

โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองเหตุการณ์ ในการวัดค่า
ความยาวคลื่นจากแบรกกเรตติ้งซีเอ็นเซอร์



นายกฤษดา เกตุภู่งษ์
นางสาวจิตตกานต์ ไชยปัญญา



T031646

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์

ปก.
1/22/41
8E-0

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2540

เลขที่.....
เลขทะเบียน..... 31646

ม, เดือน, ปี 19 พ.ค. 2541

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Computer Simulation Of Bragg's Grating Sensor With Fabry-Perot Detection

Mr.Krisada Ketpupong
MissJittakant Chaipanya

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
DEPARTMENT OF APPLIED PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

1997

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวัดการเปลี่ยนแปลง
ของความยาวคลื่นจากแบรกกเรตติ้งเซ็นเซอร์
โดย นายกฤษดา เกตุภู่งษ์
นางสาวจิตตกานต์ ไชยปัญญา
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์วิชาญ เตชิตธีระ
อาจารย์ธีรวัฒน์ ประกอบผล
ผศ.ดร. ปรีชา ยุพาพิน

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง อนุมัติให้นับโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลัก
สูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต



(รองศาสตราจารย์สุพล รัทวิชัย)

หัวหน้าภาควิชา



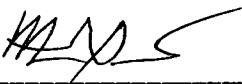
(อาจารย์วิชาญ เตชิตธีระ)

ประธานกรรมการ



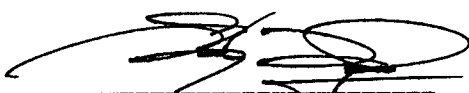
(อาจารย์ธีรวัฒน์ ประกอบผล)

กรรมการ



(ผู้ช่วยค.เสตราจารย์ ดร.ปรีชา ยุพาพิน)

กรรมการ



(อาจารย์วิษณุ เพชรภา)

กรรมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวัดการเปลี่ยนแปลงของ ความยาวคลื่นจากแบรกกเรตติงเซ็นเซอร์	
นักศึกษา	นายกฤษดา	เกตุภู่พงษ์
	นางสาวจิตตกานต์	ไชยปัญญา
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์วิชาญ	เดชิตธีระ
	อาจารย์ธีรวัฒน์	ประกอบผล
	ผศ.ดร. ปรีชา	ยุพาพิน
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์	
ปีการศึกษา	2540	

บทคัดย่อ

ได้สร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับจำลองเหตุการณ์อย่างง่าย ในการวัดค่าความยาวคลื่นจากแสงที่สะท้อนกลับจากเซ็นเซอร์แบบแบรกกเรตติง โดยสมมุติว่ามีฟังก์ชันความคลาดเคลื่อนแบบเกาส์ และมีอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแฟบริ-เพอโรต์เป็นเครื่องมือในการวัดค่าความยาวคลื่นดังกล่าว และได้สมมุติว่าอุณหภูมิเป็นตัวแปรที่ทำให้ความยาวคลื่นกลางที่สะท้อนจากแบรกกเรตติงเปลี่ยนแปลงไป โปรแกรมมีลักษณะสำคัญคือเมื่อใส่ค่าอุณหภูมิเริ่มต้น ค่าความยาวคลื่นกลางที่สมมุติจะถูกสมมุติขึ้นโดยอัตโนมัติ โปรแกรมจะสามารถแสดงค่าอุณหภูมิสุดท้ายเมื่อทราบค่าความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไป และในทางกลับกันถ้ากำหนดอุณหภูมิสุดท้ายให้ก็จะสามารถทราบค่าความยาวคลื่นกลางที่เปลี่ยนแปลงไปเช่นเดียวกัน

Special Project Title **Computer Simulation Of Bragg's
Grating Sensor With Fabry-Perot
Detection**

Name **Mr.Krisada Ketpupong
Miss.Jittakant Chaipanya**

Special Project Advisors **Mr.Wicharn Techitdheera
Mr.Teerawat Prakobpon
Asst.Prof.Dr.Preecha Yupapin**

Department **Applied Physics**

Academic Year **1997**

ABSTRACT

The computer program for the simulation of Bragg Grating Sensor with Fabry-Perot detection is developed by pure mathematical model. By assuming that the output wavelengths from Fabry-Perot interferometer are varied with an important parameter; temperature. Putting the initial temperature value leads to the assumed value of the correspond wavelength. If any amount of change of central wavelength known then final temperature presented. On the other hand, if the final temperature knowm it can show the shift of the central wavelength.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้ข้าพเจ้ามีความภูมิใจเป็นอย่างมากเนื่องจากข้าพเจ้าทุ่มเทให้กับการเขียนโปรแกรมและทำงานอย่างตั้งใจจริงเพื่อให้ได้ผลงานออกมาดี แต่ถ้าขาดบุคคลเหล่านี้ ที่คอยให้คำแนะนำ ข้อมูลและให้กำลังใจช่วยเหลือข้าพเจ้ามาโดยตลอดก็จะมีโครงการฉบับนี้ ซึ่งบุคคลเหล่านี้คือ

บิดา มารดา

บุคคลผู้ให้กำเนิดข้าพเจ้าให้มีอาการครบ 32 ประการ และส่งเสียทุนทรัพย์ให้ข้าพเจ้าได้รับการศึกษาจนมีความรู้พอเพียงที่จะทำโครงการพิเศษฉบับนี้

อาจารย์วิชาญ เศษิตธีระ, อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษฉบับนี้ที่คอยให้คำแนะนำช่วย

อาจารย์ธีรวัฒน์ ประกอบผล เหลือในด้านข้อมูลต่างๆ และให้ข้อชี้แนะในด้านการเขียน และ

ผศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน โปรแกรม

อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ได้ให้ความรู้ต่างๆซึ่งสามารถนำมาใช้ในการทำโครงการพิเศษฉบับนี้ได้

เพื่อนๆในภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ให้ความช่วยเหลือไม่ว่าจะเป็นในด้านการให้ยืมหนังสือข้อมูลให้ยืมเครื่องคอมพิวเตอร์ในการทำโครงการพิเศษฉบับนี้และให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าในยามที่ท้อแท้

สุดท้ายข้าพเจ้าขออุทิศความดีทั้งหมดที่ทุกๆท่านให้การช่วยเหลือข้าพเจ้าในการทำโครงการพิเศษฉบับนี้จงคลบบันดาลให้ทุกท่านประสบแต่ความสุขความเจริญ

นายกฤษดา เกตุภู่งษ์

นางสาวจิตตกานต์ ไชยปัญญา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการทำโครงการพิเศษ.....	2
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของแสง.....	4
2.2 แหล่งกำเนิดแสง (Light Sources).....	12
2.3 เส้นใยนำแสง (Optical Fiber).....	18
2.4 เซนเซอร์แบบแบรกกเรตติง (Bragg Grating Sensor).....	24
2.5 ฟังก์ชันความคลาดเคลื่อน (Error Function).....	27
2.6 อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ :	
การวัดค่าความยาวคลื่นและการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่น.....	28
2.6.1 อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิด ไมเคลสัน.....	29
2.6.2 การแทรกสอดจากลำแสงหลายลำในแผ่นคู่ขนาน.....	31
2.7 หลักการทำงาน.....	41

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

3.1 โปรแกรมจำลองปรากฏการณ์ของเซ็นเซอร์แบบแบรกกเรตติง (Bragg Grating Sensor).....	44
3.1.1 อุปกรณ์พัฒนาโปรแกรม.....	45
3.1.2 แบรกกเซ็นเซอร์.....	45
3.1.3 อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ (Interferometer).....	46
3.2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม.....	46
3.2.1 ค่าความยาวคลื่นที่สะท้อนกลับ.....	46
3.2.2 การหาวิธีรอยการแทรกสอดที่เกิดจากแฟบริ- เพอโรต์.....	48
3.2.3 ส่วนการแสดงผลด้วยกราฟ.....	49
3.2.4 การแสดงผลในทางตัวอักษร.....	53

