อทำให้แสงที่เข้าสู่ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น (เนื่องจากแสงที่ออกจากใยแก้วนำแสงอาจมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติความเป็นโพลาไรซ์ของแสง)

#### 4.4 การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรงและประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ศึกษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นทางแสงของวัสดุโปร่งใส

ในงานวิจัยส่วนนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรง โดยเริ่มจากการศึกษาความเป็นไปได้ทางทฤษฎีก่อนแล้วจึงทำการทดลองเพื่อยืนยันความเป็นไปได้ดังกล่าว จากนั้นก็ประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ศึกษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นทางแสงของอะรัลไดรต์ (Araldite) และเปอร์สเปกซ์ (Perspex) โดยการให้แรงกดกับวัสดุและประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์หาเวลาคลายตัว (Relaxation time) ของวัสดุทั้งสอง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 4.4.1 หลักการ

จากสมการที่ (2.38) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับความเค้นที่ให้กับวัสดุ แต่เนื่องจากความเค้นมีค่าเท่ากับแรงส่วนด้วยพื้นที่หน้าตัด ( $\sigma = F/A$ ) ดังนั้นสมการที่ (2.38) เขียนใหม่ได้

$$I = 4I_0 \cos^2 \left[ \frac{\pi}{\lambda} \left( \frac{FC_\sigma L}{A} \right) \right] \quad (4.7)$$

เมื่อ  $F$  คือ แรงที่กระทำกับวัสดุ

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัด (ตั้งฉากกับแรงที่กระทำ) ของวัสดุ (Cross section area)

$W$  คือ ความกว้างของวัสดุทดสอบ

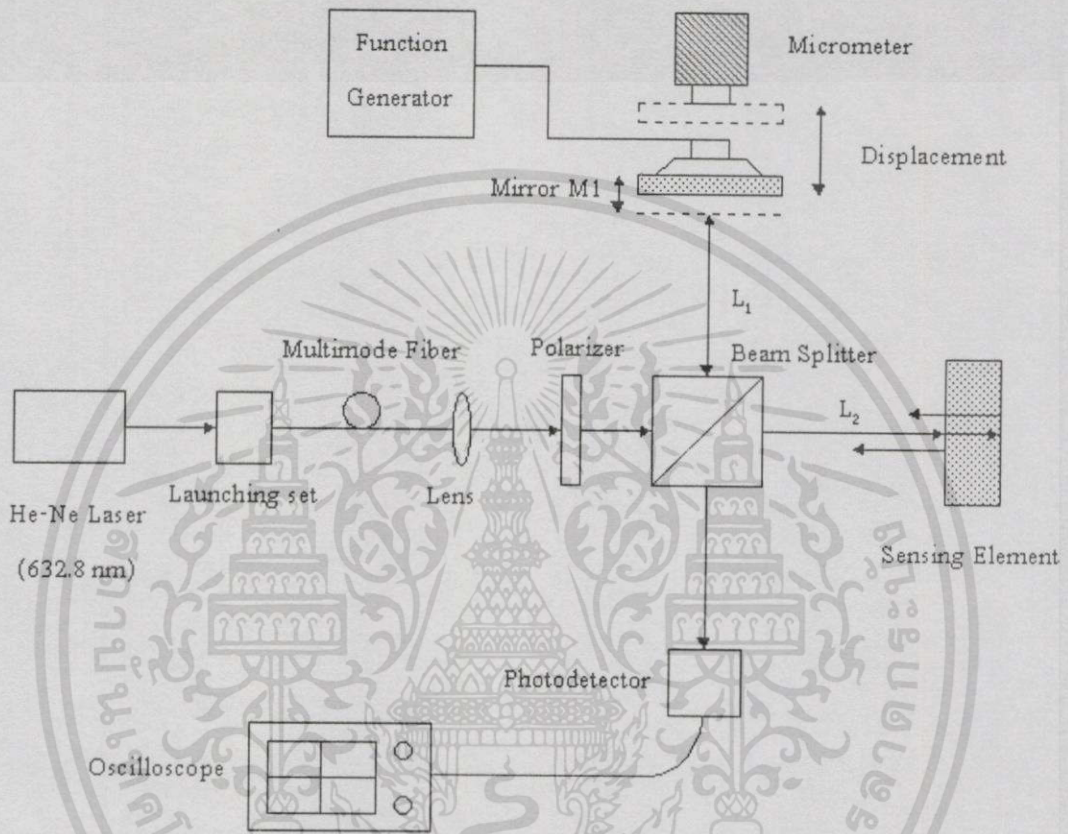
จากสมการที่ (4.7) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างทางเดินของแสงกับความเข้มแสงที่กระทำกับวัสดุคือ

$$OPD = \left( \frac{C_\sigma}{W} \right) F \quad (4.8)$$

จากสมการที่ (4.7) และ (4.8) แสดงให้เห็นว่าไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์สามารถทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรงได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับความเข้มแสงที่กระทำกับวัสดุทดสอบเพื่อหาผลต่างทางเดินของแสง จากนั้นเมื่อทราบ OPD ก็สามารถนำไปคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆ ของวัสดุทดสอบได้เช่น สัมประสิทธิ์ความเค้นทางแสง ( $C_\sigma$ ) และค่าดัชนีหักเหของวัสดุทดสอบ เป็นต้น จากทฤษฎีจะเห็นว่านอกจากไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์จะใช้ทำหน้าที่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ตรวจวัดแรงได้แล้วยังสามารถนำไปใช้ศึกษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นทางแสงของวัสดุโปร่งใสได้ด้วย ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์หาเวลาคลายตัว (Relaxation time) ของอะริลไดรท์และเปอร์สเปกซ์ ระบบไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยส่วนนี้แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงระบบไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรงและใช้ศึกษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นทางแสงของวัสดุโปร่งใส

จากรูปที่ 4.8 พิจารณาแสงที่เดินทางในเส้นทาง  $L_2$  เมื่อแสงเดินทางถึงวัสดุทดสอบ (Sensing element) แสงส่วนหนึ่งจะตกกระทบที่ผิวหน้าของวัสดุแล้วสะท้อนกลับตามเส้นทางเดิม แสงอีกส่วนจะทะลุเข้าไปในวัสดุทดสอบแล้วสะท้อนที่ผิวด้านหลังของวัสดุกลับมาตามเส้นทางเดิมเช่นกัน แต่จะพิจารณาเฉพาะแสงที่สะท้อนจากผิวด้านหลังของวัสดุทดสอบเท่านั้น เพราะเมื่อวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการกระทำภายนอกเช่นการให้แรงกระทำกับวัสดุ ซึ่งแรงดังกล่าวจะมีผลต่อแสงที่เดินทางในวัสดุนี้เท่านั้น ส่วนแสงสะท้อนที่ผิวด้านหน้าจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

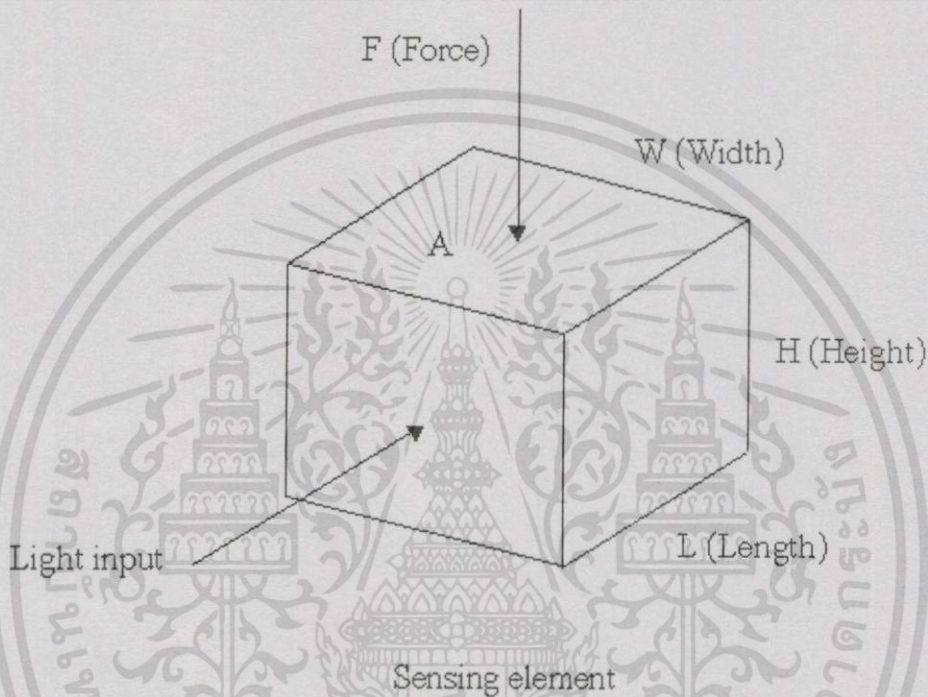
#### 4.4.2 การทดลอง

ทำการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ตามรูปที่ 4.8 การเซตเครื่องมือต่างๆ จะคล้ายกับการทดลองในหัวข้อ 4.2.2 คือ กระจก M2 จะถูกแทนที่ด้วยวัสดุทดสอบและลำโพงจะถูกติดตั้งที่กระจก M1 แทนเพื่อให้เหมาะสมกับการทดลอง ความยาวของใยแก้วนำแสงที่ใช้เท่ากับ 1 เมตร (ให้แสงที่มีความยาวอาพันธ์เท่ากับ 10.5 มิลลิเมตร) หลังจากติดตั้งอุปกรณ์เสร็จทำการจัดแนวและระนาบของแสงที่เดินทางในระบบไมโครสตันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ให้อยู่ในแนวและระนาบเดียวกัน กระจก M1 จะปรับให้ระนาบของกระจกตั้งฉากกับลำแสงที่มาจากกระทบ ส่วนวัสดุทดสอบจะจัดให้ระนาบของผิวด้านหน้าและผิวด้านหลังตั้งฉากกับแสงที่มาจากกระทบและตั้งฉากกับระนาบของกระจก M1 โดยการหมุนสกรูที่แทนวงวัสดุทดสอบ (สามารถปรับได้แบบ 3 มิติ) กระจก M1 จะติดอยู่กับไมโครมิเตอร์ซึ่งสามารถปรับให้เลื่อนเข้าหรือออกได้ตามแนวของลำแสงโดยมีระยะเลื่อนเท่ากับ 39 มิลลิเมตรและความละเอียดของการเลื่อนเท่ากับ 10 ไมครอน

ในการหาระยะห่างระหว่าง BS กับผิวด้านหลังของวัสดุทดสอบกระทำได้เช่นเดียวกับการหาความหนาของวัสดุซึ่งได้กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 4.2.2 ให้บันทึกตำแหน่งของกระจก M1 ไว้ จากนั้นนำค้อนน้ำหนักมวล  $m$  มาวางบนวัสดุทดสอบ ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นทำให้แรงกระทำกับวัสดุ (แรง =  $mg$ ) แรงที่กระทำกับวัสดุจะทำให้ค่าดัชนีหักเหของวัสดุเปลี่ยนไป เมื่อแสงเดินทางในวัสดุที่ถูกแรงกระทำจะทำให้ความเร็วของแสงช้าลงจากเดิม ( $v = \frac{c}{n}$ ) ผลคือเกิดความหน่วงสัมบูรณ์ขึ้นทำให้เกิดผลต่างทางเดินของแสงที่เดินทางตามเส้นทาง  $L_1$  กับแสงที่สะท้อนจากผิวด้านหลังของวัสดุ (ซึ่งเดิมได้จัดให้ระยะทางทั้งสองเท่ากัน) การหาผลต่างทางเดินของแสงดังกล่าวทำได้โดยการเลื่อนกระจก M1 ออกมาเรื่อยๆ จนกระทั่งพบตำแหน่งที่ทำให้สัญญาณการแทรกสอดที่วัดได้จากโฟโตดีเทคเตอร์มีค่าสูงสุดอีกครั้ง (ความเข้มแสงที่วัดได้จะน้อยกว่าตำแหน่งแรก เนื่องจากแสงที่เดินทางในวัสดุทดสอบจะมีความเข้มแสงลดลง ดังนั้นแสงที่มาแทรกสอดกันจะมีความเข้มแสงไม่เท่ากัน ทำให้ความคมชัดของริ้วการแทรกสอดลดลง ผลคือวัดความเข้มแสงที่เกิดจากการแทรกสอดได้น้อยกว่าตำแหน่งแรก) ตำแหน่งนี้คือตำแหน่งที่เกิดการแทรกสอดระหว่างแสงที่มาจากเส้นทาง  $L_1$  และแสงที่สะท้อนจากผิวด้านหลังของวัสดุทดสอบที่ถูกแรงกระทำ (ตำแหน่งที่  $OPD = 0$ ) ระยะทางที่กระจก M1 เคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิมคือผลต่างทางเดินของแสงทั้งสองเส้นทางที่เกิดจากการให้แรงกระทำกับวัสดุ จากนั้นเพิ่มน้ำหนักกด (เพิ่มแรงกระทำ) กับวัสดุทดสอบแล้วทำการหาผลต่างทางเดินของแสงตามวิธีข้างต้น สุดท้ายจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างทางเดินของแสงกับแรงขนาดต่างๆ ที่กระทำกับวัสดุ ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถนำไปคำนวณหาค่าดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์ความเค้นทางแสงของวัสดุทดสอบได้จากสมการที่ (4.7) และ (4.8)

น้ำหนักที่ใช้กดวัสดุอะรัลโคโรที่มีค่าเท่ากับ 10 – 100 กรัม โดยจะเพิ่มน้ำหนักทีละ 10 กรัม ส่วนวัสดุเปอร์สเปกซ์มีค่าเท่ากับ 100 – 1000 กรัม โดยจะเพิ่มน้ำหนักทีละ 100 กรัม การที่วัสดุทั้ง

สองใช้น้ำหนักกดต่างกันเนื่องจากอะรต์ไครท์เป็นพลาสติกเนื้ออ่อน ถ้าใช้น้ำหนักกดขนาดเดียวกับวัสดุเปอร์สเปกซ์ อาจทำให้วัสดุอะรต์ไครท์เกิดความเสียหายได้ (สูญเสียคุณสมบัติความยืดหยุ่นหรือไม่คืนตัวเมื่อเอาน้ำหนักกดออก) ส่วนวัสดุเปอร์สเปกซ์เป็นพลาสติกเนื้อแข็งถ้าใช้น้ำหนักกดขนาดเดียวกับวัสดุอะรต์ไครท์ จะทำให้สังเกตผลของการเปลี่ยนแปลงได้ยาก



รูปที่ 4.9 การให้แรงกดกับวัสดุทดสอบในส่วนของการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรงและใช้ศึกษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นทางแสงของวัสดุโปร่งใส

#### 4.4.3 การทดลองการหาเวลาคลายตัวของวัสดุทดสอบ

สำหรับการประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์หาเวลาคลายตัว (Relaxation time) ของอะรต์ไครท์และเปอร์สเปกซ์ทำได้ดังนี้ คิดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ตามรูปที่ 4.8 การเซตเครื่องมือต่างๆ จะคล้ายกับการทดลองในหัวข้อ 4.2.2 คือ กระจก M2 จะถูกแทนที่ด้วยวัสดุทดสอบและลำโพงจะถูกติดตั้งที่กระจก M1 แทนเพื่อให้เหมาะสมกับการทดลอง ความยาวของใยแก้วนำแสงที่ใช้เท่ากับ 1 เมตร (ให้แสงที่มีความยาวอาพันธ์เท่ากับ 10.5 มิลลิเมตร) หลังจากติดตั้งอุปกรณ์เสร็จทำการจัดแนวและระนาบของแสงที่เดินทางในระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ให้อยู่ในแนวและระนาบเดียวกัน กระจก M1 จะปรับให้ระนาบของกระจกตั้งฉากกับลำแสงที่มาจากกระจก ส่วนวัสดุเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งวนเวสสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำเอาแผ่นใยแก้วนำแสงไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบจะจัดให้ระนาบของผิวด้านหน้าและผิวด้านหลังตั้งฉากกับแสงที่มาตกกระทบและตั้งฉากกับระนาบของกระจก M1 โดยการหมุนสกรูที่แทนวางวัสดุทดสอบ (สามารถปรับได้แบบ 3 มิติ) กระจก M1 จะติดอยู่กับไมโครมิเตอร์ซึ่งสามารถปรับให้เลื่อนเข้าออกได้ตามแนวของลำแสงโดยมีระยะเลื่อนเท่ากับ 39 มิลลิเมตรและความละเอียดของการเลื่อนเท่ากับ 10 ไมครอน