บทที่ 4 สรุปผลการทำงาน

4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อระบบ.....	54
4.2 ฟังก์ชันของโปรแกรมที่สร้างขึ้น.....	58
4.3 แนวทางการพัฒนา.....	64
4.4 ตัวอย่างของผลที่ได้จากโปรแกรม.....	65
เอกสารอ้างอิง.....	68
ประวัติผู้เขียน.....	69

สารบัญญภาพ

หน้า

บทที่ 1 บทนำ

รูปที่ 1.1 ระบบการวัดอุณหภูมิโดยใช้เซ็นเซอร์แบบแบรกกเรตติง.....	1
---	---

บทที่ 2 ทฤษฎี

รูปที่ 2.1 สะท้อนของแสงจากผิวกระจก.....	5
รูปที่ 2.2 การหักเหของแสง.....	5
รูปที่ 2.3 ใช้หลักของฮอยเกนส์อธิบายการสะท้อนของคลื่น.....	6
รูปที่ 2.4 การหักเหของคลื่นอธิบายตามหลักของ ฮอยเกนส์.....	6
รูปที่ 2.5 แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	9
รูปที่ 2.6 แสดงกฎการสะท้อนกลับของแสง.....	10
รูปที่ 2.7 แสดงกฎการสะท้อนกลับของแสง.....	11
รูปที่ 2.8 แสดงการเดินทางของแสงภายในแกนของเส้นใยแสง.....	12
รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างและระดับพลังงานของอะตอม.....	13
รูปที่ 2.10 แสดงระดับพลังงานและขั้นตอนของการถ่ายเท (Transfer).....	14
รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างการจัดอิเล็กตรอนและนิวเคลียสในสารกึ่งตัวนำ.....	15
รูปที่ 2.12 แสดงระดับพลังงานในสารกึ่งตัวนำ.....	15
รูปที่ 2.13 แสดงหลักการของการขยายกลับไปมาของแสง.....	16
รูปที่ 2.14 แสดงความยาวคลื่นต่างๆของเลเซอร์.....	17
รูปที่ 2.15 แสดงช่วงความยาวคลื่นแสงของ LED.....	17
รูปที่ 2.16 แสดงการเชื่อมแสงระหว่างอุปกรณ์ปล่อยแสงกับเส้นใยแสง.....	18
รูปที่ 2.17 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยแสง.....	20
รูปที่ 2.18 เกรตติงที่เกิดจากการแทรกสอดของแสงอุลตราไวโอเล็ต 2 ลำ.....	25
รูปที่ 2.19 เกรตติงที่เกิดจากการยิงแสงเลเซอร์กระทบ Phase Mark.....	26
รูปที่ 2.20 แสดงโครงสร้างภายในเส้นใยแก้วของเซ็นเซอร์แบบแบรกกเรตติง.....	26
รูปที่ 2.21 แสดงกราฟของฟังก์ชันความคลาดเคลื่อน.....	28
รูปที่ 2.22 แสดงหลักการของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดไมเคลสัน.....	29
รูปที่ 2.23 แสดงการสะท้อนและการหักเหของแสง.....	31

รูปที่ 2.24	แสดงการสะท้อนและหักเหหลายครั้งในตัวกลางที่มีผิวขนานกัน.....	33
รูปที่ 2.25	แสดงแผนภาพของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแฟบริ-เพอโรต์.....	34
รูปที่ 2.26	กราฟของแอมพลิจูดจากลำแสงหลายลำในแผ่นคู่ขนาน.....	38
รูปที่ 2.27	แสดงการเปรียบเทียบ Fringe Profile ของความยาวคลื่น 2 ค่า.....	40
รูปที่ 2.28	ระบบการวัดอนุกรมมิโดยใช้เซ็นเซอร์แบบแบร็กเกรตติง.....	41

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

รูปที่ 3.1	ระบบการหาค่าความยาวคลื่น.....	44
รูปที่ 3.2	แสดงแผนภาพของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแฟบริ-เพอโรต์.....	46
รูปที่ 3.3	แสดงแผนภาพการสะท้อนกลับและการทะลุผ่าน.....	47
รูปที่ 3.4	แสดงกราฟปกติ.....	52
รูปที่ 3.5	แสดงกราฟฟังก์ชันแสดง.....	52
รูปที่ 3.6	แสดงกราฟฟังก์ชันขยาย.....	53
รูปที่ 3.7	การแสดงผลในทางตัวอักษร.....	53

บทที่ 4 สรุปผลการทำงาน

รูปที่ 4.1	กราฟจำลองเหตุการณ์ที่ค่า $R = 0.8$	55
รูปที่ 4.2	กราฟจำลองเหตุการณ์ที่ค่า $R = 0.9$	55
รูปที่ 4.3	กราฟจำลองเหตุการณ์ที่ค่า $R = 0.99$	56
รูปที่ 4.4	กราฟจำลองเหตุการณ์ที่ค่าความยาวคลื่นต่างๆ ของรั้วที่ 100.....	57
รูปที่ 4.5	รูปแสดงหัวข้อที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์ (Tools for Simulation).....	58
รูปที่ 4.6	รูปแสดงเมื่อทำการเลือกใช้ค่าความยาวคลื่นในการจำลองเหตุการณ์.....	59
รูปที่ 4.7	รูปแสดงเมื่อทำการเลือกใช้ค่าอนุกรมมิในการจำลองเหตุการณ์.....	59
รูปที่ 4.8	แสดงฟังก์ชัน ShowGraph.....	60
รูปที่ 4.9	กราฟแสดงลักษณะของกราฟเมื่อทำการเลือกปุ่ม Show Graph.....	60
รูปที่ 4.10	แสดงฟังก์ชัน Analysis เมื่อทำการเลือกปุ่ม Analysis จากรูปที่ 1.....	61
รูปที่ 4.11	กราฟแสดงลักษณะของกราฟเมื่อเลือกปุ่ม Analysis แล้วเลือกปุ่ม Show.....	62
รูปที่ 4.12	แสดงฟังก์ชัน Custom Zoom.....	62
รูปที่ 4.13	กราฟแสดงลักษณะของกราฟเมื่อเลือกปุ่ม Custom Zoom แล้วเลือกปุ่ม Show.....	63
รูปที่ 4.14	แสดงลักษณะของตารางเมื่อทำการเลือกปุ่ม Table.....	63
รูปที่ 4.15	แสดงลักษณะเมื่อทำการเลือกสัญลักษณ์เครื่องมือ.....	64

รูปที่ 4.16 กราฟปกติที่ค่าความยาวคลื่นเปลี่ยนไป 1 นาโนเมตร.....	65
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงผลลัพธ์ (Result) ที่ค่าความยาวคลื่นเปลี่ยนไป 1 นาโนเมตร.....	66
รูปที่ 4.18 กราฟ Auto Find ที่ค่าความยาวคลื่นเปลี่ยนไป 1 นาโนเมตร.....	66
รูปที่ 4.19 กราฟปกติที่ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนไป 100 องศาเซลเซียส.....	67
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงผลลัพธ์ (Result) ที่ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนไป 100 องศาเซลเซียส.....	67
รูปที่ 4.21 กราฟ Auto Find ที่ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนไป 100 องศาเซลเซียส.....	68



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2.1 การแบ่งชนิดของเส้นใยแสง.....	19
ตาราง 3.1 แสดงคุณสมบัติของแบรคเซ็นเซอร์ของบริษัท JDS FITEL.....	42
ตาราง 4.1 แสดงค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับค่าความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลง.....	54