ในการหาระยะห่างระหว่าง BS กับผิวด้านหลังของวัสดุทดสอบกระทำได้เช่นเดียวกับการหาความหนาของวัสดุซึ่งได้กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 4.2.2 ให้บันทึกตำแหน่งของกระจก M1 และบันทึกค่าความเข้มแสงที่วัดได้จากโฟโตดีเทคเตอร์ไว้ จากนั้นนำค้อน้ำหนักมวล  $m$  มาวางบนวัสดุทดสอบ ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นการให้แรงกระทำกับวัสดุ (แรง =  $mg$ ) แรงที่กระทำกับวัสดุจะทำให้ค่าดัชนีหักเหของวัสดุเปลี่ยนไป เมื่อแสงเดินทางในวัสดุที่ถูกแรงกระทำจะทำให้ความเร็วของแสงช้าลงจากเดิม ( $v = \frac{c}{n}$ ) ผลคือเกิดความหน่วงสัมบูรณ์ขึ้นทำให้เกิดผลต่างทางเดินของแสงที่เดินทางตามเส้นทาง  $L_1$  กับแสงที่สะท้อนจากผิวด้านหลังของวัสดุ (ซึ่งเดิมได้จัดให้ระยะทางทั้งสองเท่ากัน) ผลต่างทางเดินของแสงดังกล่าวจะทำให้ค่าความเข้มแสงของการแทรกสอดที่วัดได้จากโฟโตดีเทคเตอร์ลดลง จากนั้นนำค้อน้ำหนักมวล  $m$  ที่วางบนวัสดุทดสอบออกพร้อมทั้งเริ่มจับเวลา การนำแรงกดออกจะทำให้วัสดุพยายามปรับตัวให้กลับคืนสู่สภาพเดิม (ก่อนที่จะถูกแรงกระทำ) เวลาที่วัสดุใช้ในการกลับคืนสู่สภาพเดิมเรียกว่า เวลาคลายตัว การนำค้อน้ำหนักที่วางบนวัสดุทดสอบออกจะทำให้ค่าความเข้มแสงของการแทรกสอดที่วัดได้จากโฟโตดีเทคเตอร์ค่อยๆ มีค่าเพิ่มขึ้น จนกระทั่งค่าความเข้มแสงของการแทรกสอดที่วัดได้จากโฟโตดีเทคเตอร์มีค่าเท่ากับค่าความเข้มแสงเดิมก่อนที่จะนำค้อน้ำหนักมาวางบนวัสดุทดสอบ ช่วงเวลาดังแต่นำค้อน้ำหนักที่วางบนวัสดุทดสอบออกถึงเวลาที่ค่าความเข้มแสงมีค่าเท่ากับค่าความเข้มแสงเดิมก่อนที่จะนำค้อน้ำหนักมาวางบนวัสดุทดสอบคือ ช่วงเวลาคลายตัวของวัสดุ บันทึกเวลาดังกล่าวไว้ จากนั้นทำการทดลองซ้ำโดยเพิ่มน้ำหนักกดบนวัสดุทดสอบ สำหรับน้ำหนักที่ใช้ควัสดุอะลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ 10 – 100 กรัม โดยจะเพิ่มน้ำหนักทีละ 10 กรัม ส่วนวัสดุเปอร์สเปกซ์มีค่าเท่ากับ 100 – 1000 กรัม โดยจะเพิ่มน้ำหนักทีละ 100 กรัมและแต่ละน้ำหนักจะใช้เวลาในการกดเท่ากันคือ 10 นาที ทำการทดลองทั้งวัสดุอะลูมิเนียมและเปอร์สเปกซ์ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาคลายตัวของวัสดุแต่ละชนิดกับแรงที่ใช้ควัสดุทดสอบ

#### 4.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัยโดยเริ่มต้นจากการศึกษาทำงานและหลักการวัดของไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จากนั้นศึกษาการวัดระยะทางด้วยไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์โดยนำไปใช้วัดความหนาของแผ่นแก้วสไลด์และวัสดุเปอร์สเปกซ์ ศึกษาการลดความยาวอาพันธ์ของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ด้วยเทคนิคการสแกนเบิล โหมดโดยใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ที่ความยาวค่าต่างๆ สุดท้ายเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรงและประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ศึกษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นทางแสงของวัสดุอะรัลโครท์และเปอร์สเปกซ์ได้แก่การหาเวลาคลาซตัวของวัสดุทั้งสอง โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างทางเดินของแสงกับแรงที่กระทำกับวัสดุทดสอบ



## บทที่ 5

### ผลของงานวิจัยและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองต่าง ๆ ตามขั้นตอนที่เสนอไว้ในบทที่ 4 และการวิเคราะห์ผล โดยเริ่มจากผลการศึกษาระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย ผลการวัดระยะทางด้วยไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ ผลการลดความยาวอาพันธ์ของแหล่งกำเนิดแสงด้วยเทคนิคการสแกรมเบิลโหมด ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรงและประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ศึกษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นทางแสงของวัสดุโปร่งใส ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

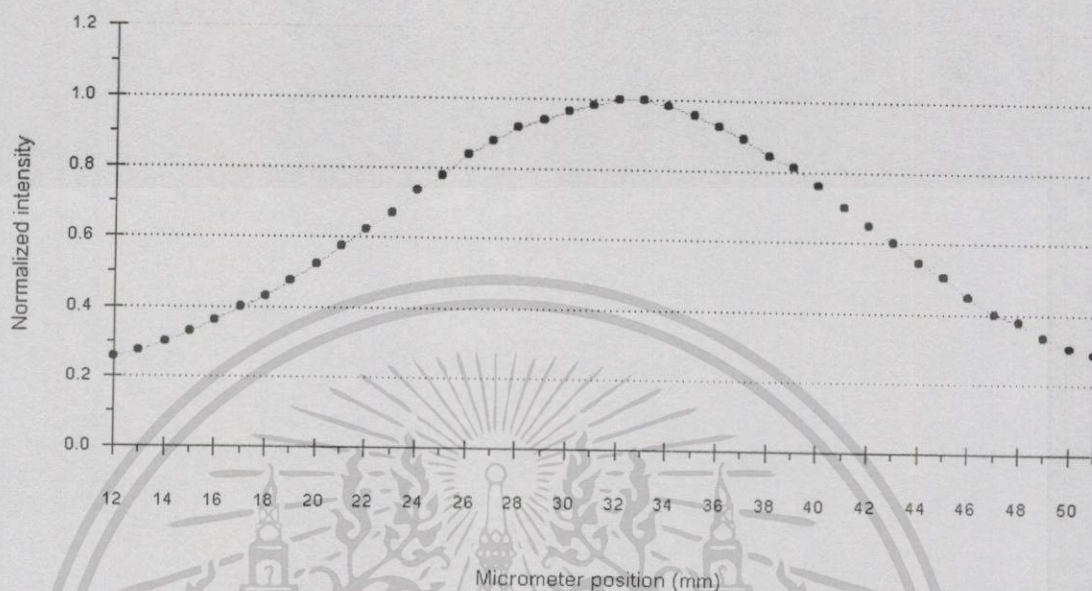
#### 5.1 ผลการศึกษาระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ตามรูปที่ 4.2 และเซตเครื่องมือจนกระทั่งได้สัญญาณของการแทรกสอดมีค่าสูงสุดแล้ว เลื่อนไมโครมิเตอร์ไปยังตำแหน่งที่ทำให้กระจก M1 อยู่ใกล้กับ BS มากที่สุด ซึ่งก็คือตำแหน่งที่ 12 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งนี้สัญญาณของการแทรกสอดจะมีค่าน้อย (ขึ้นอยู่กับผลต่างทางเดินของแสงทั้งสองลำ) ทำการบันทึกค่าความเข้มแสงที่ปรากฏยังออสซิลโลสโคปที่ตำแหน่งดังกล่าว จากนั้นเลื่อนไมโครมิเตอร์ออกเป็นระยะทาง 1 มิลลิเมตร (กระจก M1 เลื่อนจากตำแหน่งเดิมเป็นระยะทาง 1 มิลลิเมตร) แล้วบันทึกค่าความเข้มแสงที่ปรากฏยังออสซิลโลสโคป ทำซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ โดยการเลื่อนไมโครมิเตอร์ออกทีละ 1 มิลลิเมตรแล้วบันทึกค่าความเข้มแสงกระทำจนกระทั่งไมโครมิเตอร์อยู่ที่ตำแหน่งที่ทำให้กระจก M1 อยู่ไกลจาก BS มากที่สุด ซึ่งก็คือตำแหน่งที่ 51 มิลลิเมตร (ตำแหน่งที่ 12 ถึง 51 คือระยะสแกนของไมโครมิเตอร์) จากนั้นนำข้อมูลไปบันทึกไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง (Intensity) กับตำแหน่งของไมโครมิเตอร์ (Micrometer position) จะได้ดังรูปที่ 5.1

จากรูปที่ 5.1 จะเห็นว่าที่ตำแหน่ง 32.5 ของไมโครมิเตอร์ ความเข้มแสงที่เกิดจากการแทรกสอดที่ปรากฏยังออสซิลโลสโคปมีค่าสูงสุด แสดงว่าตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งที่ทำให้ระยะทาง  $L_1$  เท่ากับ  $L_2$  นั่นคือตำแหน่งที่ผลต่างทางเดินของแสงที่เดินทางตามเส้นทาง  $L_1$  และ  $L_2$  มีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ถ้าเลื่อนไมโครมิเตอร์ออกจากตำแหน่งนี้ จะทำให้เกิดผลต่างทางเดินของแสงขึ้นจึงทำให้ค่าความเข้มแสงที่วัดได้มีค่าลดลงดังรูปที่ 5.1 (ค่าความเข้มแสงขึ้นอยู่กับผลต่างทางเดินของแสงทั้งสอง) ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 4.1.1

รูปที่ 5.2 เป็นกราฟแสดงความสามารถในการวัดซ้ำ (Repeatability) ของไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ความสามารถในการวัดซ้ำจะเป็นการตรวจสอบว่าข้อมูลที่วัดได้มี

ความถูกต้องน่าเชื่อถือหรือไม่ ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าข้อมูลที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกันนั้นแสดงว่าข้อมูลที่วัดได้จากไมเคลสตันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถเชื่อถือได้



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง (Intensity) ที่เกิดจากการแทรกสอดกับตำแหน่งต่างๆ ของไมโครมิเตอร์ (Micrometer position)



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสามารถในการวัดซ้ำ 3 ครั้ง ของไมเคลสตันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าความเข้มแสงที่เกิดจากการแทรกสอด ณ ตำแหน่งต่างๆ ของไมโครมิเตอร์

| Micrometer<br>position (mm) | ความเข้มแสง (โวลต์) |            |            |           | Standard deviation<br>$\sigma_{n-1}$ |
|-----------------------------|---------------------|------------|------------|-----------|--------------------------------------|
|                             | ครั้งที่ 1          | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ค่าเฉลี่ย |                                      |
| 12                          | 1.3                 | 1.5        | 1.5        | 1.43      | 0.12                                 |
| 13                          | 1.4                 | 1.6        | 1.6        | 1.53      | 0.12                                 |
| 14                          | 1.5                 | 1.8        | 1.7        | 1.67      | 0.15                                 |
| 15                          | 1.7                 | 1.9        | 1.9        | 1.83      | 0.12                                 |
| 16                          | 1.8                 | 2.1        | 2.1        | 2.00      | 0.17                                 |
| 17                          | 2.1                 | 2.3        | 2.3        | 2.23      | 0.12                                 |
| 18                          | 2.2                 | 2.5        | 2.5        | 2.40      | 0.17                                 |
| 19                          | 2.5                 | 2.7        | 2.7        | 2.63      | 0.12                                 |
| 20                          | 2.8                 | 3.0        | 2.9        | 2.90      | 0.10                                 |
| 21                          | 3.0                 | 3.3        | 3.3        | 3.20      | 0.17                                 |
| 22                          | 3.4                 | 3.5        | 3.5        | 3.47      | 0.06                                 |
| 23                          | 3.6                 | 3.8        | 3.8        | 3.73      | 0.12                                 |
| 24                          | 4.0                 | 4.2        | 4.1        | 4.10      | 0.10                                 |
| 25                          | 4.2                 | 4.4        | 4.4        | 4.33      | 0.12                                 |
| 26                          | 4.5                 | 4.7        | 4.8        | 4.67      | 0.15                                 |
| 27                          | 4.8                 | 4.9        | 5.0        | 4.90      | 0.10                                 |
| 28                          | 5.0                 | 5.1        | 5.2        | 5.10      | 0.10                                 |
| 29                          | 5.2                 | 5.2        | 5.3        | 5.23      | 0.06                                 |
| 30                          | 5.3                 | 5.4        | 5.4        | 5.37      | 0.06                                 |
| 31                          | 5.4                 | 5.5        | 5.5        | 5.47      | 0.06                                 |
| 32                          | 5.5                 | 5.6        | 5.6        | 5.57      | 0.06                                 |
| 33                          | 5.5                 | 5.6        | 5.6        | 5.57      | 0.06                                 |
| 34                          | 5.4                 | 5.5        | 5.5        | 5.47      | 0.06                                 |
| 35                          | 5.3                 | 5.4        | 5.3        | 5.33      | 0.06                                 |
| 36                          | 5.1                 | 5.2        | 5.2        | 5.17      | 0.06                                 |
| 37                          | 5.0                 | 5.0        | 4.9        | 4.97      | 0.06                                 |
| 38                          | 4.7                 | 4.7        | 4.7        | 4.70      | 0.00                                 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

| Micrometer<br>position (mm) | ความเข้มแสง (โวลต์) |            |            |           | Standard deviation<br>$\sigma_{n-1}$ |
|-----------------------------|---------------------|------------|------------|-----------|--------------------------------------|
|                             | ครั้งที่ 1          | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ค่าเฉลี่ย |                                      |
| 39                          | 4.6                 | 4.5        | 4.5        | 4.53      | 0.06                                 |
| 40                          | 4.3                 | 4.2        | 4.2        | 4.23      | 0.06                                 |
| 41                          | 4.0                 | 3.9        | 3.8        | 3.90      | 0.10                                 |
| 42                          | 3.7                 | 3.5        | 3.6        | 3.60      | 0.10                                 |
| 43                          | 3.5                 | 3.3        | 3.2        | 3.33      | 0.15                                 |
| 44                          | 3.2                 | 3.0        | 2.9        | 3.03      | 0.15                                 |
| 45                          | 3.0                 | 2.7        | 2.7        | 2.80      | 0.17                                 |
| 46                          | 2.7                 | 2.4        | 2.4        | 2.50      | 0.17                                 |
| 47                          | 2.4                 | 2.1        | 2.2        | 2.23      | 0.15                                 |
| 48                          | 2.3                 | 2.0        | 2.0        | 2.10      | 0.17                                 |
| 49                          | 2.0                 | 1.8        | 1.8        | 1.87      | 0.12                                 |
| 50                          | 1.8                 | 1.6        | 1.7        | 1.70      | 0.10                                 |
| 51                          | 1.7                 | 1.5        | 1.6        | 1.60      | 0.10                                 |

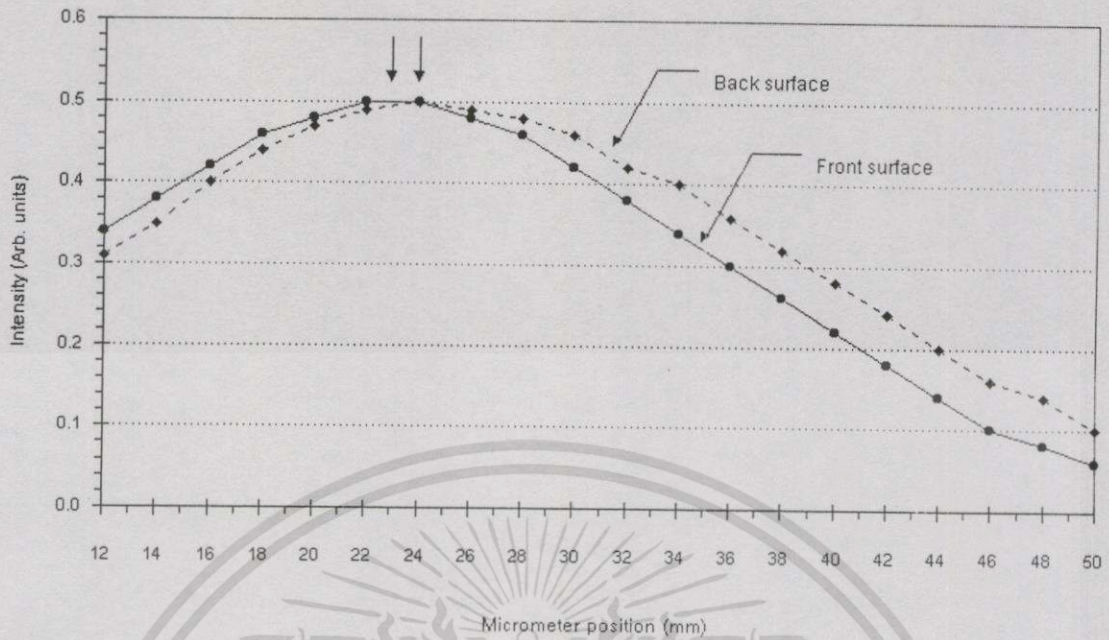
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ผลการวัดระยะทางด้วยไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์