บทที่ 1

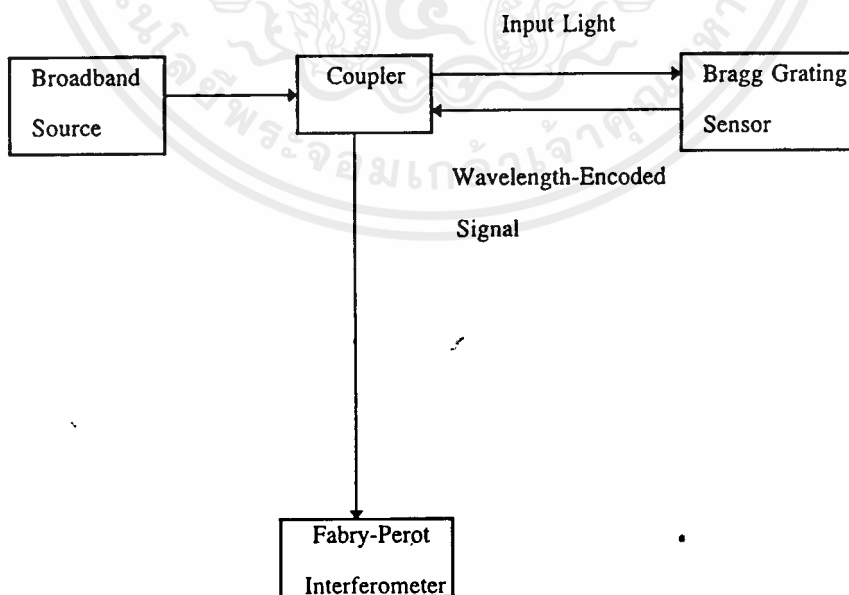
บทนำ

1.1 ที่มาของปัญหา

เซ็นเซอร์แบบแบรคเกรตติงมีข้อแตกต่างจากวิธีอื่นคือสามารถวัดกับสิ่งที่อยู่ไกลมากได้ และสามารถใส่เข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างที่จะทำการวัดได้ สาเหตุที่ใช้เซ็นเซอร์ชนิดนี้เนื่องจากเซ็นเซอร์ชนิดอื่นไม่สะดวกและไม่มีความเหมาะสม แต่เซ็นเซอร์แบบแบรคเกรตติงมีความสะดวกและเหมาะสมเนื่องจากไม่ต้องสร้างอุปกรณ์แปลงสัญญาณให้เข้าไปในเส้นใยนำแสง

เซ็นเซอร์แบบแบรคเกรตติงเป็นเซ็นเซอร์ชนิดใหม่ที่เพิ่งประดิษฐ์ขึ้น ซึ่งเป็นที่สนใจและกำลังมีการพยายามนำไปให้เกิดประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น การใช้แบรคเซ็นเซอร์ทำหน้าที่วัดความเค้นหรือแรงบิดของสะพาน หรือการใช้แบรคเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ ซึ่งการประยุกต์ใช้แบรคเซ็นเซอร์กำลังมีการพัฒนาขึ้นในต่างประเทศ เช่นเดียวกันกับในโครงการพิเศษชิ้นนี้

ระบบการวัดอุณหภูมิโดยใช้เซ็นเซอร์แบบแบรคเกรตติงเป็นที่ทราบกันแล้วว่าเซ็นเซอร์แบบแบรคเกรตติงทำงานโดยการสะท้อนค่าของความยาวคลื่นค่าต่างๆออกมาโดยขึ้นกับตัวแปรที่เราสนใจ (ในที่นี้คืออุณหภูมิ) ซึ่งการทำงานดังกล่าวสามารถอธิบายได้เป็นระบบดังนี้



รูปที่ 1.1 ระบบการวัดอุณหภูมิโดยใช้เซ็นเซอร์แบบแบรคเกรตติงที่ใช้เป็นแบบต้นแบบในโครงการพิเศษนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของระบบนี้คือเมื่อแหล่งกำเนิดแสงหลายความยาวคลื่นให้แสงผ่านเส้นใยนำแสงไปยังบริเวณแบริกเกรตติงเซ็นเซอร์ ณ อุณหภูมิหนึ่งระยะห่างของเกรตติงบนเส้นใยนำแสงจะมีค่าหนึ่งซึ่งจะทำให้ค่าความยาวคลื่นของแสงที่สะท้อนกลับมามีค่าหนึ่งแต่เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปซึ่งเกิดจากการที่เราเอาเซ็นเซอร์ตัวนี้ไปใช้วัดอุณหภูมิจะทำให้ค่าความยาวคลื่นที่สะท้อนกลับมามีค่าเปลี่ยนไปเนื่องจากระยะห่างของเกรตติงเปลี่ยนแปลงไปเพราะเส้นใยนำแสงมีการหด-ขยายตัวเมื่อมีอุณหภูมิเปลี่ยนไปซึ่งค่าความยาวคลื่นที่สะท้อนกลับมาแล้วมีค่าเปลี่ยนไปนี้เราสามารถวัดได้ด้วยเครื่องมือที่เรียกว่าอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแฟบริ-เพอโรต์นั่นเอง

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำโครงการพิเศษ

- ศึกษากระบวนการวัดอุณหภูมิโดยการใช้แบริกเซ็นเซอร์
- ศึกษาการวัดความยาวคลื่นโดยใช้อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแฟบริ-เพอโรต์
- เขียนโปรแกรมจำลองเหตุการณ์ในการวัดอุณหภูมิของระบบวัดอุณหภูมิโดยแบริกเซ็นเซอร์

1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

การสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองเหตุการณ์ของระบบตรวจวัดอุณหภูมิ โดยมีแบริกเกรตติงเป็นเซ็นเซอร์ โดยระบบที่ใช้เป็นต้นแบบจะเหมือนดังรูปที่ 1.1 โปรแกรมดังกล่าวจะต้องมีคุณสมบัติในการสามารถแสดงค่าความยาวคลื่นกลาง (Central Wavelength) ของแสงที่สะท้อนจากแบริกเกรตติงเซ็นเซอร์อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างระนาบของแบริก (Bragg's Plane) โดยผลที่ได้จะออกมาในรูปของโปรแกรมสำเร็จรูปที่สามารถนำมาปรับเปลี่ยนค่าต่างๆของอุปกรณ์ได้ง่าย

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาการวัดความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไปโดยใช้อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแฟบริ-เพอโรต์ และศึกษาลักษณะการวัดในทางทฤษฎี
2. ศึกษาการสะท้อนกลับของแสงภายในเส้นใยแก้วนำแสงโดยแบริกเซ็นเซอร์
3. ศึกษาสมการคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับระบบในอุปกรณ์ต่างๆ เช่น แฟบริ-เพอโรต์ หรือแบริกเซ็นเซอร์
4. ศึกษาการเขียนโปรแกรมวิซวลเบสิกเวอร์ชัน 4.0
5. พัฒนาโปรแกรมจำลองเหตุการณ์ในระบบวัดอุณหภูมิที่ใช้แบริกเซ็นเซอร์

เอกสารนี้พัฒนาโปรแกรมโดยคำนึงถึงค่าในความเป็นจริงของระบบในส่วนต่างๆนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาได้โดยคำนึงถึงผลในทางทฤษฎีมาเปรียบเทียบ
8. เมื่อได้ข้อบกพร่อง ทำการแก้ไขจุดบกพร่องต่างๆ โดยทำในข้อ 6 และ 7 ซ้ำ
9. ปรับปรุงรูปแบบของโปรแกรมให้มีความสะดวกในการใช้งานและทันสมัย
10. สรุปผล

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

เซ็นเซอร์แบบแบรคเกรดติงเป็นระบบการตรวจวัดความเครียดหรืออุณหภูมิที่อาศัยหลักการทางแสงและเส้นใยแก้วนำแสงเข้าช่วยดั่งที่ได้กล่าวถึงมาแล้ว

การจำลองเหตุการณ์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในระบบดังกล่าวย่อมมีประโยชน์มากในการทำนาย สิ่งที่จะเกิดขึ้นหรือผลที่จะได้ ถ้าหากเกิดกรณีทีผลที่ได้แตกต่างที่ทำนายไว้มาก ก็จะได้หาสาเหตุต่อไปว่าเกิดจากเหตุอะไร



บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของแสง

แสงมีสมบัติที่เป็นทั้งคลื่นและอนุภาค ซึ่งสมบัติทางคลื่นสามารถใช้พิจารณาได้จากปรากฏการณ์การแทรกสอด การเลี้ยวเบน สำหรับสมบัติทางอนุภาคสามารถใช้พิจารณาในเรื่องที่แสงมีอันตรกิริยากับสสาร เช่น ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีปริมาณ 2 ปริมาณที่มีบทบาทสำคัญคือความยาวคลื่นและความเข้ม การจัดแบ่งชนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามค่าความยาวคลื่นจะได้สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนความเข้มจะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงกำลังงานที่ตกกระทบต่อหน่วยพื้นที่ การเปลี่ยนแปลงของทั้ง 2 ปริมาณนี้มีความสัมพันธ์อย่างมากกับแหล่งกำเนิด (Source) และตัวตรวจวัด (Detector) ของคลื่น

คุณสมบัติต่างๆของคลื่น

ในการที่จะเข้าใจการเดินทางของแสงภายในเส้นใยแสงได้นั้น นอกจากปรากฏการณ์การสะท้อนกลับหมดของแสงที่กล่าวมาแล้วยังจำเป็นต้องมีความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับปรากฏการณ์ของการเคลื่อนที่ของคลื่นอีกด้วย ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของคลื่น ด้วยเหตุที่ว่าแสงก็เป็นคลื่นอย่างหนึ่งเหมือนกัน

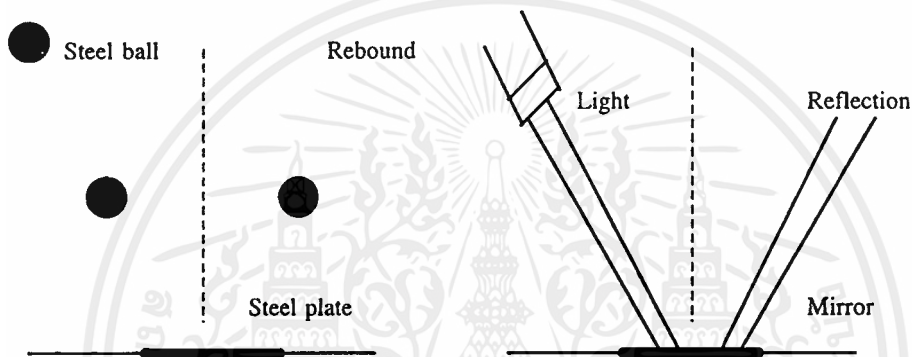
สมบัติของคลื่นสรุปได้ดังนี้

1. การกระจายเป็นเส้นตรง เมื่อเคลื่อนที่ไปในตัวกลางเนื้อเดียวกัน
2. การสะท้อนที่ผิวหรือรอยต่อของตัวกลาง
3. การหักเห เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว
4. การแทรกสอด เมื่อสองคลื่นเคลื่อนที่ปะปนกัน
5. การเลี้ยวเบนหรือเบนไปรอบๆขอบหรือมุม เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านขอบของวัตถุที่กีดขวาง

มีทฤษฎีที่ใช้อธิบายแสง 2 ทฤษฎี คือ ทฤษฎีแสงเป็นอนุภาคและทฤษฎีคลื่น
ทฤษฎีแสงเป็นอนุภาค

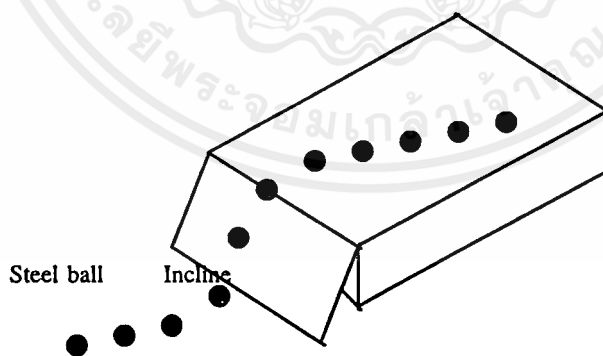
1. การกระจายเป็นเส้นตรง อนุภาคที่มีขนาดเล็กมากๆ ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมากทางเดินของแสงจะเป็นเส้นตรง นิวตันได้นำความคิดเกี่ยวกับอนุภาคเล็กๆ ดังกล่าวมาใช้อธิบายเกี่ยวกับการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงของแสง

2. การสะท้อน เมื่อแสงส่องกระทบผิววัตถุเคลื่อนที่ เช่น กระจก แสงจะสะท้อนได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลูกเหล็กสะท้อนจากแผ่นเหล็กแผ่นเรียบนำมาอธิบายเกี่ยวกับการสะท้อนของแสงจากผิวกระจก

3. การหักเห นิวตันสามารถอธิบายการหักเหของแสงโดยใช้แบบจำลองที่ว่าแสงเป็นอนุภาคเล็กๆ ดังรูปที่ 2.2



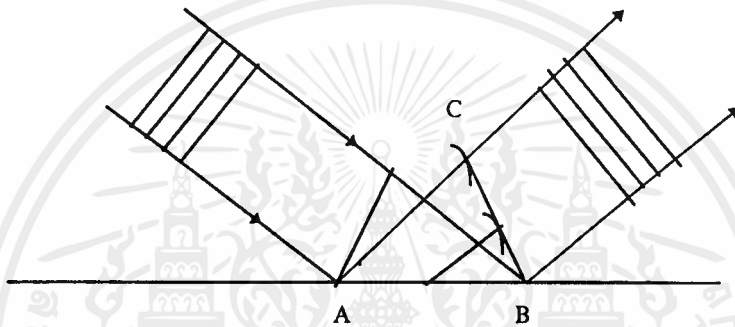
รูปที่ 2.2 ลูกบอลกลิ้งจากผิวที่มีระดับสูงกว่ามายังผิวล่างที่มีระดับต่ำกว่านำมาอธิบายการหักเหของแสง

ถ้าเราคิดว่าพื้นบนเป็นอากาศ พื้นล่างเป็นตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากกว่า เช่นน้ำ ผิวเฉียงคือรอยต่อระหว่างตัวกลางทั้งสอง ลูกบอลที่กลิ้งมาเปรียบเทียบกับอนุภาคของแสงซึ่งจะหักเหไปเมื่อผ่านจากอากาศไปสู่ น้ำ

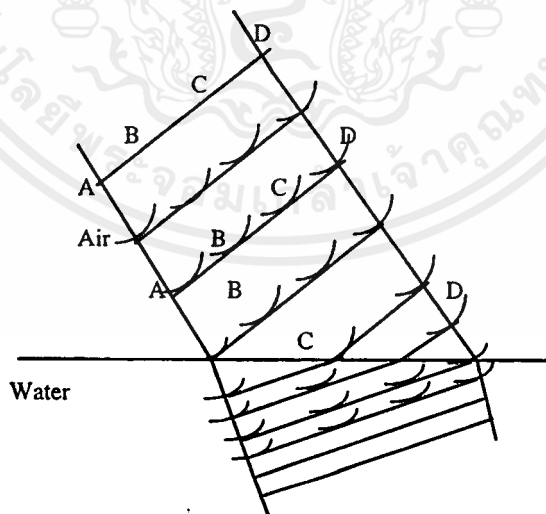
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีคลื่น

คริสเตียน ฮอยเกนส์เป็นคนแรกที่พิจารณาเกี่ยวกับลักษณะคลื่นของแสง ตามหลักของฮอยเกนส์มีใจความว่า “ ทุกๆจุดบนหน้าคลื่นอาจพิจารณาได้เสมือนว่าเป็นจุดกำเนิดคลื่นอันใหม่ ทำการกระจายคลื่นใหม่ให้หน้าคลื่นอันใหม่ต่อไป ” เขาได้นำมาพิจารณากับแสงในลักษณะของลำคลื่นที่มีหน้าคลื่นตั้งฉากกับทางเดินของลำแสง พลังงานกระจายไปบนหน้าคลื่นที่เคลื่อนที่ออกไป การสะท้อนและการหักเหของแสงโดยทฤษฎีคลื่นแสงอธิบายได้ดังรูปที่ 2.3 และ 2.4