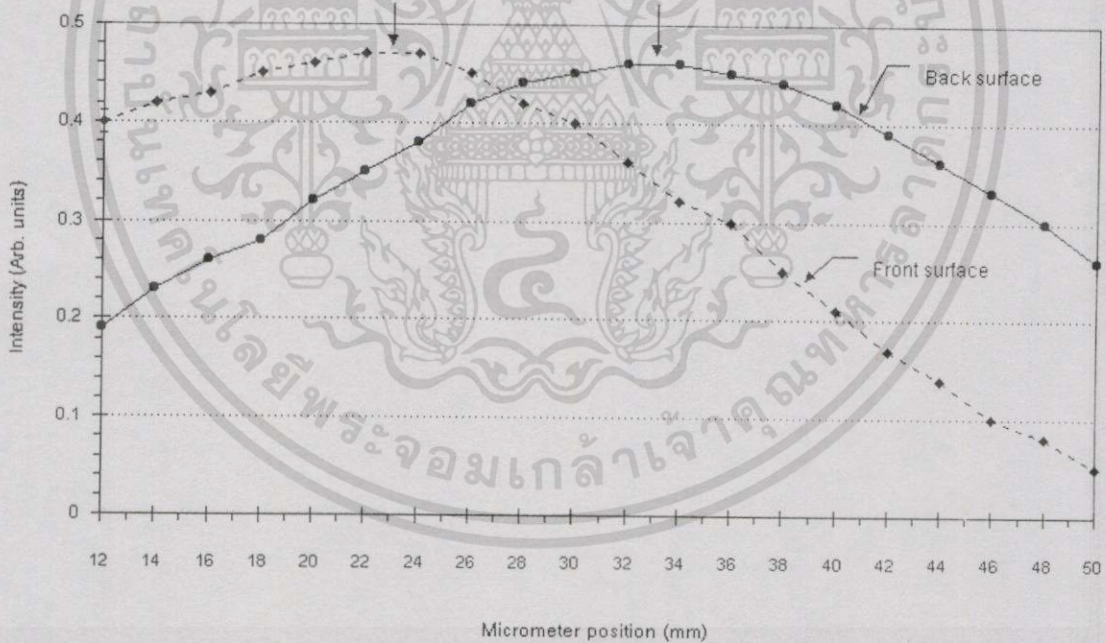
ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดระยะทางแสดงดังรูปที่ 4.6 เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ตามรูปที่ 4.6 แล้วแทนวัสดุทดสอบด้วยแผ่นแก้วสไลด์ จากนั้นทำการเลื่อนกระจก M1 ที่ติดอยู่กับไมโครมิเตอร์เข้าหรือออกเพื่อหาตำแหน่งที่ทำให้ระยะ  $L_1$  เท่ากับ  $L_2$  ซึ่งที่ตำแหน่งนี้จะทำให้ความเข้มแสงที่เกิดจากการแทรกสอดของแสงระหว่างแสงที่มาจากเส้นทาง  $L_1$  และแสงที่สะท้อนจากผิวด้านหน้าของแผ่นแก้วสไลด์มีค่าสูงสุด บันทึกตำแหน่งของไมโครมิเตอร์และค่าความเข้มแสงที่ปรากฏยังออสซิลโลสโคป จากนั้นทำการเลื่อนกระจก M1 ออกมาเรื่อยๆ จนกระทั่งพบตำแหน่งที่ทำให้สัญญาณของการแทรกสอดที่วัดได้จากโฟโตดีเทคเตอร์มีค่าสูงสุดอีกครั้ง ตำแหน่งนี้คือตำแหน่งที่เกิดการแทรกสอดระหว่างแสงที่มาจากเส้นทาง  $L_1$  และแสงที่สะท้อนจากผิวด้านหลังของแผ่นแก้วสไลด์ บันทึกตำแหน่งของไมโครมิเตอร์และค่าความเข้มแสงที่ปรากฏยังออสซิลโลสโคป ระยะห่างระหว่างตำแหน่งของไมโครมิเตอร์ที่ทำให้สัญญาณของการแทรกสอดที่วัดได้จากโฟโตดีเทคเตอร์มีค่าสูงสุดทั้งสองครั้งก็คือ ความหนาของวัสดุทดสอบนั่นเอง ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้งแล้วนำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย จากนั้นทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนวัสดุทดสอบเป็นวัสดุเปอร์สเปกซ์ ผลของการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.3 สำหรับแผ่นแก้วสไลด์และรูปที่ 5.4 สำหรับวัสดุเปอร์สเปกซ์

จากรูปที่ 5.3 และ 5.4 จะเห็นว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของไมโครมิเตอร์กับค่าความเข้มแสงจากการแทรกสอดของแสงที่สะท้อนจากผิวด้านหน้าและผิวด้านหลังของวัสดุทดสอบแยกออกจากกันเป็นสองกราฟ ซึ่งในความเป็นจริงจะต้องเป็นกราฟรูปเดียวกัน เนื่องจากวัสดุทดสอบที่ใช้ไม่มีระนาบของผิวด้านหน้าและผิวด้านหลังไม่ขนานกัน จึงทำให้แสงที่สะท้อนจากผิวทั้งสองไม่อยู่ในแนวลำแสงเดียวกัน ดังนั้นเวลาหาตำแหน่งของผิวด้านหน้าและผิวด้านหลังของวัสดุทดสอบต้องมีการปรับระนาบของผิวด้านหน้าครั้งหนึ่งและผิวด้านหลังอีกครั้งหนึ่ง ทำให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของไมโครมิเตอร์กับค่าความเข้มแสงของการแทรกสอดของแสงที่สะท้อนจากผิวด้านหน้าและผิวด้านหลังของวัสดุทดสอบจึงแยกออกจากกันเป็นสองกราฟ

จากรูปที่ 5.3 และ 5.4 จะเห็นว่าความหนาของแผ่นแก้วสไลด์และวัสดุเปอร์สเปกซ์ที่วัดโดยไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์มีค่าเท่ากับ 1 และ 10 มิลลิเมตรตามลำดับ ซึ่งตรงกับค่าที่วัดได้จากการใช้ไมโครมิเตอร์วัดโดยตรง แต่ข้อแตกต่างของทั้งสองวิธีคือ การวัดโดยใช้ไมโครมิเตอร์เครื่องมือจะต้องสัมผัสกับวัสดุโดยตรง ซึ่งถ้าวัดไม่ถูกวิธีอาจทำให้วัสดุเกิดความเสียหายได้ แต่การวัดโดยใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์เครื่องมือไม่ต้องสัมผัสกับวัสดุโดยตรง ดังนั้นจึงไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับวัสดุ



รูปที่ 5.3 การใช้ไมเคลสตันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์วัดความหนาของแผ่นแก้วสไลด์หนา 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.4 การใช้ไมเคลสตันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์วัดความหนาของวัสดุเพอร์สเปกซ์หนา 10 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองการใช้ไมเคลตันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์วัดความหนาของแผ่นแก้วสไลด์  
หนา 1 มิลลิเมตร

| Micrometer<br>position<br>(mm) | Front surface               |                                      | Back surface                |                                      |
|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
|                                | Average intensity<br>(Volt) | Standard deviation<br>$\sigma_{n-1}$ | Average intensity<br>(Volt) | Standard deviation<br>$\sigma_{n-1}$ |
| 12                             | 0.34                        | 0.01                                 | 0.31                        | 0.00                                 |
| 14                             | 0.38                        | 0.01                                 | 0.35                        | 0.01                                 |
| 16                             | 0.42                        | 0.01                                 | 0.40                        | 0.00                                 |
| 18                             | 0.46                        | 0.01                                 | 0.44                        | 0.01                                 |
| 20                             | 0.48                        | 0.01                                 | 0.47                        | 0.01                                 |
| 22                             | 0.50                        | 0.01                                 | 0.49                        | 0.01                                 |
| 24                             | 0.50                        | 0.01                                 | 0.50                        | 0.01                                 |
| 26                             | 0.48                        | 0.01                                 | 0.49                        | 0.01                                 |
| 28                             | 0.46                        | 0.01                                 | 0.48                        | 0.00                                 |
| 30                             | 0.42                        | 0.01                                 | 0.46                        | 0.01                                 |
| 32                             | 0.38                        | 0.01                                 | 0.42                        | 0.01                                 |
| 34                             | 0.34                        | 0.02                                 | 0.40                        | 0.01                                 |
| 36                             | 0.30                        | 0.01                                 | 0.36                        | 0.01                                 |
| 38                             | 0.26                        | 0.02                                 | 0.32                        | 0.01                                 |
| 40                             | 0.22                        | 0.01                                 | 0.28                        | 0.01                                 |
| 42                             | 0.18                        | 0.01                                 | 0.24                        | 0.01                                 |
| 44                             | 0.14                        | 0.02                                 | 0.20                        | 0.01                                 |
| 46                             | 0.10                        | 0.00                                 | 0.16                        | 0.01                                 |
| 48                             | 0.08                        | 0.01                                 | 0.14                        | 0.01                                 |
| 50                             | 0.06                        | 0.01                                 | 0.10                        | 0.01                                 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

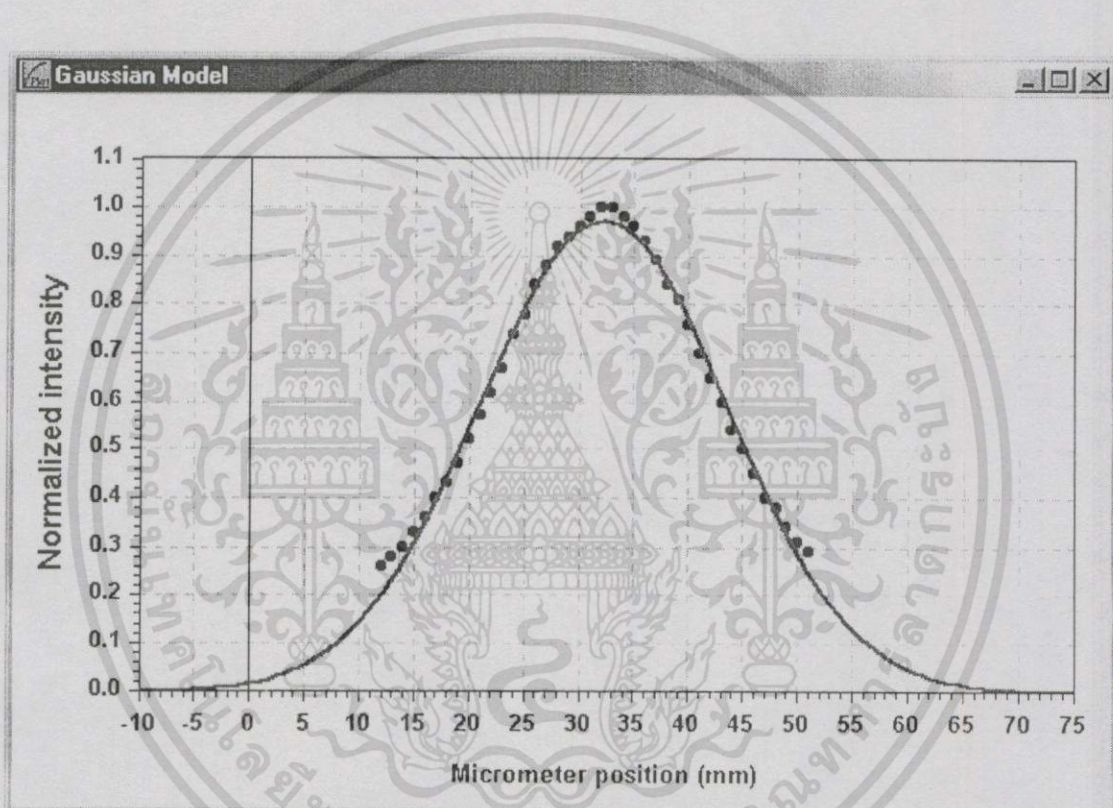
ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองการใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์วัดความหนาของวัสดุเปอร์สเปกซ์  
หนา 10 มิลลิเมตร

| Micrometer<br>position<br>(mm) | Front surface               |                                      | Back surface                |                                      |
|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
|                                | Average intensity<br>(Volt) | Standard deviation<br>$\sigma_{n-1}$ | Average intensity<br>(Volt) | Standard deviation<br>$\sigma_{n-1}$ |
| 12                             | 0.40                        | 0.01                                 | 0.19                        | 0.01                                 |
| 14                             | 0.42                        | 0.01                                 | 0.23                        | 0.01                                 |
| 16                             | 0.43                        | 0.01                                 | 0.26                        | 0.00                                 |
| 18                             | 0.45                        | 0.01                                 | 0.28                        | 0.01                                 |
| 20                             | 0.46                        | 0.01                                 | 0.32                        | 0.01                                 |
| 22                             | 0.47                        | 0.01                                 | 0.35                        | 0.01                                 |
| 24                             | 0.47                        | 0.00                                 | 0.38                        | 0.01                                 |
| 26                             | 0.45                        | 0.01                                 | 0.42                        | 0.01                                 |
| 28                             | 0.42                        | 0.01                                 | 0.44                        | 0.01                                 |
| 30                             | 0.40                        | 0.01                                 | 0.45                        | 0.01                                 |
| 32                             | 0.36                        | 0.01                                 | 0.46                        | 0.00                                 |
| 34                             | 0.32                        | 0.01                                 | 0.46                        | 0.01                                 |
| 36                             | 0.30                        | 0.01                                 | 0.45                        | 0.01                                 |
| 38                             | 0.25                        | 0.01                                 | 0.44                        | 0.00                                 |
| 40                             | 0.21                        | 0.01                                 | 0.42                        | 0.01                                 |
| 42                             | 0.17                        | 0.01                                 | 0.39                        | 0.01                                 |
| 44                             | 0.14                        | 0.01                                 | 0.36                        | 0.01                                 |
| 46                             | 0.10                        | 0.01                                 | 0.33                        | 0.01                                 |
| 48                             | 0.08                        | 0.01                                 | 0.30                        | 0.00                                 |
| 50                             | 0.05                        | 0.01                                 | 0.26                        | 0.01                                 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 ผลการลดความยาวอาพันธ์ของแหล่งกำเนิดแสงด้วยเทคนิคการสแกรมเบิลโหมด

ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาการลดความยาวอาพันธ์ของแหล่งกำเนิดแสงด้วยเทคนิคการสแกรมเบิลโหมดแสดงดังรูปที่ 4.7 พิจารณากรณีที่ยังไม่มีการใช้ใยแก้วนำแสง เมื่อทำการสแกนไมโครมิเตอร์จากตำแหน่งที่ 12 ถึงตำแหน่งที่ 51 แล้วนำข้อมูลที่ได้อ่านไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดกับตำแหน่งของไมโครมิเตอร์จะได้กราฟดังรูปที่ 5.1 เมื่อทำเคอร์ฟฟิตติง (Curve fitting) กราฟรูปที่ 5.1 จะพบว่าการเคอร์ฟฟิตติงที่ได้จะเป็นรูปเกาส์เซียนดังรูปที่ 5.5

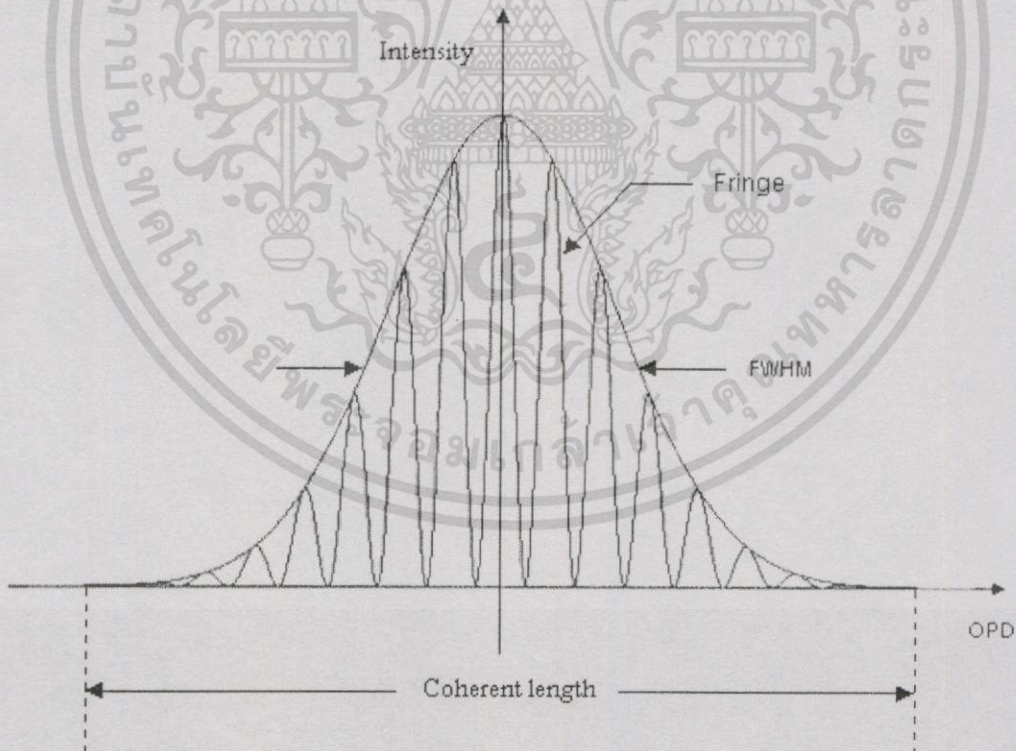


รูปที่ 5.5 กราฟรูปเกาส์เซียนที่ได้จากการทำเคอร์ฟฟิตติง (Curve fitting) ข้อมูลจากกราฟรูปที่ 5.1

จากเงื่อนไขการเกิดการแทรกสอดของแสงอาพันธ์ 2 ลำแสงจะพบว่า แสงอาพันธ์จะแทรกสอดกันเฉพาะในช่วงที่แสงทั้งสองยังคงมีความเป็นอาพันธ์ซึ่งกันและกันเท่านั้น อาจจะเป็นอาพันธ์โดยสมบูรณ์หรืออาพันธ์บางส่วนก็ได้ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.6 ถ้าเกินช่วงความเป็นอาพันธ์ซึ่งกันและกันแล้วแสงจะไม่เกิดการแทรกสอดกัน ดังนั้นถ้าหาช่วงที่แสงเกิดการแทรกสอดกันได้ จะทำให้ทราบความยาวอาพันธ์ของแสงนั้นๆ จากรูปที่ 5.5 พบว่าความกว้างของฐานกราฟรูปเกาส์เซียนก็คือช่วงที่แสงเกิดการแทรกสอดกันทั้งหมด ซึ่งก็คือความยาวอาพันธ์ของแสงนั่นเอง

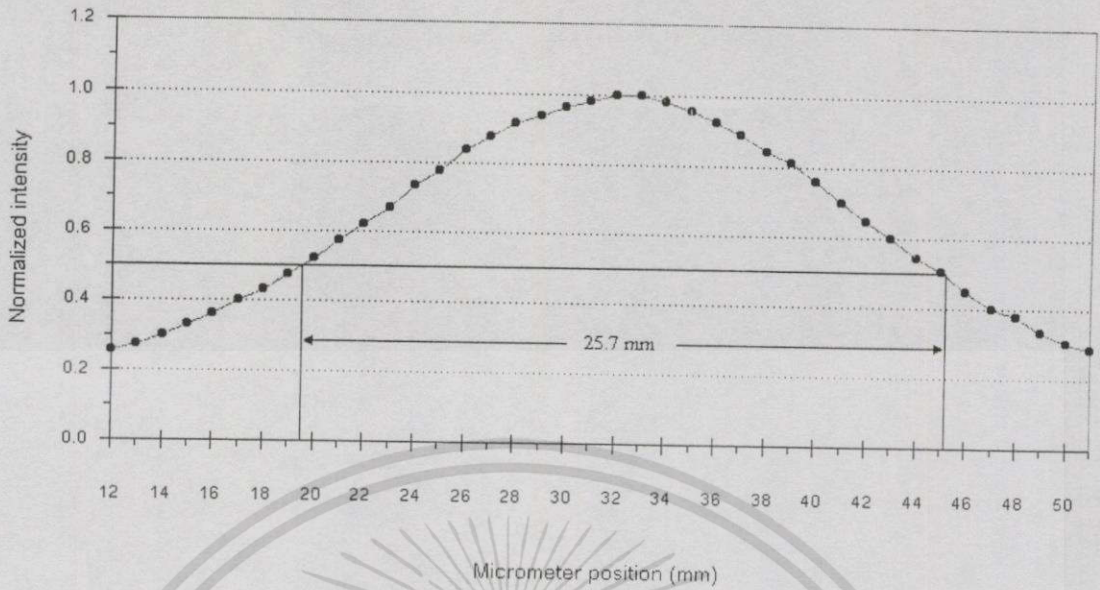
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่จากกราฟรูปที่ 5.1 จะเห็นว่าช่วงการสแกนของไมโครมิเตอร์ไม่สามารถหาตำแหน่งที่ค่าความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดมีค่าเป็นศูนย์ได้ (เป็นขีดจำกัดของเครื่องมือที่ใช้) และในทางปฏิบัติ จะไม่สามารถหาตำแหน่งที่ค่าความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดมีค่าเป็นศูนย์ได้เช่นกัน เนื่องจากสัญญาณที่วัดได้ต่ำสุดจากโฟโตดีเทคเตอร์ที่ปรากฏยังออสซิลโลสโคปจะมีค่าเท่ากับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบซึ่งมีค่ามากกว่าศูนย์เสมอ (สัญญาณรบกวนจากภายนอกระบบเช่น แสงสว่างจากภายนอก ระบบ อุณหภูมิ และการสั่นสะเทือนเนื่องจากสิ่งแวดล้อม ส่วนสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในระบบเช่น สัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ เป็นต้น) ดังนั้นการหาความยาวอาพันธ์จากตำแหน่งที่ค่าความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดมีค่าเป็นศูนย์จึงทำไม่ได้ ดังนั้นจะต้องอาศัยตำแหน่งอื่นๆ ของกราฟเป็นตำแหน่งอ้างอิงในการหาความยาวอาพันธ์ของแสง ในงานวิจัยนี้ได้เลือกตำแหน่ง FWHM (Full Width Half Maximum) ของกราฟรูปเกาส์เซียนเป็นตำแหน่งอ้างอิงในการหาความยาวอาพันธ์ของแสงแทนตำแหน่งที่ค่าความเข้มแสงที่เกิดจากการแทรกสอดมีค่าเป็นศูนย์ดังรูปที่ 5.6 เพราะตำแหน่งดังกล่าวสามารถหาได้จากการสแกนด้วยไมโครมิเตอร์และค่าความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอด ณ ตำแหน่ง FWHM นี้มีค่าสูงพอและสามารถวัดได้



รูปที่ 5.6 แสดงการหาความยาวอาพันธ์ของแสงจากช่วงที่แสงเกิดการแทรกสอดกันทั้งหมดและตำแหน่ง FWHM ของกราฟรูปเกาส์เซียนซึ่งเป็นตำแหน่งอ้างอิงในการหาความยาวอาพันธ์ของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 แสดงการหาความยาวอาพันธ์ของแสงโดยพิจารณาจากตำแหน่ง FWHM ของข้อมูล จากกราฟรูปที่ 5.1

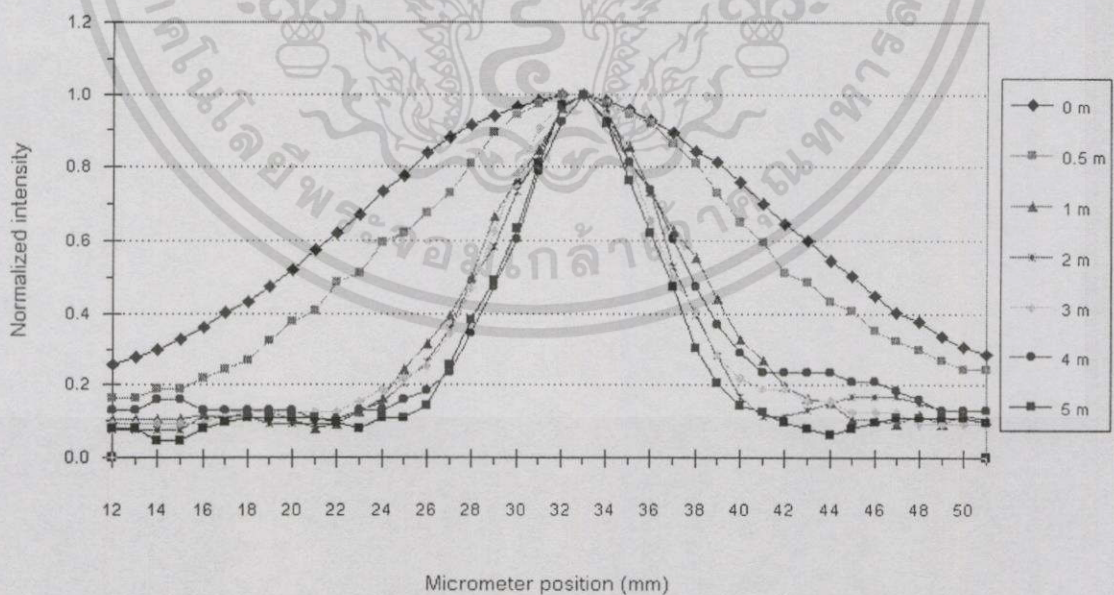
จากรูปที่ 5.7 ความยาวอาพันธ์ของแสง ณ ตำแหน่ง FWHM คือ 25.7 มิลลิเมตร ซึ่งยังถือว่าเป็นแสงที่มีความยาวอาพันธ์ยาวไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นแสงอินพุตให้กับไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เพื่อใช้ในการตรวจวัด ดังนั้นจึงอาศัยเทคนิคการสแกรมเบิ้ลโหมดด้วยใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ เพื่อให้ความยาวอาพันธ์ของแสงก่อนเข้าสู่ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์สั้นลง ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งได้เพิ่มส่วนของใยแก้วนำแสงไว้ที่ส่วนหน้าของระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ จากนั้นทำการทดลองตามหัวข้อ 4.3.2 โดยใช้ใยแก้วนำแสงที่มีความยาว 1 เมตร 2 เมตร 3 เมตร 4 เมตร และ 5 เมตรตามลำดับ ผลจากการใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์จะทำให้ความยาวอาพันธ์ของแสง (ที่ 25.7 มิลลิเมตร) ลดลงเรื่อยๆ ตามความยาวของใยแก้วนำแสงที่เพิ่มขึ้น ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.3.1 ผลการทดลองการลดความยาวอาพันธ์ของแสงด้วยเทคนิคการสแกรมเบิ้ลโหมดโดยใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ที่มีความยาวต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.8 ส่วนรูปที่ 5.9 เป็นกราฟแสดงค่าความยาวอาพันธ์ของแสงที่เกิดจากการใช้เทคนิคการสแกรมเบิ้ลโหมดด้วยใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ที่มีความยาวต่างๆ

จากรูปที่ 5.8 และ 5.9 จะเห็นว่าเมื่อความยาวของใยแก้วนำแสงเพิ่มขึ้น ความกว้างของกราฟ ณ ตำแหน่ง FWHM จะลดลง ซึ่งหมายความว่าความยาวอาพันธ์ของแสง (พิจารณาที่ตำแหน่ง FWHM) ลดลงตามความยาวที่เพิ่มขึ้นของใยแก้วนำแสง ดังนั้นเมื่อหาความยาวที่เหมาะสมของใยแก้วนำแสงจะได้แสงที่มีความยาวอาพันธ์เหมาะสมที่จะใช้เป็นแสงอินพุตให้กับไมเคลสันอินเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

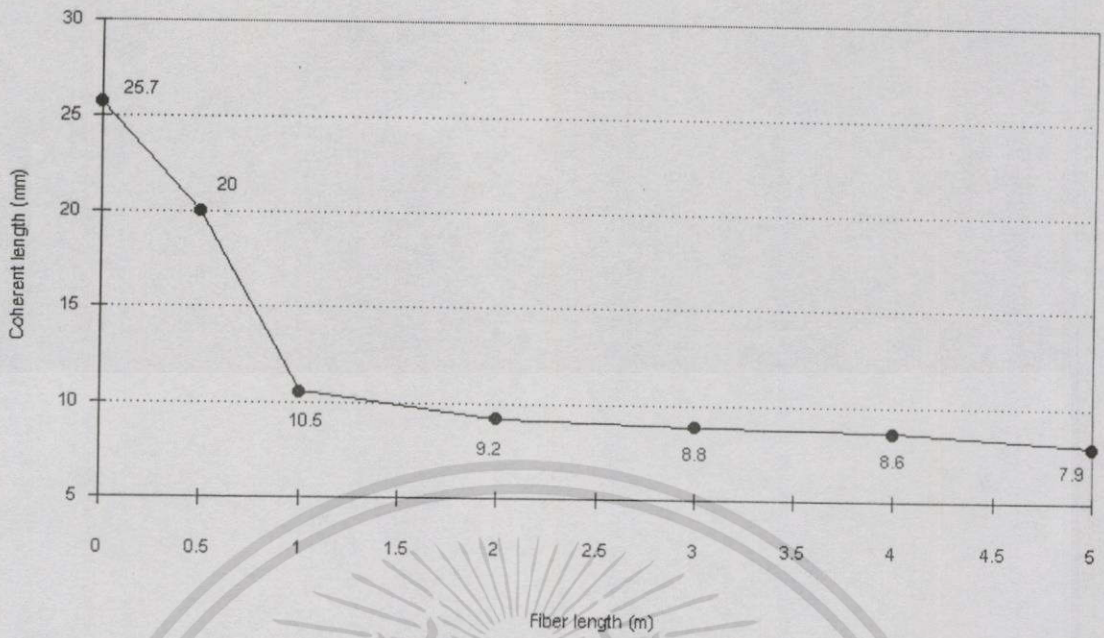
ฟิโอมิเตอร์สำหรับงานด้านการตรวจวัดต่อไป ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ความยาวอาพันธ์ของแสงเท่ากับ 10.5 มิลลิเมตรหรือใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมคชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ที่ความยาว 1 เมตร สำหรับเหตุผลที่เลือกใช้คือ ถ้าเลือกใช้แสงที่มีความยาวอาพันธ์มากกว่า จะทำให้ความละเอียดในการวัดของไมเคลสันอินเตอร์ฟีโอมิเตอร์ลดลงดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.3.1 สำหรับตัวอย่างการใช้แสงที่มีความยาวอาพันธ์ยาวในการตรวจวัดเช่น การทดลองในหัวข้อ 5.2 จะเห็นได้ชัดว่าถ้ากราฟที่ได้จากสแกนด้วยไมโครมิเตอร์มีความกว้างมาก (ความยาวอาพันธ์มาก) จะทำให้การหาตำแหน่งของแสงที่สะท้อนจากผิวด้านหน้าและผิวด้านหลังของวัสดุทดสอบกระทำได้อย่างยาก เพราะกราฟที่ได้จะเกิดการซ้อนทับกันทำให้ยากต่อการแยกแยะข้อมูล โดยเฉพาะถ้าใช้วัสดุทดสอบที่มีความหนาแน่นน้อยๆ แต่ถ้าเลือกใช้แสงที่มีความยาวอาพันธ์สั้นกว่า ซึ่งก็หมายความว่าต้องใช้ใยแก้วนำแสงที่มีความยาวมากขึ้น ผลคือความเข้มแสงที่ออกจากปลายใยแก้วนำแสงจะมีค่าน้อยมาก เนื่องจากเมื่อแสงเดินทางในใยแก้วนำแสงจะเกิดการสูญเสีย การสะท้อนและการกระจายของแสง ทำให้การวัดสัญญาณที่ได้จากการแทรกสอดกระทำได้อย่างยากและสัญญาณจะถูกบรบกวนได้ง่าย ดังรูปที่ 5.10

จากรูปที่ 5.10 จะเห็นว่าเมื่อใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมคชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ที่ความยาว 1 เมตร จะทำให้ค่าความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดมีค่าลดลง 87.7 % จากกรณีที่ไม่มีการใช้ใยแก้วนำแสง แต่ถ้าใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมคชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ที่ความยาว 5 เมตร จะเห็นว่าค่าความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดมีค่าลดลงถึง 99.1 % ดังนั้นการเลือกความยาวของใยแก้วนำแสงเพื่อให้ได้แสงที่มีความยาวอาพันธ์ที่เหมาะสมควรจะพิจารณาจากค่าความเข้มแสงที่ออกจากปลายใยแก้วนำแสงเป็นหลัก (หรือค่ากำลังแสงของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้)