รูปที่ 2.3 ใช้หลักของฮอยเกนส์อธิบายการสะท้อนของคลื่น หน้าคลื่นที่เข้ามาทางซ้ายเข้ามาถึงจุด A ซึ่งจะทำหน้าที่เหมือนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นใหม่ให้คลื่นกระจายไปถึงจุด C ในขณะที่เดียวกับที่หน้าคลื่นอื่นจากทางซ้ายมาถึงจุด B เส้นที่ลากจาก C มายัง B จะเป็นหน้าคลื่นใหม่ซึ่งกระจายออกไปทางขวา



รูปที่ 2.4 การหักเหของคลื่นอธิบายตามหลักของฮอยเกนส์ ความเร็วของคลื่นในน้ำน้อยกว่าในอากาศ

ปรากฏการณ์การแทรกสอดของแสงและการเลี้ยวเบนของแสงอธิบายได้โดยทฤษฎีคลื่นแต่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยพฤติกรรมของอนุภาค ดังนั้นทฤษฎีคลื่นจึงเป็นที่ยอมรับมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาเรื่องตัวกลางในการนำคลื่นแสง

เมื่อเป็นที่ยอมรับว่าแสงมีการเคลื่อนที่ในลักษณะคลื่น จึงมีปัญหากเกี่ยวกับตัวกลางในการนำการเคลื่อนที่ของคลื่น ทั้งนี้เพราะนักวิทยาศาสตร์ในสมัยนั้นเข้าใจว่าคลื่นทุกๆชนิดจำเป็นต้องมีตัวกลางในการเคลื่อนที่ ฉะนั้นจึงได้สมมติให้มีตัวกลางชนิดหนึ่งที่ไม่สามารถมองเห็นได้และมีคุณสมบัติที่พิเศษมากเรียกว่า อีเทอร์ (Ether) ให้เป็นตัวกลางสำหรับการเคลื่อนที่ของคลื่นแสง อีเทอร์นี้ได้ถูกสมมติให้เข้าแทรกอยู่ทั่วไปในที่ว่างเปล่า แม้แต่ในที่ว่างเปล่าของอะตอม

ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

แมกซ์เวลล์ได้อธิบายไว้ว่าเมื่ออิเล็กตรอนอื่นๆเข้าไปอยู่ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นๆลงๆ เช่น อิเล็กตรอนในสายอากาศของโทรทัศน์ที่ค้างไว้ในทิศทางที่คลื่นส่งผ่าน อิเล็กตรอนเหล่านี้จะดูดกลืนพลังงานบางส่วนจากคลื่นส่งที่ผ่านมา แรงแม่เหล็กและแรงแม่เหล็กที่มากับคลื่นจะทำให้อิเล็กตรอนในสายอากาศเปลี่ยนทิศทางของมันทำให้มีอัตราการเคลื่อนที่เช่นเดียวกับที่เครื่องส่งได้ส่งออกมา ดังนั้นเราจึงเห็นภาพบนจอโทรทัศน์เช่นเดียวกับภาพในห้องส่ง แมกซ์เวลล์สามารถทำนายได้ว่ามีคลื่นอีกชนิดหนึ่งคือคลื่นวิทยุ และคลื่นเหล่านี้มีพฤติกรรมคล้ายกับแสง แมกซ์เวลล์จึงสรุปว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง

แมกซ์เวลล์ยังได้ชี้ให้เห็นอีกว่ายังมีคลื่นที่มีความถี่สูงกว่าแสงสีม่วงและต่ำกว่าแสงสีแดง คลื่นเหล่านี้มีลักษณะเหมือนแสงทุกประการเว้นแต่เรามองไม่เห็น คลื่นแสงที่มีความถี่ต่ำกว่าแสงสีแดงคืออินฟราเรด (Infrared) และคลื่นแสงที่มีความถี่สูงกว่าแสงสีม่วงคืออุลตราไวโอเลต (Ultraviolet)

สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแต่ละขณะอาจมีความยาวคลื่นเพียงค่าเดียว (Monochromatic) หรืออาจมีความยาวคลื่นหลายค่า (Polychromatic) และกรณีที่มีหลายค่านี้ อาจอยู่ในลักษณะที่ต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่องก็ได้ เราเรียกการกระจายของความยาวคลื่น (หรือพลังงาน) นี้ว่าสเปกตรัม (Spectrum) ของคลื่น ในสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะมีชื่อเรียกหลายชื่อขึ้นกับช่วงความยาวคลื่นหรือความถี่ ดังที่ปรากฏในรูปที่ 2.5 ค่าความยาวคลื่น λ และความถี่ V ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีความสัมพันธ์กันตามสมการ (2.1)

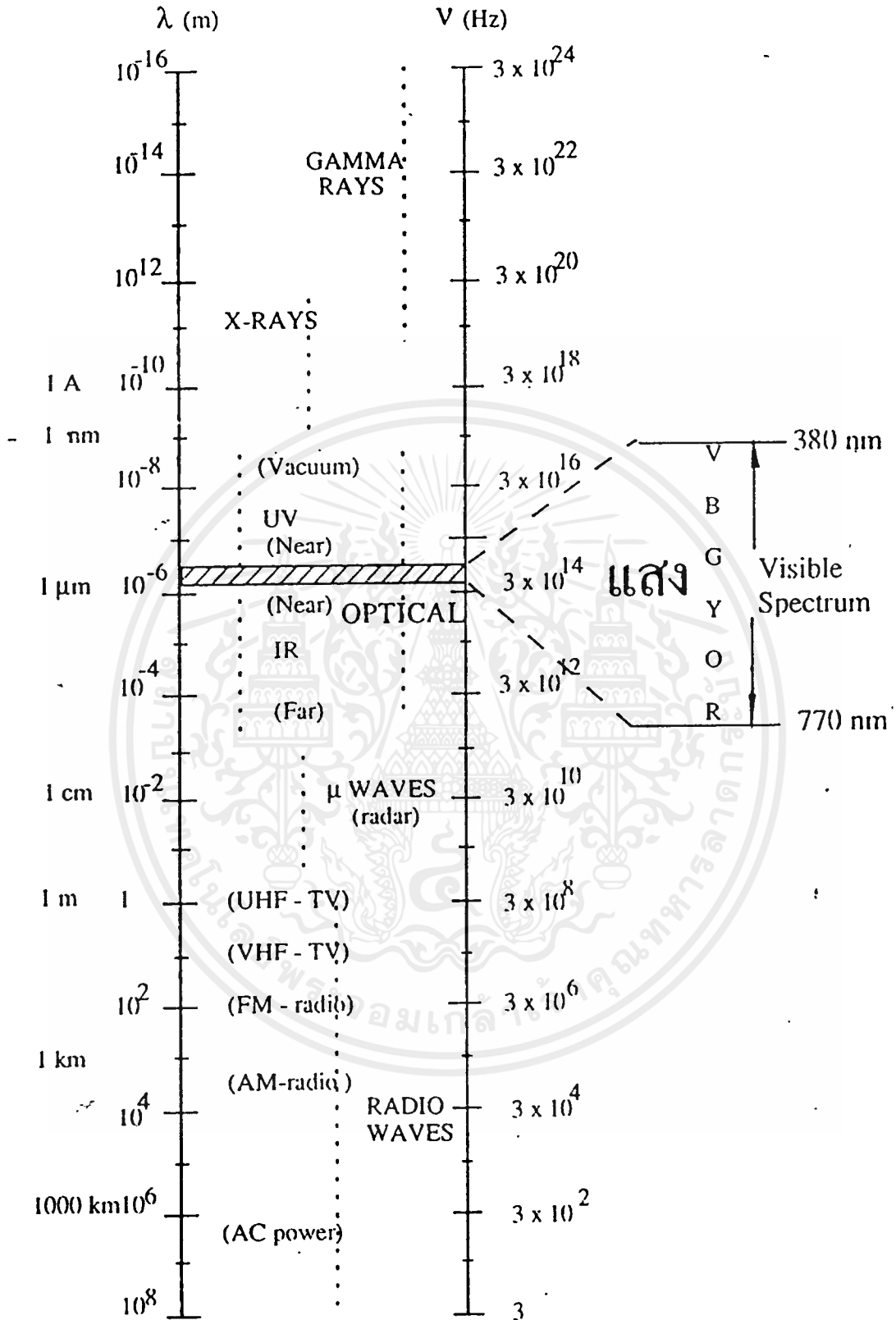
$$c = \lambda V \quad (2.1)$$

คลื่นในรูปที่ 2.5 นี้ถือว่าเคลื่อนที่ในสุญญากาศ ซึ่งอัตราเร็วของคลื่น C มีค่า $3 * 10^8$ เมตรต่อวินาที ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 380 ถึง 770 นาโนเมตร เป็นช่วงที่ทำให้เกิดการมองเห็น