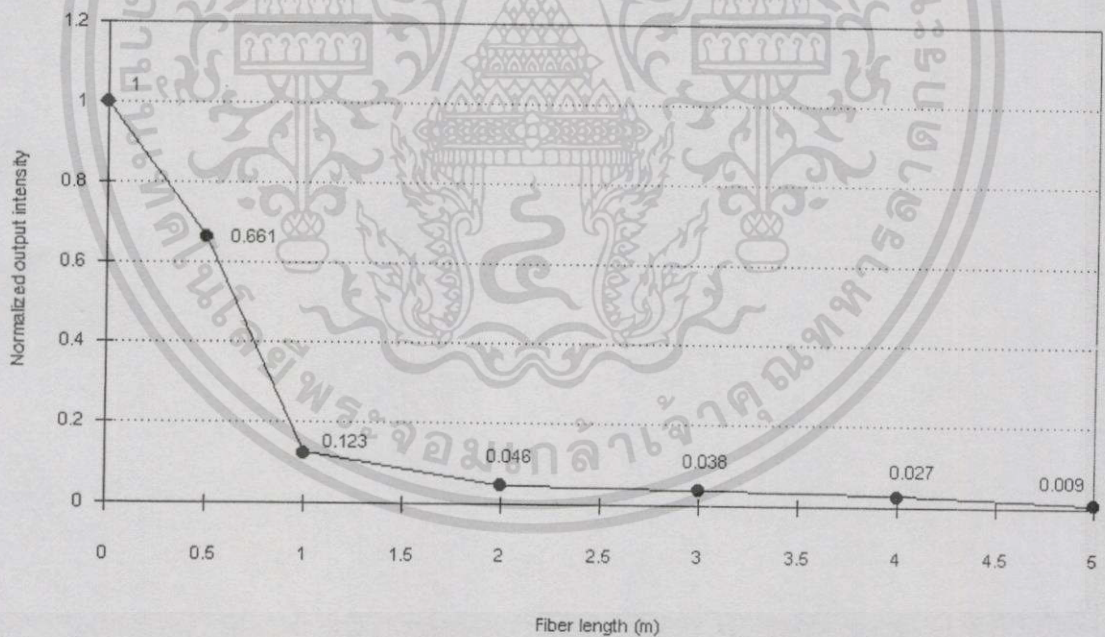


**รูปที่ 5.8** กราฟแสดงค่าความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดและความกว้างของกราฟ ณ ตำแหน่ง FWHM เมื่อใช้เทคนิคการสแกนเบิลโหมคด้วยใยแก้วนำแสงหลายโหมคชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ที่ความยาวต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงค่าความยาวอาพันธ์ของแสงที่เกิดจากการใช้เทคนิคการสแกนเบ็ดโหมดด้วยใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสตีปอินเด็กซ์ที่มีความยาวต่างๆ



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงค่าความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดเมื่อใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสตีปอินเด็กซ์ที่มีความยาวต่างๆ

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดเมื่อใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมด ชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ที่มีความยาวต่างๆ

| Micrometer position | Normalized intensity |       |      |      |      |      |      |
|---------------------|----------------------|-------|------|------|------|------|------|
|                     | 0 m                  | 0.5 m | 1 m  | 2 m  | 3 m  | 4 m  | 5 m  |
| 12                  | 0.26                 | 0.16  | 0.10 | 0.08 | 0.09 | 0.13 | 0.08 |
| 13                  | 0.28                 | 0.16  | 0.10 | 0.08 | 0.09 | 0.13 | 0.08 |
| 14                  | 0.30                 | 0.19  | 0.10 | 0.08 | 0.09 | 0.16 | 0.05 |
| 15                  | 0.33                 | 0.19  | 0.10 | 0.08 | 0.09 | 0.16 | 0.05 |
| 16                  | 0.36                 | 0.22  | 0.12 | 0.11 | 0.09 | 0.13 | 0.08 |
| 17                  | 0.40                 | 0.24  | 0.10 | 0.11 | 0.13 | 0.13 | 0.10 |
| 18                  | 0.43                 | 0.27  | 0.13 | 0.11 | 0.13 | 0.13 | 0.11 |
| 19                  | 0.47                 | 0.32  | 0.13 | 0.09 | 0.13 | 0.13 | 0.11 |
| 20                  | 0.52                 | 0.38  | 0.10 | 0.09 | 0.13 | 0.13 | 0.11 |
| 21                  | 0.57                 | 0.41  | 0.08 | 0.09 | 0.13 | 0.11 | 0.11 |
| 22                  | 0.62                 | 0.49  | 0.09 | 0.09 | 0.13 | 0.11 | 0.10 |
| 23                  | 0.67                 | 0.51  | 0.13 | 0.13 | 0.16 | 0.13 | 0.08 |
| 24                  | 0.74                 | 0.59  | 0.16 | 0.15 | 0.19 | 0.13 | 0.11 |
| 25                  | 0.78                 | 0.62  | 0.24 | 0.21 | 0.22 | 0.16 | 0.11 |
| 26                  | 0.84                 | 0.68  | 0.31 | 0.26 | 0.25 | 0.18 | 0.14 |
| 27                  | 0.88                 | 0.73  | 0.40 | 0.36 | 0.34 | 0.24 | 0.25 |
| 28                  | 0.92                 | 0.81  | 0.50 | 0.49 | 0.47 | 0.34 | 0.38 |
| 29                  | 0.94                 | 0.89  | 0.67 | 0.58 | 0.63 | 0.47 | 0.49 |
| 30                  | 0.96                 | 0.95  | 0.77 | 0.74 | 0.78 | 0.61 | 0.63 |
| 31                  | 0.98                 | 0.97  | 0.85 | 0.83 | 0.91 | 0.79 | 0.81 |
| 32                  | 1.00                 | 1.00  | 0.96 | 0.96 | 0.98 | 0.92 | 0.97 |
| 33                  | 1.00                 | 1.00  | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 34                  | 0.98                 | 0.97  | 0.93 | 0.96 | 0.94 | 0.92 | 0.92 |
| 35                  | 0.96                 | 0.95  | 0.86 | 0.82 | 0.81 | 0.82 | 0.76 |
| 36                  | 0.93                 | 0.92  | 0.73 | 0.74 | 0.66 | 0.74 | 0.62 |
| 37                  | 0.89                 | 0.86  | 0.63 | 0.53 | 0.50 | 0.61 | 0.48 |
| 38                  | 0.84                 | 0.81  | 0.55 | 0.40 | 0.41 | 0.47 | 0.30 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 (ต่อ)

| Micrometer position | Normalized intensity |       |      |      |      |      |      |
|---------------------|----------------------|-------|------|------|------|------|------|
|                     | 0 m                  | 0.5 m | 1 m  | 2 m  | 3 m  | 4 m  | 5 m  |
| 39                  | 0.81                 | 0.73  | 0.44 | 0.28 | 0.28 | 0.37 | 0.21 |
| 40                  | 0.76                 | 0.65  | 0.33 | 0.17 | 0.22 | 0.29 | 0.14 |
| 41                  | 0.70                 | 0.59  | 0.27 | 0.11 | 0.19 | 0.24 | 0.13 |
| 42                  | 0.65                 | 0.51  | 0.20 | 0.11 | 0.19 | 0.24 | 0.10 |
| 43                  | 0.60                 | 0.49  | 0.16 | 0.13 | 0.16 | 0.24 | 0.08 |
| 44                  | 0.54                 | 0.43  | 0.15 | 0.15 | 0.16 | 0.24 | 0.06 |
| 45                  | 0.50                 | 0.41  | 0.10 | 0.17 | 0.13 | 0.21 | 0.08 |
| 46                  | 0.45                 | 0.35  | 0.10 | 0.17 | 0.13 | 0.21 | 0.10 |
| 47                  | 0.40                 | 0.32  | 0.09 | 0.17 | 0.13 | 0.18 | 0.11 |
| 48                  | 0.38                 | 0.30  | 0.12 | 0.15 | 0.09 | 0.16 | 0.11 |
| 49                  | 0.34                 | 0.27  | 0.09 | 0.13 | 0.09 | 0.13 | 0.11 |
| 50                  | 0.31                 | 0.24  | 0.12 | 0.13 | 0.09 | 0.13 | 0.11 |
| 51                  | 0.29                 | 0.24  | 0.10 | 0.13 | 0.09 | 0.13 | 0.10 |

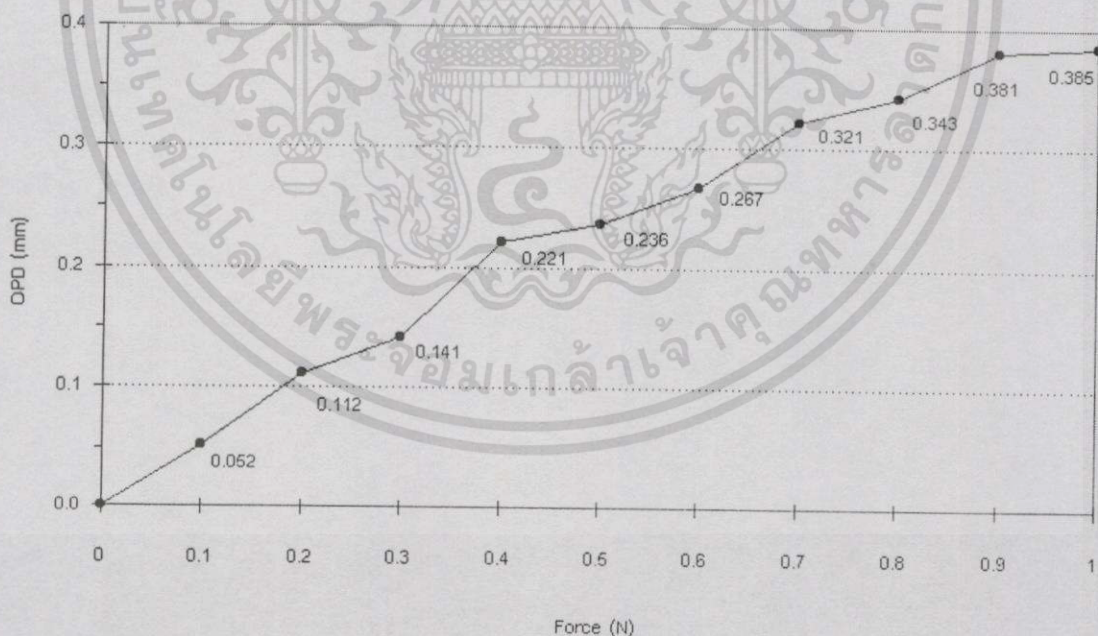
ตารางที่ 5.5 แสดงค่าความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดและค่าความยาวอาพันธ์ของแสงที่เกิดจากการใช้เทคนิคการสกรีมเบิลโทมดด้วยใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ป อินเด็กซ์ที่ความยาวต่างๆ

| Fiber length (m) | Average intensity (V) | Normalized intensity | Coherent length (mm) |
|------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| 0.0              | 5.600                 | 1.000                | 25.7                 |
| 0.5              | 3.700                 | 0.661                | 20.0                 |
| 1.0              | 0.688                 | 0.123                | 10.5                 |
| 2.0              | 0.256                 | 0.046                | 9.2                  |
| 3.0              | 0.212                 | 0.038                | 8.8                  |
| 4.0              | 0.152                 | 0.027                | 8.6                  |
| 5.0              | 0.050                 | 0.009                | 7.9                  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

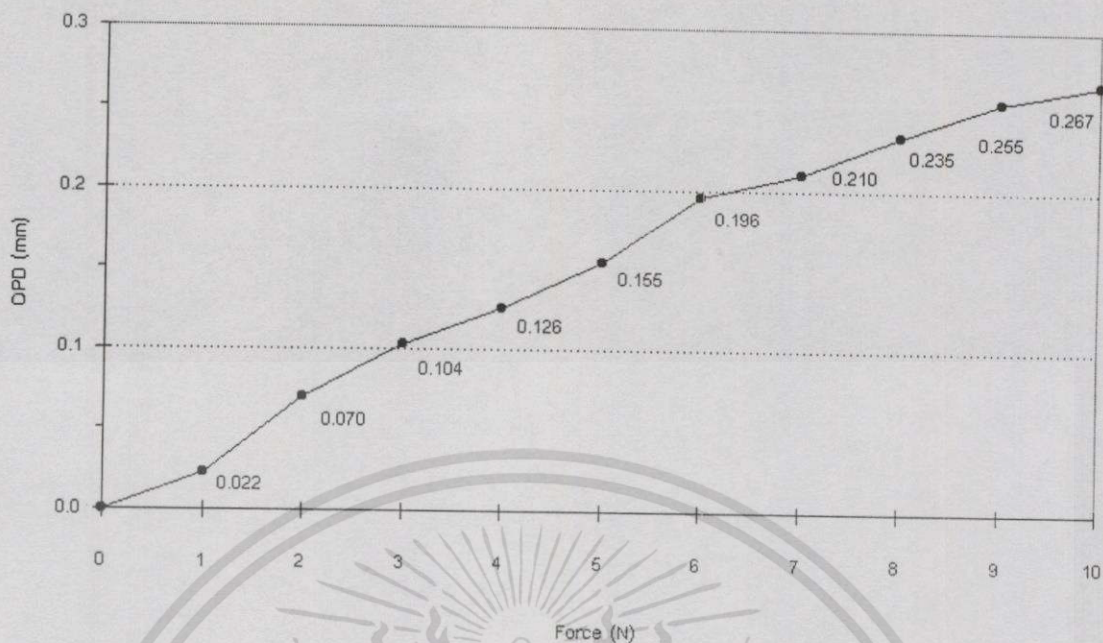
#### 5.4 ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรงและประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ศึกษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นทางแสงของวัสดุโปร่งใส

ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรงและประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ศึกษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นทางแสงของวัสดุโปร่งใสแสดงคังรูปที่ 4.8 ในส่วนของการลดความยาวอาพันธ์ของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงด้วยเทคนิคการสแกรมเบิลโหมคจะใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมคชนิดสเตปอินเด็กซ์ที่มีความยาว 1 เมตร (แสงมีความยาวอาพันธ์เท่ากับ 10.5 มิลลิเมตร) ส่วนน้ำหนักที่ใช้ควัสดุอะรัลไดรท์มีค่าเท่ากับ 10 – 100 กรัม โดยจะเพิ่มน้ำหนักทีละ 10 กรัม ส่วนวัสดุเปอร์สเปกซ์มีค่าเท่ากับ 100 – 1000 กรัม โดยจะเพิ่มน้ำหนักทีละ 100 กรัม การที่วัสดุทั้งสองใช้น้ำหนักแตกต่างกันเนื่องจากอะรัลไดรท์เป็นพลาสติกเนื้ออ่อน ถ้าใช้น้ำหนักขนาดเดียวกับวัสดุเปอร์สเปกซ์ อาจทำให้วัสดุอะรัลไดรท์เกิดความเสียหายได้ (สูญเสียคุณสมบัติความยืดหยุ่นหรือไม่คืนตัวเมื่อนำน้ำหนักออก) ส่วนวัสดุเปอร์สเปกซ์เป็นพลาสติกเนื้อแข็งถ้าใช้น้ำหนักขนาดเดียวกับวัสดุอะรัลไดรท์ จะทำให้เกิดผลของการเปลี่ยนแปลงได้ยาก เมื่อทำการทดลองตามหัวข้อที่ 4.4.2 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างทางเดินของแสงกับแรงขนาดต่างๆ ที่กระทำกับวัสดุคังรูปที่ 5.11 และ 5.12



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างทางเดินของแสงกับแรงที่กระทำกับวัสดุอะรัลไดรท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างทางเดินของแสงกับแรงที่กระทำกับวัสดุเปอร์สเปกซ์

ตารางที่ 5.6 แสดงค่าผลต่างทางเดินของแสงที่เกิดจากการให้แรงขนาดต่างๆ ที่กระทำกับวัสดุอะริคโครท์

| Force (N) | Average OPD (mm) | Standard deviation $\sigma_{n-1}$ |
|-----------|------------------|-----------------------------------|
| 0.0       | 0.000            | 0.000                             |
| 0.1       | 0.052            | 0.006                             |
| 0.2       | 0.112            | 0.025                             |
| 0.3       | 0.141            | 0.011                             |
| 0.4       | 0.221            | 0.013                             |
| 0.5       | 0.236            | 0.001                             |
| 0.6       | 0.267            | 0.010                             |
| 0.7       | 0.321            | 0.013                             |
| 0.8       | 0.343            | 0.021                             |
| 0.9       | 0.381            | 0.011                             |
| 1.0       | 0.385            | 0.010                             |

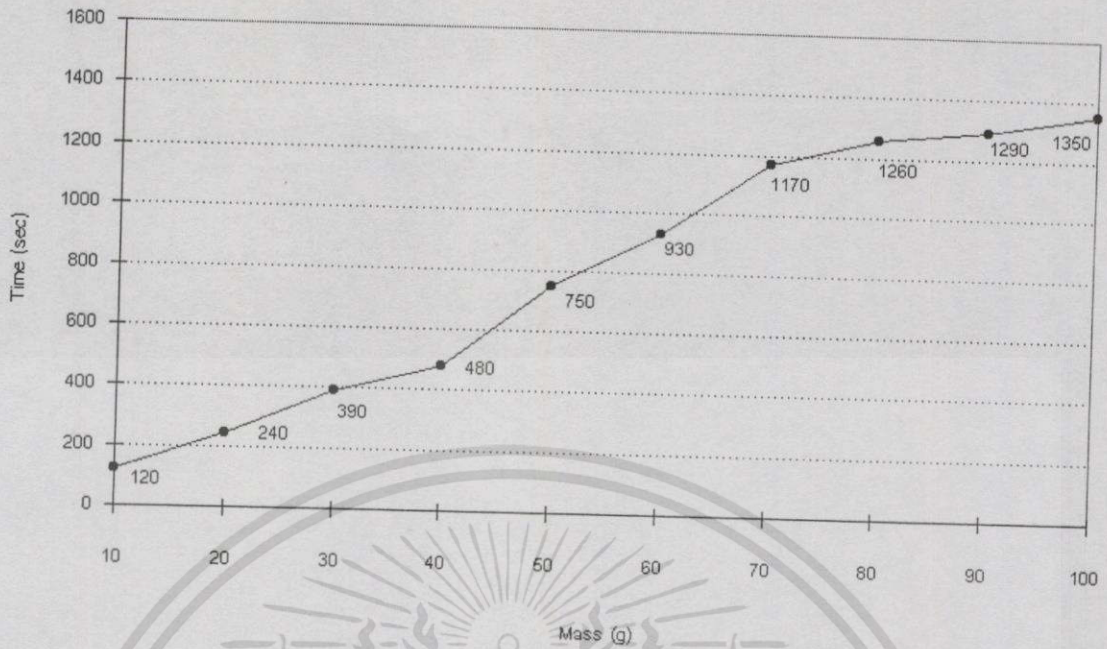
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 แสดงค่าผลต่างทางเดินของแสงที่เกิดจากการให้แรงขนาดต่างๆ ที่กระทำกับวัสดุเปอร์สเปกซ์

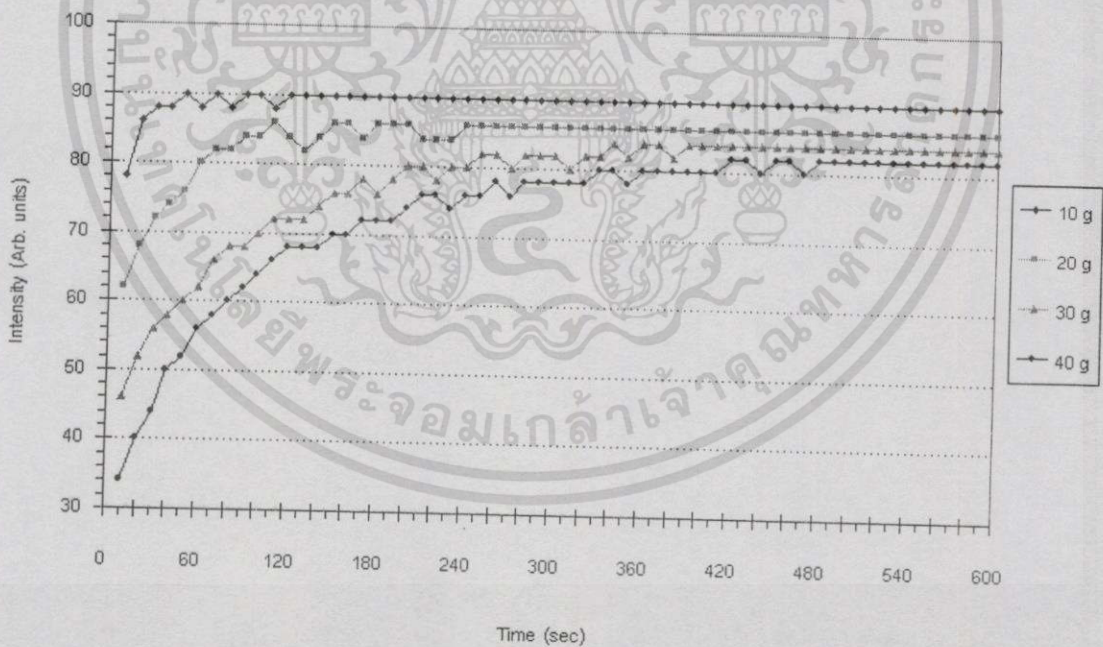
| Force<br>(N) | Average OPD<br>(mm) | Standard deviation<br>$\sigma_{n-1}$ |
|--------------|---------------------|--------------------------------------|
| 0            | 0.000               | 0.000                                |
| 1            | 0.022               | 0.004                                |
| 2            | 0.070               | 0.009                                |
| 3            | 0.104               | 0.022                                |
| 4            | 0.126               | 0.013                                |
| 5            | 0.155               | 0.022                                |
| 6            | 0.196               | 0.022                                |
| 7            | 0.210               | 0.023                                |
| 8            | 0.235               | 0.013                                |
| 9            | 0.255               | 0.009                                |
| 10           | 0.267               | 0.004                                |

เนื่องจากการให้แรงกดกับวัสดุทดสอบจะทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ แต่เมื่อนำแรงกดนั้นออก วัสดุก็จะพยายามปรับตัวให้กลับคืนสู่สภาพเดิม (ขนาดของแรงที่กดจะต้องไม่ทำให้วัสดุสูญเสียคุณสมบัติความยืดหยุ่น) เวลาที่วัสดุใช้ในการกลับคืนสู่สภาพเดิมเรียกว่า เวลาคลายตัว (Relaxation time) ในการทดลองการให้แรงกดกับวัสดุทดสอบ เวลาคลายตัวถือว่าเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณา เนื่องจากเมื่อนำแรงกดออกวัสดุจะพยายามปรับตัวให้กลับคืนสู่สภาพเดิม แต่ถ้าวัสดุยังไม่กลับสู่สภาพเดิมแล้วทำการทดลองต่อ จะทำให้ข้อมูลที่ได้เกิดความผิดพลาด ดังนั้นในการทดลองการให้แรงกดกับวัสดุทดสอบจะต้องหาเวลาคลายตัวของวัสดุด้วย การทดลองการหาเวลาคลายตัวของวัสดุทดสอบกระทำได้ตามหัวข้อ 4.4.3 ผลการทดลองการหาเวลาคลายตัวของอะรัลไดรท์และเปอร์สเปกซ์เมื่อใช้น้ำหนักกดขนาดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.13 และ 5.15 ตามลำดับ

จากกราฟรูปที่ 5.13 และ 5.15 จะเห็นว่า การให้น้ำหนักกดกับวัสดุทดสอบมากขึ้น จะทำให้เวลาคลายตัวของวัสดุมีค่ามากขึ้นด้วย นั่นแสดงว่าวัสดุใช้เวลาในการกลับคืนสู่สภาพเดิมนานขึ้น ดังนั้นการทำการทดลองครั้งต่อไปกับวัสดุทดสอบเดิม ควรจะเว้นระยะเวลาในการทดลองให้มากกว่าเวลาคลายตัวของวัสดุนั้น (ต้องพิจารณาแรงที่กระทำกับวัสดุด้วย)

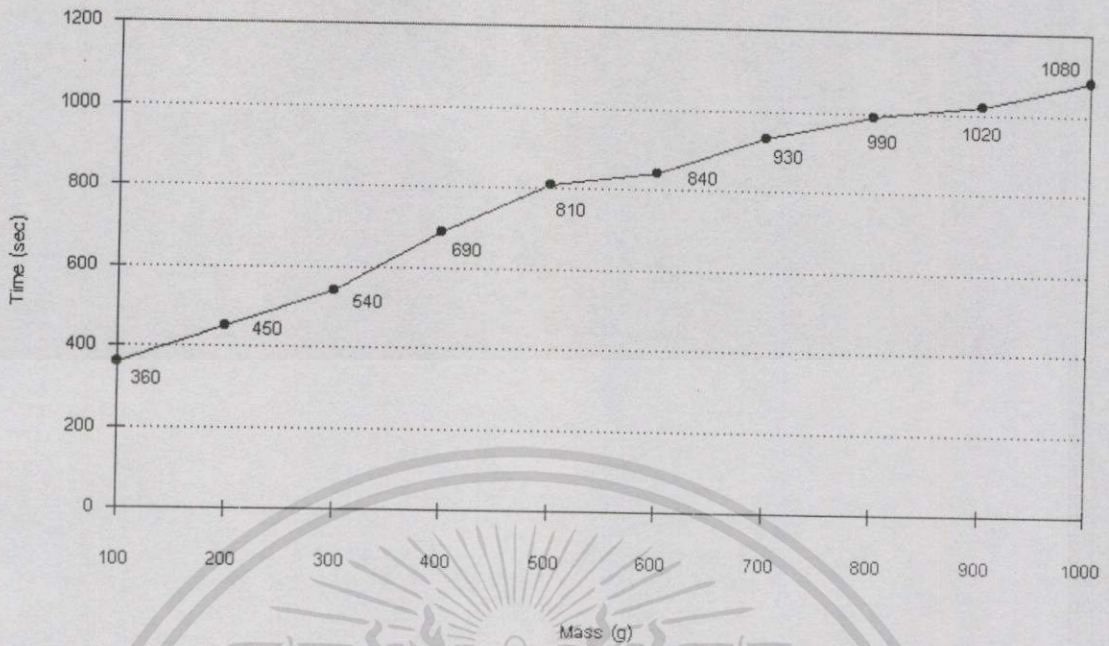


รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาคลายตัวของอะรต์ไครท์เมื่อนำน้ำหนักกดขนาดต่างๆ

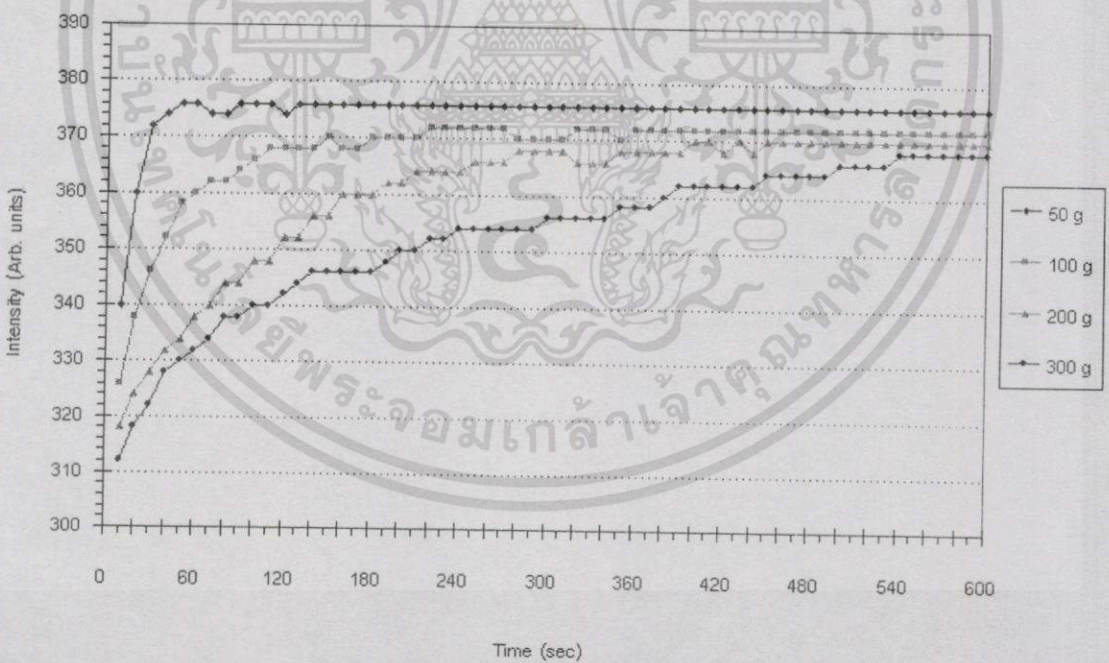


รูปที่ 5.14 กราฟแสดงค่าความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดในขณะที่อะรต์ไครท์คลายตัวเมื่อนำน้ำหนักขนาดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาคลายตัวของเปอร์สเปกซ์เมื่อนำน้ำหนักกดขนาดต่างๆ



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงค่าความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดในขณะที่เปอร์สเปกซ์คลายตัวเมื่อนำน้ำหนักขนาดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 แสดงค่าเวลากลายตัวของวัสดุอะรัลไดรท์และวัสดุเปอร์สเปกซ์เมื่อนำน้ำหนักกดขนาดต่างๆ

| Araldrite |                        | Perspex  |                        |
|-----------|------------------------|----------|------------------------|
| Mass (g)  | Relaxation times (sec) | Mass (g) | Relaxation times (sec) |
| 10        | 120                    | 100      | 360                    |
| 20        | 240                    | 200      | 450                    |
| 30        | 390                    | 300      | 540                    |
| 40        | 480                    | 400      | 690                    |
| 50        | 750                    | 500      | 810                    |
| 60        | 930                    | 600      | 840                    |
| 70        | 1170                   | 700      | 930                    |
| 80        | 1260                   | 800      | 990                    |
| 90        | 1290                   | 900      | 1020                   |
| 100       | 1350                   | 1000     | 1080                   |

ตารางที่ 5.9 แสดงค่าความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดในขณะที่วัสดุอะรัลไดรท์และวัสดุเปอร์สเปกซ์คลายตัวเมื่อนำน้ำหนักขนาดต่างๆ

| Time (sec) | Intensity (mV) |      |      |      |         |       |       |       |
|------------|----------------|------|------|------|---------|-------|-------|-------|
|            | Araldrite      |      |      |      | Perspex |       |       |       |
|            | 10 g           | 20 g | 30 g | 40 g | 50 g    | 100 g | 200 g | 300 g |
| 10         | 78             | 62   | 46   | 34   | 340     | 326   | 318   | 312   |
| 20         | 86             | 68   | 52   | 40   | 360     | 338   | 324   | 318   |
| 30         | 88             | 72   | 56   | 44   | 372     | 346   | 328   | 322   |
| 40         | 88             | 74   | 58   | 50   | 374     | 352   | 332   | 328   |
| 50         | 90             | 76   | 60   | 52   | 376     | 358   | 334   | 330   |
| 60         | 88             | 80   | 62   | 56   | 376     | 360   | 338   | 332   |
| 70         | 90             | 82   | 66   | 58   | 374     | 362   | 340   | 334   |
| 80         | 88             | 82   | 68   | 60   | 374     | 362   | 344   | 338   |
| 90         | 90             | 84   | 68   | 62   | 376     | 364   | 344   | 338   |
| 100        | 90             | 84   | 70   | 64   | 376     | 366   | 348   | 340   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.9 (ต่อ)