ของตามนุษย์ และเรียกกันโดยทั่วไปว่าเป็นช่วงของแสงที่ทำให้เกิดการมองเห็น (Visible Region) แสงช่วงนี้อยู่ระหว่างแสงในช่วงที่มองเห็น 2 ช่วง คือ อุลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) และ อินฟราเรด (Infrared) เรามักนิยมเรียก 3 ช่วงนี้รวมกันว่าบริเวณทางแสง (Optical Region) ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



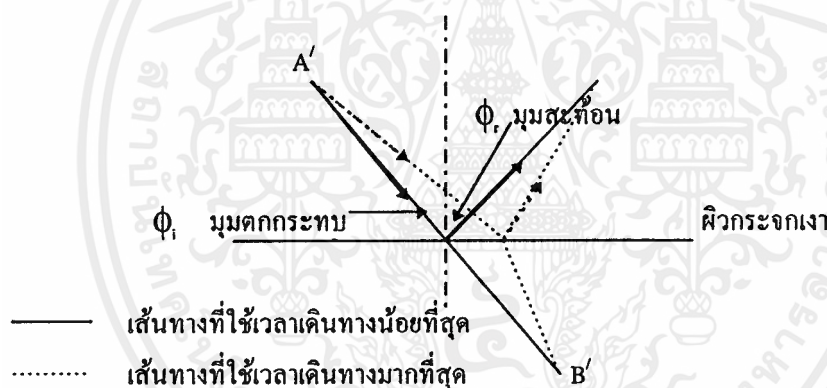
รูป 2.5 แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการสื่อสารด้วยใยแสงนั้น แสงจะเป็นตัวนำพาข่าวสาร ข้อมูลต่างๆจากจุดส่งไปยังจุดรับ ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานของแสงที่จำเป็นในการที่จะศึกษาการเดินทางของแสงภายในเส้นใยนำแสง

กฎ 3 ข้อของแสง

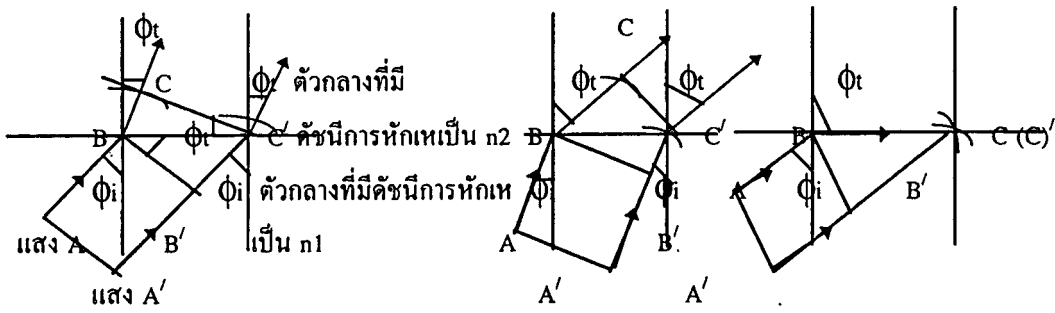
ในตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสงค่าเดียวกันนั้น แสงจะเดินทางเป็นเส้นตรงส่วนตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสงต่างกันนั้นตรงรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง แสงจะเกิดการหักเห (Refraction) และเกิดการสะท้อนกลับ (Reflection) ปรากฏการณ์เหล่านี้แสดงคุณสมบัติการเดินทางเป็นเส้นตรงของแสง คุณสมบัติการหักเหของแสงและคุณสมบัติการสะท้อนกลับของแสง เรียกว่ากฎ 3 ข้อของแสง นอกจากนี้คุณสมบัติอีกอันหนึ่งที่สำคัญของแสงก็คือความเร็วของแสงจะต่างกันในตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหต่างกัน



รูปที่ 2.6 แสดงกฎการสะท้อนกลับของแสง

จากรูปที่ 2.6 สมมติว่าแสงเดินทางจากจุด A สะท้อนกลับที่ผิวของกระจกเงาที่จุด O และเดินทางไปถึงจุด B มุมตกกระทบของแสงที่จุด O คือมุม ϕ_i และมุมสะท้อนของแสงที่จุด O คือมุม ϕ_r จะเท่ากัน ปรากฏการณ์นี้เรียกว่ากฎการสะท้อนกลับของแสง

ในรูปที่ 2.6 นี้ถ้าหากพิจารณาเส้นทางเดินของแสงจากจุด A ไปยังจุด B ด้วยเวลาที่น้อยที่สุด (เส้นทางที่สั้นที่สุด) ก็คือเส้นตรง AOB' ซึ่งจุด B' อยู่ตรงกันข้ามกับจุด B ดังรูป และกรณีนี้ก็เช่นกันมุมตกกระทบ ϕ_i เท่ากับมุมสะท้อน ϕ_r



(a) กรณี $n_1 < n_2$ (b) กรณี $n_1 > n_2$ (c) กรณีสะท้อนกลับหมด

รูปที่ 2.7 แสดงกฎการสะท้อนกลับของแสง

สำหรับกฎการหักเหของแสงนั้นแสดงดังรูปที่ 2.7 รูปที่ 2.7 (a) นั้นเป็นกรณีที่ค่าดัชนีการหักเห $n_1 < n_2$ และรูปที่ 2.7 (b) เป็นกรณีที่ค่าดัชนีการหักเห $n_1 > n_2$ โดยที่สมมติว่าแสงที่เดินทางจากต้นกำเนิดแสงเป็นลำแสงขนาน 2 อัน คือ A, A' โดยที่แสงทั้งสองเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเห n_1 ไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเห n_2 เมื่อลำแสง A เดินทางไปถึงจุด B ที่รอยต่อของตัวกลางทั้งสองนั้นลำแสง A' ยังเดินทางไปไม่ถึงจุด C' เมื่อลำแสง A เดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเห n_1 ไปถึงจุด C ของตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเห n_2 นั้น เป็นเวลาพอดีกับที่ลำแสง A' เดินทางไปถึงจุด C' ที่รอยต่อของตัวกลางทั้งสอง โดยที่แสงใช้เวลาเดินทางในเส้นทาง BC และ B'C' เท่ากัน

สมมติว่าความเร็วของแสงในอากาศเป็น V และให้ความเร็วของแสงในตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเห n_1, n_2 เป็น V/n_1 และ V/n_2 ตามลำดับ

จะได้ว่า

$$\frac{BC}{V/n_2} = \frac{B'C'}{V/n_1} \tag{2.2}$$

ดังนั้น ถ้ากำหนดให้มุมตกกระทบและมุมหักเหของลำแสง A เป็น ϕ_i และ ϕ_t และมุมตกกระทบของลำแสง A' มีค่าเท่ากับ ϕ_i แล้วจากความสัมพันธ์ทางตรีโกณ จะได้ว่า

$$BC = B'C' \sin \phi_t \tag{2.3}$$

$$B'C' = BC \sin \phi_i \tag{2.4}$$

โดยการนำ (2.2) เราสามารถพิสูจน์ได้ว่า

$$n_1 \sin \phi_i = n_2 \sin \phi_t \tag{2.5}$$

(2.5) นี้เรียกว่ากฎของสเนลล์ (Snell's Law)

สำหรับกรณีของรูปที่ 2.7 (c) นั้นเป็นการสะท้อนกลับหมดของแสงในกรณีของ $n_1 > n_2$

ยกตัวอย่างเช่นแสงที่เดินทางจากน้ำไปยังอากาศ ถ้าหากมุมตกกระทบ ϕ_i มีค่ามากขึ้นเรื่อยๆจะทำเอกสารเป็นเอกสารทสองวงไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