| Time<br>(sec) | Intensity (mV) |      |      |      |         |       |       |       |
|---------------|----------------|------|------|------|---------|-------|-------|-------|
|               | Araldite       |      |      |      | Perspex |       |       |       |
|               | 10 g           | 20 g | 30 g | 40 g | 50 g    | 100 g | 200 g | 300 g |
| 110           | 88             | 86   | 72   | 66   | 376     | 368   | 348   | 340   |
| 120           | 90             | 84   | 72   | 68   | 374     | 368   | 352   | 342   |
| 130           | 90             | 82   | 72   | 68   | 376     | 368   | 352   | 344   |
| 140           | 90             | 84   | 74   | 68   | 376     | 368   | 356   | 346   |
| 150           | 90             | 86   | 76   | 70   | 376     | 370   | 356   | 346   |
| 160           | 90             | 86   | 76   | 70   | 376     | 368   | 360   | 346   |
| 170           | 90             | 84   | 78   | 72   | 376     | 368   | 360   | 346   |
| 180           | 90             | 86   | 76   | 72   | 376     | 370   | 360   | 346   |
| 190           | 90             | 86   | 78   | 72   | 376     | 370   | 362   | 348   |
| 200           | 90             | 86   | 80   | 74   | 376     | 370   | 362   | 350   |
| 210           | 90             | 84   | 80   | 76   | 376     | 370   | 364   | 350   |
| 220           | 90             | 84   | 78   | 76   | 376     | 372   | 364   | 352   |
| 230           | 90             | 84   | 80   | 74   | 376     | 372   | 364   | 352   |
| 240           | 90             | 86   | 80   | 76   | 376     | 372   | 364   | 354   |
| 250           | 90             | 86   | 82   | 76   | 376     | 372   | 366   | 354   |
| 260           | 90             | 86   | 82   | 78   | 376     | 372   | 366   | 354   |
| 270           | 90             | 86   | 80   | 76   | 376     | 372   | 366   | 354   |
| 280           | 90             | 86   | 82   | 78   | 376     | 370   | 368   | 354   |
| 290           | 90             | 86   | 82   | 78   | 376     | 370   | 368   | 354   |
| 300           | 90             | 86   | 82   | 78   | 376     | 370   | 368   | 356   |
| 310           | 90             | 86   | 80   | 78   | 376     | 370   | 368   | 356   |
| 320           | 90             | 86   | 82   | 78   | 376     | 372   | 366   | 356   |
| 330           | 90             | 86   | 82   | 80   | 376     | 372   | 366   | 356   |
| 340           | 90             | 86   | 84   | 80   | 376     | 372   | 366   | 356   |
| 350           | 90             | 86   | 82   | 78   | 376     | 370   | 368   | 358   |
| 360           | 90             | 86   | 84   | 80   | 376     | 372   | 368   | 358   |
| 370           | 90             | 86   | 84   | 80   | 376     | 372   | 368   | 358   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.9 (ต่อ)

| Time<br>(sec) | Intensity (mV) |      |      |      |         |       |       |       |
|---------------|----------------|------|------|------|---------|-------|-------|-------|
|               | Araldite       |      |      |      | Perspex |       |       |       |
|               | 10 g           | 20 g | 30 g | 40 g | 50 g    | 100 g | 200 g | 300 g |
| 380           | 90             | 86   | 82   | 80   | 376     | 372   | 368   | 360   |
| 390           | 90             | 86   | 84   | 80   | 376     | 372   | 368   | 362   |
| 400           | 90             | 86   | 84   | 80   | 376     | 372   | 370   | 362   |
| 410           | 90             | 86   | 84   | 80   | 376     | 372   | 370   | 362   |
| 420           | 90             | 86   | 84   | 82   | 376     | 372   | 368   | 362   |
| 430           | 90             | 86   | 84   | 82   | 376     | 372   | 370   | 362   |
| 440           | 90             | 86   | 84   | 80   | 376     | 372   | 368   | 362   |
| 450           | 90             | 86   | 84   | 82   | 376     | 372   | 370   | 364   |
| 460           | 90             | 86   | 84   | 82   | 376     | 372   | 370   | 364   |
| 470           | 90             | 86   | 84   | 80   | 376     | 372   | 370   | 364   |
| 480           | 90             | 86   | 84   | 82   | 376     | 372   | 370   | 364   |
| 490           | 90             | 86   | 84   | 82   | 376     | 372   | 370   | 364   |
| 500           | 90             | 86   | 84   | 82   | 376     | 372   | 370   | 366   |
| 510           | 90             | 86   | 84   | 82   | 376     | 372   | 370   | 366   |
| 520           | 90             | 86   | 84   | 82   | 376     | 372   | 370   | 366   |
| 530           | 90             | 86   | 84   | 82   | 376     | 372   | 370   | 366   |
| 540           | 90             | 86   | 84   | 82   | 376     | 372   | 370   | 368   |
| 550           | 90             | 86   | 84   | 82   | 376     | 372   | 370   | 368   |
| 560           | 90             | 86   | 84   | 82   | 376     | 372   | 370   | 368   |
| 570           | 90             | 86   | 84   | 82   | 376     | 372   | 370   | 368   |
| 580           | 90             | 86   | 84   | 82   | 376     | 372   | 370   | 368   |
| 590           | 90             | 86   | 84   | 82   | 376     | 372   | 370   | 368   |
| 600           | 90             | 86   | 84   | 82   | 376     | 372   | 370   | 368   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.5 สรุป

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองต่าง ๆ ตามขั้นตอนที่เสนอไว้ในบทที่ 4 และการวิเคราะห์ผล โดยเริ่มจากผลการศึกษาระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย ผลการวิเคราะห์ทางด้วยไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์ ผลการลดความยาวอาพันธ์ของแหล่งกำเนิดแสงด้วยเทคนิคการสแกรมเบิลโหมด ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรงและประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์ศึกษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นทางแสงของวัสดุโปร่งใส

ผลการศึกษาระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย จะพบว่าไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์ที่มีความสามารถในการวัดซ้ำดังรูปที่ 5.2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่วัดได้จากไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยมีความถูกต้องน่าเชื่อถือในระดับหนึ่ง

ผลการวิเคราะห์ทางด้วยไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์ ในงานวิจัยส่วนนี้ได้ประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์วัดความหนาของแผ่นแก้วสไลด์และวัสดุเปอร์สเปกซ์ จะพบว่าความหนาของแผ่นแก้วสไลด์และวัสดุเปอร์สเปกซ์ที่วัดโดยไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์มีค่าเท่ากับ 1 และ 10 มิลลิเมตรดังรูปที่ 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ ซึ่งตรงกับค่าที่วัดได้จากการใช้ไมโครมิเตอร์วัดโดยตรง

ผลการลดความยาวอาพันธ์ของแหล่งกำเนิดแสงด้วยเทคนิคการสแกรมเบิลโหมด จะพบว่าความกว้างของฐานกราฟรูปเกาส์เซียนคือช่วงที่แสงอาพันธ์เกิดการแทรกสอดกันทั้งหมดซึ่งก็คือความยาวอาพันธ์ของแสงนั่นเอง แต่เนื่องจากตลอดช่วงการสแกนของไมโครมิเตอร์ไม่สามารถหาตำแหน่งที่ค่าความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดมีค่าเป็นศูนย์ได้ จึงได้เลือกใช้ตำแหน่ง FWHM ของกราฟรูปเกาส์เซียนเป็นตำแหน่งอ้างอิงในการหาความยาวอาพันธ์ของแสงแทน เมื่ออาศัยเทคนิคการสแกรมเบิลด้วยใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ที่มีความยาว 1 - 5 เมตร เพื่อให้ความยาวอาพันธ์ของแสงก่อนเข้าสู่ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์สั้นลง จะพบว่าความยาวอาพันธ์ของแสง (ณ ตำแหน่ง FWHM) จะลดลงเรื่อยๆ ตามความยาวของใยแก้วนำแสงที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 5.8 และ 5.9 และในงานวิจัยได้เลือกใช้ความยาวอาพันธ์ของแสงเท่ากับ 10.5 มิลลิเมตรหรือใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ที่มีความยาว 1 เมตร

ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรงและประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์ศึกษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นทางแสงของวัสดุโปร่งใส จะพบว่าไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์สามารถทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรงได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดกับแรงที่กระทำกับวัสดุทดสอบเพื่อหาผลต่างทางเดินของแสงดังรูปที่ 5.11 และ 5.12 นอกจากนี้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้หาเวลาคลายตัวของวัสดุทดสอบได้ เนื่องจากการให้แรงกดกับวัสดุทดสอบจะทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ แต่เมื่อนำแรงกดนั้นออกวัสดุก็จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พยายามปรับตัวให้กลับคืนสู่สภาพเดิม เวลาที่วัสดุใช้ในการกลับคืนสู่สภาพเดิมเรียกว่าเวลาคลายตัว ผลการทดลองการหาเวลาคลายตัวของอะรัลโครท์และเปอร์สเปกซ์เมื่อใช้น้ำหนักคชขนาดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.13 และ 5.15 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า การให้น้ำหนักคชกับวัสดุทดสอบมากขึ้นจะทำให้เวลาคลายตัวของวัสดุมีค่ามากขึ้นด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัย

### 6.1 บทสรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัด โดยมีเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตรเป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยเนื้อหาที่ทำการศึกษาคือ

- 1) ศึกษาการวัดระยะทางด้วยไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร
- 2) ศึกษาการลดความยาวอาพันธ์ของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ด้วยเทคนิคการสแกมเบิ้ลโหมดโดยใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเตปอินเด็กซ์ที่มีความยาวต่างๆ
- 3) ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรง
- 4) ประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ศึกษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นทางแสงของอะรัลไครท์และเปอร์สเปกซ์โดยการให้แรงกดกับวัสดุ

#### 6.1.1 การศึกษาระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่สามารถใช้วัดระยะทางอย่างละเอียดได้โดยอาศัยหลักการแทรกสอดชนิดแบ่งแอมพลิจูดของแสงอาพันธ์จากแหล่งกำเนิดแสง การแทรกสอดชนิดแบ่งแอมพลิจูดจะแยกลำแสงจากแหล่งกำเนิดแสงออกเป็น 2 ส่วน แล้วให้แต่ละส่วนเดินทางไปเป็นระยะทางต่างกันซึ่งจะมีผลต่อผลต่างทางเดินของแสงทั้งสอง จากนั้นจะจัดให้แสงทั้งสองกลับมารวมกันและแทรกสอดกันเกิดเป็นริ้วของการแทรกสอด จากรี้วการแทรกสอดที่ได้สามารถนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างทางเดินของแสง (หรือความเข้มแสง) กับปริมาณต่างๆ ในระบบตรวจวัดได้

หลักการใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดคือ การทำให้ระยะห่างระหว่าง BS กับกระจกทั้งสอง (แขน) มีค่าเท่ากัน (ตำแหน่งสมดุล) ซึ่งจะทำให้ค่าความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดมีค่าสูงสุด แต่ถ้าทำให้ระยะห่างดังกล่าวไม่เท่ากัน โดยการใส่ปริมาณที่ต้องการตรวจวัด (Physical parameters) ลงไปในแขนข้างใดข้างหนึ่ง จะทำให้ระยะห่างระหว่างแขนทั้งสองไม่เท่ากัน (เกิด OPD) การเลื่อนกระจกที่ติดอยู่กับไมโครมิเตอร์เข้าหรือออกจะเป็นการปรับให้แขนทั้งสองกลับมาอยู่ในตำแหน่งสมดุลอีกหลัง (OPD เท่ากับศูนย์) การเลื่อนกระจกที่ติดอยู่กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครมิเตอร์จะทำให้ทราบระยะทางที่เปลี่ยนไปเนื่องจากปริมาณที่ต้องการวัดดังกล่าว ดังนั้นจะ  
 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างทางเดินของแสง (หรือความเข้มแสง) กับปริมาณที่ต้องการตรวจวัด  
 นั้น

ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4.2 จากรูปจะเห็นว่าไม  
 เคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มีการเพิ่มเติมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางส่วน ได้แก่  
 โฟโตดีเทคเตอร์ ออสซิลโลสโคป ลำโพงและฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะ  
 ช่วยให้การวัดโดยใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์มีประสิทธิภาพและถูกต้องมากขึ้น

จากผลการศึกษาระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย จะพบว่าไมเคลสันอิน  
 เทอโรมิเตอร์ที่ใช้มีความสามารถในการวัดซ้ำดังรูปที่ 5.2 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าข้อมูลที่วัดได้จาก  
 ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความถูกต้องน่าเชื่อถือในระดับหนึ่ง

### 6.1.2 การวัดระยะทางด้วยไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

งานวิจัยส่วนนี้เป็นการประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์วัดความหนาของแผ่น  
 แก้วสไลด์และวัสดุเปอร์สเปกซ์ ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดระยะทาง  
 แสดงดังรูปที่ 4.6

จากผลการทดลองการประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์วัดความหนาของแผ่น  
 แก้วสไลด์และวัสดุเปอร์สเปกซ์ จะพบว่าความหนาของแผ่นแก้วสไลด์และวัสดุเปอร์สเปกซ์ที่วัด  
 โดยไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์มีค่าเท่ากับ 1 และ 10 มิลลิเมตรดังรูปที่ 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ ซึ่ง  
 ตรงกับค่าที่วัดได้จากการใช้ไมโครมิเตอร์วัดโดยตรง แต่ข้อแตกต่างของทั้งสองวิธีคือ การวัดโดยใช้  
 ไมโครมิเตอร์เครื่องมือจะต้องสัมผัสกับวัสดุโดยตรง ซึ่งถ้าวัดไม่ถูกวิธีอาจทำให้วัสดุเกิดความเสี  
 หายได้ แต่การวัดโดยใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เครื่องมือไม่ต้องสัมผัสกับวัสดุโดยตรง ดัง  
 นั้นจึงไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับวัสดุ

### 6.1.3 การลดความยาวอาพันธ์ของแหล่งกำเนิดแสงด้วยเทคนิคการสแกรมเบิลโหมด

เนื่องจากระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์  
 สีเลียมนีออนที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงชนิดนี้ให้แสงที่มีความยาว  
 อาพันธ์ยาว ไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงในระบบตรวจวัดอย่างละเอียด ดังนั้นจึงอาศัย  
 เทคนิคการสแกรมเบิลโหมดโดยใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ เพื่อทำให้ความ  
 ยาวอาพันธ์ของแสงก่อนที่จะเข้าสู่ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์สั้นลง ระบบไมเคลสันอิน  
 เทอโรมิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาการลดความยาวอาพันธ์ของแหล่งกำเนิดแสงแสดงดังรูปที่ 4.7

เทคนิคการสแกรมเบิลโหมดจะเริ่มจากการจัดให้แสงจากแหล่งกำเนิดแสงผ่านเข้าไปในใย  
 แก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ที่มีความยาวค่าหนึ่ง จากคุณสมบัติของใยแก้วนำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลายโหมคพบว่า เมื่อแสงเดินทางในใยแก้วนำแสงหลายโหมคจะทำให้โหมคของแสงหรือเส้น  
ทางเดินของแสงมีจำนวนเพิ่มขึ้น โหมคของแสงที่เพิ่มขึ้นนี้จะเกิดการรบกวนกับโหมคข้างเคียงใน  
ระหว่างที่แสงเดินทางในใยแก้วนำแสง ทำให้คุณสมบัติความเป็นอาพันธ์ของแสงที่เดินทางออก  
จากปลายใยแก้วนำแสงมีค่าลดลง ดังนั้นถ้าใยแก้วนำแสงหลายโหมคมีความยาวเพิ่มขึ้น จะทำให้  
คุณสมบัติความเป็นอาพันธ์ของแสงลดลงเรื่อยๆ ตามความยาวของใยแก้วนำแสงที่เพิ่ม เมื่อหาความ  
ยาวที่เหมาะสมของใยแก้วนำแสงหลายโหมคจะได้แสงที่มีความยาวอาพันธ์เหมาะสมที่จะใช้เป็น  
แสงอินพุตให้กับไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์สำหรับงานด้านการตรวจวัดต่อไป

สำหรับความยาวอาพันธ์ที่เหมาะสมหาได้จากการพิจารณาขีดจำกัดและความละเอียดของ  
ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้ ซึ่งพบว่า  $L_c \geq 2(OPD_{min})$  รวมทั้งอัตราส่วนสัญญาณต่อ  
สัญญาณรบกวนของสัญญาณที่ทำการวัดและค่าความเข้มของแสงที่ออกจากปลายใยแก้วนำแสง

จากผลการทดลองการลดความยาวอาพันธ์ของแหล่งกำเนิดแสงด้วยเทคนิคการสแกนแบบ  
โหมค จะพบว่าความกว้างของกราฟรูปเกาส์เซียนคือช่วงที่แสงอาพันธ์เกิดการแทรกสอดกันทั้ง  
หมดซึ่งก็คือความยาวอาพันธ์ของแสงนั่นเอง แต่เนื่องจากตลอดช่วงการสแกนของไมโครมิเตอร์ไม่  
สามารถหาตำแหน่งที่ค่าความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดมีค่าเป็นศูนย์ได้ จึงได้เลือกใช้  
ตำแหน่ง FWHM ของกราฟรูปเกาส์เซียนเป็นตำแหน่งอ้างอิงในการหาความยาวอาพันธ์ของแสง  
แทน เมื่ออาศัยเทคนิคการสแกนแบบโหมคด้วยใยแก้วนำแสงหลายโหมคชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ที่  
ความยาว 1 - 5 เมตร เพื่อทำให้ความยาวอาพันธ์ของแสงก่อนเข้าสู่ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอ  
มิเตอร์สั้นลง จะพบว่าความยาวอาพันธ์ของแสง (ณ ตำแหน่ง FWHM) จะลดลงเรื่อยๆ ตามความ  
ยาวของใยแก้วนำแสงที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 5.8 และ 5.9 และในงานวิจัยได้เลือกใช้ความยาวอาพันธ์ของ  
แสงเท่ากับ 10.5 มิลลิเมตรหรือใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมคชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ที่ความยาว 1 เมตร