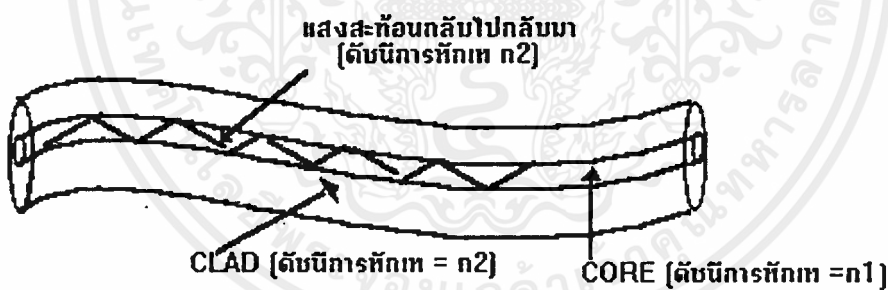
ให้มุมหักเห ϕ_1 มีค่าเข้าใกล้ 90° องศามากขึ้น และเมื่อมุมตกกระทบ ϕ_1 มีค่าถึงค่าหนึ่งแล้วจะทำให้แสงไม่สามารถเดินทางเข้าไปในตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเห n_2 ได้เลย นั่นคือเกิดการสะท้อนกลับหมดนั่นเอง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ การสะท้อนกลับหมด ” และมุมตกกระทบที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดนี้เรียกว่า “ มุมวิกฤติ ” (Critical Angle)

ดังนั้น ถ้าให้มุมวิกฤติเป็น ϕ_c ในกรณีนี้มุมหักเห $\phi_2 = 90^\circ$ องศา ดังนั้น $\sin \phi_1 = \sin 90^\circ = 1$ กฎของ Snell ในกรณีเกิดการสะท้อนกลับหมดจะเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$\sin \phi_c = n_2 / n_1 \quad (2.6)$$

จาก (2.6) จะสามารถหาค่าของ ϕ_c ได้

เส้นใยแสง (Fiber) มีโครงสร้างดังแสดงในรูป 2.4 ประกอบด้วยส่วนใน เรียกว่า แกน (Core) ทำด้วยสารที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า (Dielectric) และส่วนนอกที่หุ้มแกนอยู่นั้นเรียกว่าเคลด (Clad) ทำด้วยสารที่มีดัชนีการหักเหของแสงต่ำกว่าแกนเล็กน้อย สำหรับการสื่อสารใยแสงนั้นใช้ปรากฏการณ์การสะท้อนกลับหมดของแสงที่กล่าวถึงมาแล้ว โดยให้แสงเดินทางในแกนด้วยการสะท้อนกลับ ไปมาภายในแกนดังรูป



รูปที่ 2.8 แสดงการเดินทางของแสงภายในแกนของเส้นใยแสง

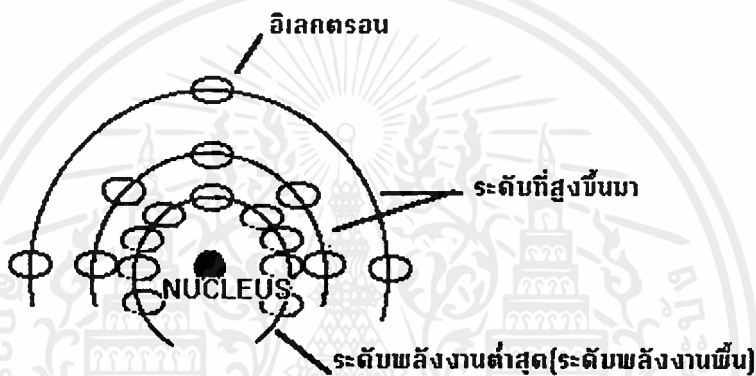
2.2 แหล่งกำเนิดแสง (Light Sources)

เส้นใยแสงถ้าหากเปรียบเทียบกับอวัยวะในร่างกายของคนเราแล้ว สามารถกล่าวได้ว่ามันทำหน้าที่เป็นเหมือนเส้นโลหิต และแสงที่เดินทางในเส้นใยแสงเปรียบเสมือนโลหิตที่ไหลในเส้นโลหิตนั่นเอง ส่วนที่ทำหน้าที่เป็นเหมือนหัวใจซึ่งผลิตแสง (โลหิต) ออกมาได้แก่อุปกรณ์กำเนิดแสง (ตัวเปลี่ยนไฟฟ้าให้เป็นแสง)

การเปลี่ยนไฟฟ้าเป็นแสง

โครงสร้างของการกำเนิดแสง

เป็นที่ทราบกันทั่วไปแล้วว่าการที่กระแสไหล่นั้นเป็นปรากฏการณ์ที่อิเล็กตรอนภายในสารที่ประกอบเป็นตัวกลางนั้นเคลื่อนที่ไปนั่นเอง แต่ทว่าอิเล็กตรอนนี้ถ้าหากไม่มีแรงภายนอกมากระทำแล้วมันจะไม่เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งลัพท์



รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างและระดับพลังงานของอะตอม

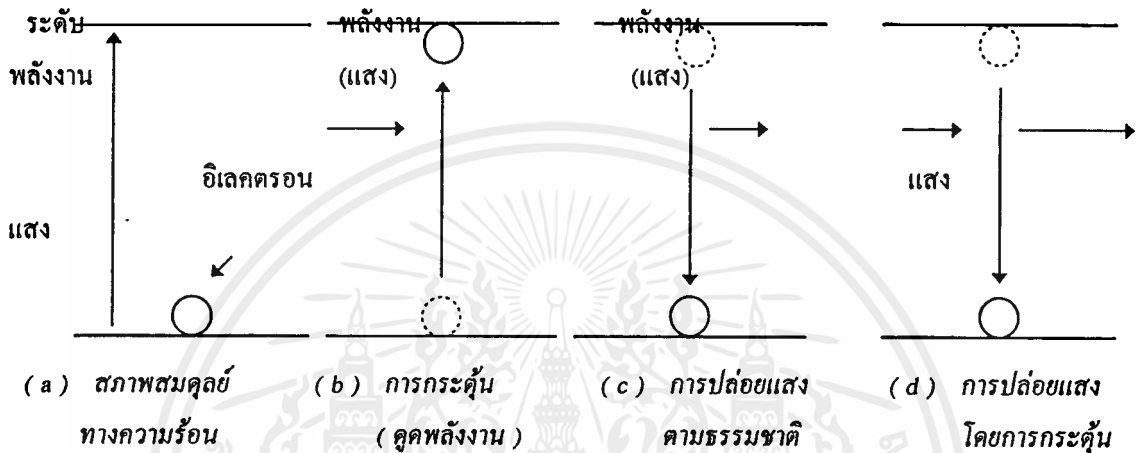
โดยทั่วไปแล้วอะตอม (Atom) ที่ประกอบอยู่ในสารต่างๆ (ก๊าซ, ของเหลว, ของแข็ง) จะมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.9 นั่นคือมีส่วนที่เรียกว่านิวเคลียสอยู่ตรงกลางและรอบๆนิวเคลียสจะมีอิเล็กตรอนจำนวนหนึ่งเคลื่อนที่อยู่รอบนิวเคลียส

อิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีพลังงานเป็นชั้นๆ พลังงานนี้เรียกว่าระดับพลังงาน หรือ Energy Level ระดับพลังงานที่ต่ำที่สุดเรียกว่า ระดับพลังงานพื้น (Ground State Level) และระดับพลังงานที่สูงกว่านี้เรียกว่า ระดับพลังงานกระตุ้น (Excited State) จำนวนอิเล็กตรอนที่มีอยู่ในระดับพลังงานนั้นจะมีจำนวนแน่นอนขึ้นอยู่กับชนิดของสาร แต่โดยปกติแล้วอิเล็กตรอนจะอยู่ที่ระดับพลังงานต่ำ อันนี้เป็นคุณสมบัติโดยธรรมชาติของอิเล็กตรอน