#### 6.1.4 การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เป็น

อุปกรณ์ตรวจวัดแรงและประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ศึกษาคุณสมบัติ  
ความยืดหยุ่นทางแสงของวัสดุโปร่งใส

ในงานวิจัยส่วนนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอ  
มิเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรง โดยเริ่มจากการศึกษาความเป็นไปได้ทางทฤษฎีก่อนแล้วจึงทำการ  
ทดลองเพื่อยืนยันความเป็นไปได้ดังกล่าว จากนั้นก็ประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ศึกษา  
คุณสมบัติความยืดหยุ่นทางแสงของอะรัล ไครท์และเปอร์สเปกซ์โดยการให้แรงกดกับวัสดุและ  
ประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์หาเวลาคลายตัวของวัสดุทั้งสอง

จากผลการทดลองการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอ  
มิเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรงและประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ศึกษาคุณสมบัติความ  
ยืดหยุ่นทางแสงของวัสดุโปร่งใส

จะพบว่าไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์สามารถทำหน้าที่เป็นการค้ำ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารทูลงงานวิชาสำหรับการใช้งานในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่สามารถนำ  
ไปว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ตรวจวัดแรงได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงที่ได้จากการแทรกสอดกับแรงที่กระทำกับวัสดุทดสอบเพื่อหาผลต่างทางเดินของแสง ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.11 และ 5.12 สำหรับน้ำหนักที่ใช้กดวัสดุอะคริลิกที่มีค่าเท่ากับ 10 – 100 กรัม โดยจะเพิ่มน้ำหนักที่ละ 10 กรัม ส่วนวัสดุเปอร์สเปกซ์มีค่าเท่ากับ 100 – 1000 กรัม โดยจะเพิ่มน้ำหนักที่ละ 100 กรัม การที่วัสดุทั้งสองใช้น้ำหนักกดต่างกันเนื่องจากอะคริลิกเป็นพลาสติกเนื้ออ่อน ถ้าใช้น้ำหนักกดขนาดเดียวกับวัสดุเปอร์สเปกซ์ อาจทำให้วัสดุอะคริลิกเกิดความเสียหายได้ ส่วนวัสดุเปอร์สเปกซ์เป็นพลาสติกเนื้อแข็งถ้าใช้น้ำหนักกดขนาดเดียวกับวัสดุอะคริลิก จะทำให้สังเกตผลของการเปลี่ยนแปลงได้ยาก

นอกจากนี้ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้หาเวลาคลายตัวของวัสดุทดสอบได้ เนื่องจากการให้แรงกดกับวัสดุทดสอบจะทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ แต่เมื่อนำแรงกดนั้นออกวัสดุก็จะพยายามปรับตัวให้กลับคืนสู่สภาพเดิม เวลาที่วัสดุใช้ในการกลับคืนสู่สภาพเดิมเรียกว่าเวลาคลายตัว ผลการทดลองการหาเวลาคลายตัวของอะคริลิกและเปอร์สเปกซ์เมื่อใช้น้ำหนักกดขนาดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.13 และ 5.15 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า การให้น้ำหนักกดกับวัสดุทดสอบมากขึ้นจะทำให้เวลาคลายตัวของวัสดุมีค่ามากขึ้นด้วย

## 6.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น

ปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างดำเนินงานวิจัย ได้แก่

- 1) การติดตั้ง (Alignment) ระบบไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำได้ยากมาก เนื่องจากจะต้องจัดให้แสงที่จะมาแทรกสอดกันอยู่ในแนวเดียวกัน 100% จึงจะทำให้เกิดการแทรกสอดที่สมบูรณ์ นอกจากนี้การสแกนด้วยไมโครมิเตอร์จะต้องอยู่ในแนวขนานกับลำแสงเสมอ เพราะถ้าแนวการสแกนไม่อยู่ในแนวขนานกับลำแสงเมื่อทำการสแกนจะทำให้แสงสะท้อนเกิดเฉียงไปจากแนวเดิม การแทรกสอดที่เกิดขึ้นจะไม่สมบูรณ์หรือไม่เกิดการแทรกสอดเลย
- 2) เนื่องจากระบบไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยมีความไวต่อการถูกรบกวนค่อนข้างสูง ทำให้การวัดสัญญาณทำได้ลำบากและเกิดความผิดพลาดได้ง่าย การรบกวนที่พบบ่อยในขณะดำเนินงานวิจัยเช่น การรบกวนจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การรบกวนจากแสงภายนอกและการรบกวนจากการสั่นสะเทือน (Vibration) ที่เกิดจากสิ่งแวดล้อม ทำให้ต้องเสียเวลาในการทำการทดลองซ้ำหลายๆ ครั้งและข้อมูลที่ได้อาจเกิดความผิดพลาดได้ง่าย
- 3) ในการทดลองการลดความยาวอาพันธ์ของแสงจากแหล่งกำเนิดด้วยเทคนิคการสแกรมนิวตัน จะพบว่าเกิดของจำกัดในการใช้ความยาวของใยแก้วนำแสง เนื่องจากความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่ใช้มีค่าน้อย (กำลังแสงเท่ากับ 1 มิลลิวัตต์) ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ผู้จัดทำมีลิขสิทธิ์ในเอกสารนี้ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาตจากเจ้าของเอกสารถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อใช้ใยแก้วนำแสงที่ความยาวมากๆ ความเข้มแสงที่ออกจากปลายใยแก้วนำแสงจะมีค่าน้อย ซึ่งยากต่อการวัดและสัญญาณถูกรบกวนได้ง่าย ดังนั้นการใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมดเพื่อลดความยาวอาพันธ์ของแสงจึงทำได้เพียงระดับหนึ่ง

- 4) อุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ในห้องปฏิบัติการมีจำนวนจำกัดและอุปกรณ์บางชิ้นเกิดการชำรุดเสียหายไม่สามารถนำมาใช้งานได้ ดังนั้นจึงต้องใช้อุปกรณ์อื่นที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันมาใช้ทดแทนซึ่งถือว่าเป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งในการดำเนินงานวิจัย

### 6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการดำเนินงานวิจัยต่อ

- 1) การติดตั้งระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ควรกระทำด้วยความละเอียดและตั้งใจเพราะกระทำได้ยากมาก หลังจากติดตั้งเรียบร้อยแล้วควรมีการตรวจสอบแนวของลำแสงและการเกิดการแทรกสอดว่ามีความสมบูรณ์ 100 % หรือไม่
- 2) ควรมีการตรวจสอบแนวการสแกนของไมโครมิเตอร์ว่าอยู่ในแนวขนานกับลำแสงตลอดการสแกนหรือไม่ เพราะส่วนนี้เป็นส่วนที่สำคัญมากและทำให้เกิดความผิดพลาดกับข้อมูลได้ง่าย
- 3) เทคนิคการติดตั้งระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ผู้ทำวิจัยได้พบขณะดำเนินงานวิจัยคือ การนำพินโฮล (Pin hole) มาช่วยในการติดตั้งโดยนำมาช่วยในการตรวจสอบแนวของลำแสงทั้งสองเส้นทางว่าอยู่ในแนวและระนาบเดียวกันหรือไม่ ซึ่งจะทำให้การติดตั้งอุปกรณ์กระทำได้ง่ายขึ้น
- 4) การนำการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ (Computer interfacing) มาช่วยในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลการทดลอง จะช่วยให้การดำเนินงานวิจัยทำได้สะดวกรวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

สำหรับแนวทางในการดำเนินงานวิจัยต่อ จะเห็นว่าในส่วนของการศึกษาการลดความยาวอาพันธ์ของแสงด้วยเทคนิคการสแกนเบิลโหมดโดยใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมด ถือเป็นแนวความคิดใหม่ที่ควรจะมีการศึกษาวิจัยต่อ เพราะการที่สามารถเปลี่ยนแปลงความยาวอาพันธ์ของแสงได้นั้น จะทำให้แสงดังกล่าวสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขึ้นเช่น ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ในการปรับเปลี่ยนความละเอียดในการวัดของไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เพื่อให้เหมาะกับงานที่นำไปใช้นอกจากการใช้ใยแก้วหลายโหมดชนิดสเตปอินเด็กซ์เพื่อลดความยาวอาพันธ์ของแสงแล้ว ควรจะมีการศึกษาการลดความยาวอาพันธ์ของแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดเกรดอินเด็กซ์และใยแก้วนำแสงชนิดอื่นๆ เพื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการลดความยาวอาพันธ์ของแสงและการนำไปใช้งาน นอกจากนี้ควรมีการศึกษาเทคนิคการสแกนเบิลโหมดในเชิงทฤษฎี เพื่อเป็นการยืนยันว่าเทคนิคดังกล่าวสามารถนำไปใช้งานได้จริง สำหรับการประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักศึกษาได้ใช้เอกสารนี้แล้ว กรุณาอย่าลืมที่จะคืนเอกสารนี้ให้กับอาจารย์ผู้สอนทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ เช่น ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรง (Force sensor) อุปกรณ์ตรวจวัดความดัน (Pressure sensor) และอุปกรณ์ตรวจวัดความร้อน (Thermal sensor) ควรมีการสนับสนุนให้มีการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่อง เพราะไมโครคอนโทรลเลอร์ที่รอมิเตอร์ถือว่าเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการวัดค่อนข้างสูง มีหลักการทำงานที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานได้หลายประเภท มีราคาถูกเมื่อเทียบกับเครื่องมือวัดประเภทเดียวกันและให้ผลการวัดที่ไม่แตกต่างกันมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Wang, D. N., Ning, Y. N., Palmer, W., Grattan, K. T. V. and Weir, K. "An Alternative to White Light Interferometric Sensing." *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, 1995. pp. 961-966.
- [2] Yupapin, P. V. P. and Kusamran, S. "Photoelastic Material Characteristic Based on the Stress-Induced Effects for Sensor Applications." *Smart Mater. Struct.*, vol. 2, 1993, pp. 157-161.
- [3] Yupapin, P. V. P., Weir, K., Grattan, K. T. V. and Palmer, A. W. "An Optical Pressure Sensor Using a Low-Coherence Light Source with a Photoelastic Sensing Element." *Sensors and Actuators A*, vol. 36, 1993, pp. 105-111.
- [4] Cloud, G. L. **Optical Methods of Engineering Analysis**. USA : Cambridge University Press. 1995.
- [5] Hariharan, H. **Basic of Interferometry**. San Diego : Academic Press, Inc. 1991.
- [6] Pedrotti, F. L. and Pedrotti, L. S. **Introduction to Optics**. 2nd ed. New Jersey : Prentice-Hall. 1993.
- [7] Pollock, C. R. **Fundamentals of Optoelectronics**. USA : IRWIN. 1995.
- [8] Senior, J. M. **Optical Fiber Communications Principles and Practice**. 2nd ed. UK : Prentice Hall. 1992.
- [9] Wilson, J. and Hawkes, J. F. B. **Laser Principles and Applications**. Great Britain : Prentice Hall. 1987.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

## รายละเอียดเพิ่มเติมของอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. เลเซอร์ฮีเลียมนีออน

การเลือกแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือความเข้มของแสง กำลังความยาวคลื่นแสง รวมถึงเสถียรภาพในการใช้งาน สำหรับเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

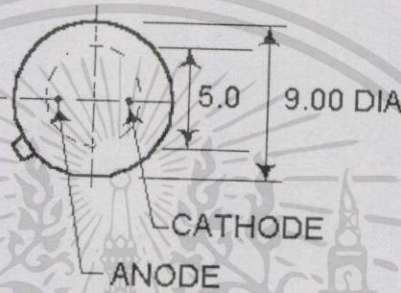
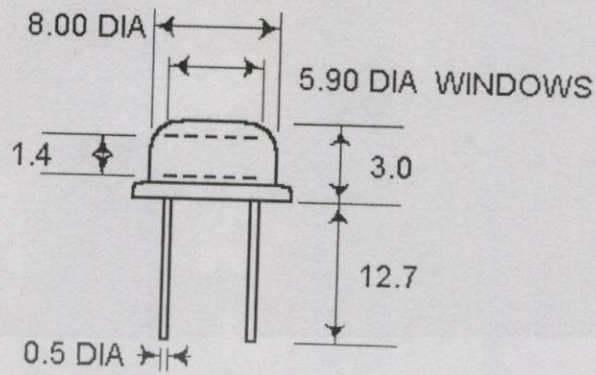
|                         |   |                  |
|-------------------------|---|------------------|
| Laser type              | : | Helium Neon      |
| Class laser             | : | II               |
| Minimum output          | : | 0.5 mV           |
| Wavelength              | : | 632.8 nm         |
| Beam diameter           | : | 0.48 mm          |
| Beam divergence         | : | 1.70 mrad        |
| Beam pointing stability | : | < 0.1 mrad (25°) |
| Polarization            | : | Linear (500:1)   |
| Operating Current       | : | 82 mA            |

## 2. อุปกรณ์รับแสงฟิโตไดโอด

การเลือกใช้ฟิโตไดโอดสำหรับงานวิจัยนี้ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือช่วงความยาวคลื่นที่ตอบสนองซึ่งต้องความสัมพันธ์กับแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ สำหรับฟิโตไดโอดที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ BPW 21 ฟิโตไดโอด ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

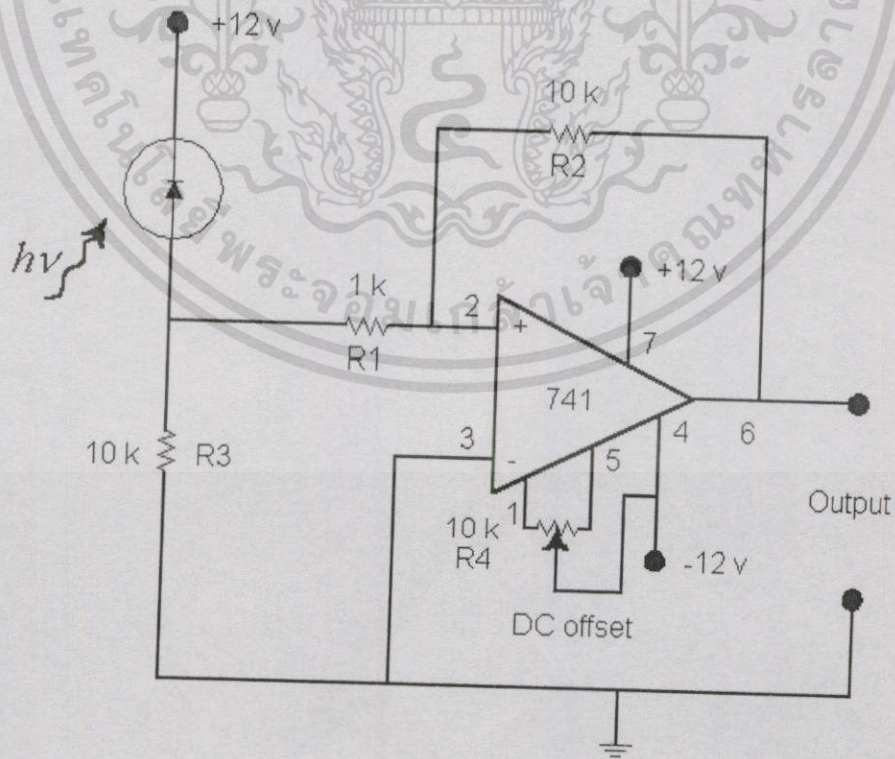
|  |   |               |
|--|---|---------------|
| Peak spectral response                   | : | 560 nm        |
| Wavelength range                         | : | 460-750 nm    |
| Power dissipation                        | : | 250 mW (max.) |
| Sensitivity (Short circuit)              | : | 7 nA / 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 $\mu$ sec |
| Junction capacitance ( $V_R = 5$ V)      | : | 170 p Farad   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแสดงลักษณะของ BPW 21 ฟินโฟโตไดโอด

3. วงจรอิเล็กทรอนิกส์ของอุปกรณ์รับแสง (Photodetector circuit)



รูปแสดงวงจรของอุปกรณ์รับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นายภูเบศร์ พิพิธหิรัญการ เกิดที่จังหวัดอุดรธานี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 2) สาขาฟิสิกส์ ที่มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ วิทยาเขตประสานมิตร ในปี พ.ศ. 2540 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้