คราวนี้เราลองสมมติว่ามีอิเล็กตรอนอยู่ในระดับพลังงาน 1 (ระดับพลังงานต่ำ) และไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ในระดับพลังงาน 2 (ระดับพลังงานสูง) เลยดังแสดงในรูปที่ 2.10 (a) ในสภาพนี้ถ้าหากเราให้พลังงานที่มีค่าเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานทั้งสอง (นั่นคือถ้า E_1 เป็นพลังงานของระดับพลังงาน 1 และ E_2 เป็นพลังงานของระดับพลังงาน 2 จะได้ผลต่างเป็น $E_2 - E_1$) แล้วอิเล็กตรอนจะดูดเอาพลังงานนี้และจะเลื่อนจากระดับพลังงานต่ำ E_1 ขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงานสูง E_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังรูปที่ 2.10 (b) การให้พลังงานจากภายนอกแก่อิเล็กตรอนเพื่อทำให้มันเลื่อนขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงานสูงนี้เรียกว่าการกระตุ้น (Stimulation) และการที่อิเล็กตรอนเลื่อนไปยังระดับพลังงานอื่นนั้นเรียกว่าการถ่ายเท (Transfer)



รูปที่ 2.10 แสดงระดับพลังงานและขั้นตอนของการถ่ายเท (Transfer)

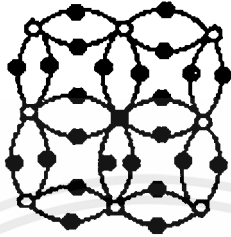
และเมื่อปล่อยอิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะเลื่อนขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานสูง E_2 ไว้อย่างนั้น มันจะตกกลับลงมาอยู่ในสภาวะเดิมดังรูปที่ 2.10 (a) อีก ในการที่อิเล็กตรอนกลับลงมาสู่สภาวะเดิมนั้นคือลงมาสู่ระดับพลังงานต่ำ E_1 นั้น อิเล็กตรอนจะปล่อยพลังงาน (Emission) เท่ากับ $E_2 - E_1$ ออกมาดังรูปที่ 2.10 (c) ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่าการปล่อยพลังงานออกมาตามธรรมชาติ (Natural Emission) กรณีที่ปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงจะเรียกว่าการปลดปล่อยแสงตามธรรมชาติ (Natural Light Emission) อุปกรณ์กำเนิดแสงที่ใช้การปล่อยแสงตามธรรมชาตินี้ได้แก่ หลอดนีออนและไดโอดกำเนิดแสง (Light Emitting Diode : LED) เป็นต้น

ต่อไปสมมติว่าเราป้อนแสงที่มีพลังงานเท่ากับ $E_2 - E_1$ ที่ใช้ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนให้ไปอยู่ในระดับพลังงานสูงดังรูปที่ 2.10 (b) อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงาน E_2 ซึ่งพยายามที่จะกลับลงมาสู่ระดับพลังงานต่ำ E_1 อยู่แล้วนั้นก็จะดูดพลังงานของแสงที่ป้อนให้ไว้ และกลับลงมาสู่ระดับพลังงานต่ำ E_1 ในลักษณะถูกบังคับให้ลงมาเร็วกว่ากำหนดดังแสดงในรูปที่ 2.10 (d) ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การกระตุ้นให้ปล่อยแสง (Stimulated Emission) แสงที่ได้เรียกว่าแสงที่ปลดปล่อยจากการกระตุ้น (Stimulated Emission Light) อุปกรณ์กำเนิดแสงที่ใช้หลักการของการกระตุ้นให้ปล่อยแสงนี้ได้แก่ เลเซอร์ (Laser)

โครงสร้างและการทำงานแหล่งกำเนิดแสงของสารกึ่งตัวนำ

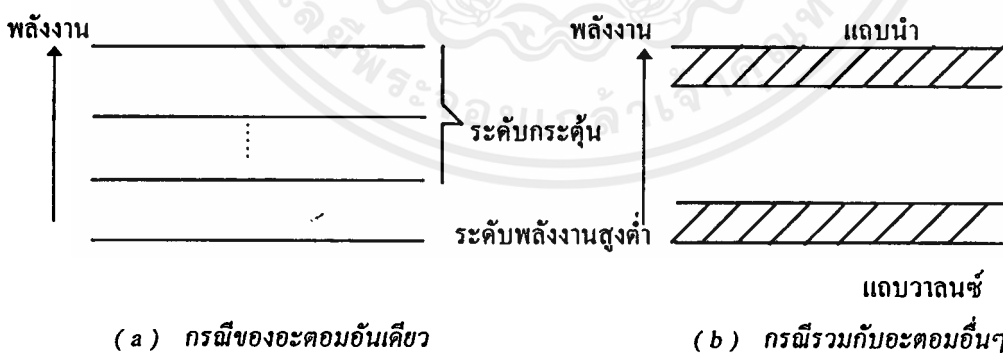
ที่กล่าวมาแล้วข้างต้นเป็นหลักการพื้นฐานของการปล่อยแสง คราวนี้เราจะมาพิจารณาดู โครงสร้างการปล่อยแสงของสารกึ่งตัวนำที่ใช้กันโดยทั่วไป

อิเล็กตรอน



รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างการจัดอิเล็กตรอนและนิวเคลียสในสารกึ่งตัวนำ

สำหรับสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีอะตอมจำนวนมากจัดเรียงกันอย่างมีระเบียบดังรูปที่ 2.11 ด้วยเหตุนี้อิเล็กตรอนของแต่ละอะตอมจะทำหน้าที่เชื่อมโยงกับอะตอมข้างเคียง และมีตำแหน่งอยู่ระหว่างอะตอมทั้งสองนั้นคือมันจะรับผลการดึงดูดจากอะตอมข้างเคียง สภาพพลังงานที่อะตอมได้รับนั้นถ้าหากจะกล่าวในทางควอนตัม แล้วจะแตกต่างกับกรณีที่มีเพียงอะตอมเดียว กล่าวคือ ในกรณีนี้มันจะแบ่งออกเป็น 2 สภาพ สภาพหนึ่งเป็นระดับพลังงานสูงเรียกว่า แถบนำ (Conduction Band) และอีกสภาพหนึ่งเป็นระดับพลังงานต่ำเรียกว่า แถบวาเลนซ์ (Valence Band) และสภาพทั้งสองนี้ต่างก็มีความกว้างของพลังงานอยู่ดังแสดงในรูปที่ 2.12



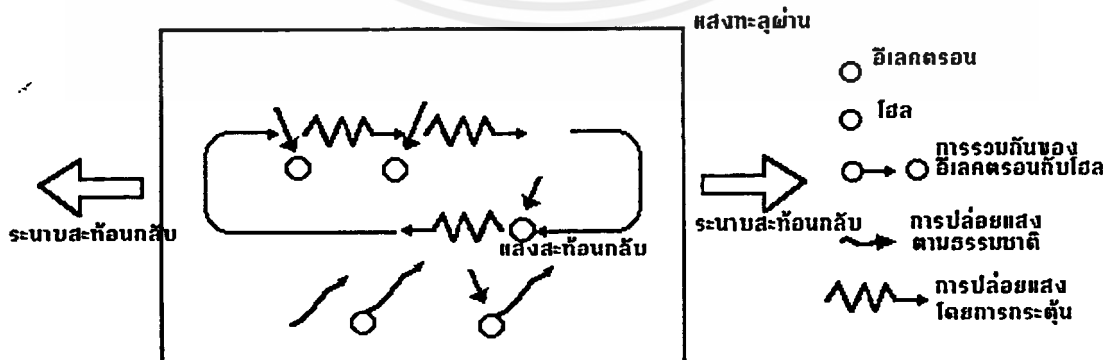
รูปที่ 2.12 แสดงระดับพลังงานในสารกึ่งตัวนำ

โดยปกติแล้วอิเล็กตรอนจำนวนมากจะรวมตัวกันอยู่ที่แถบวาเลนซ์ซึ่งมีระดับพลังงานต่ำ และจะมีอิเล็กตรอนจำนวนเล็กน้อยอยู่ในแถบนำซึ่งเป็นระดับพลังงานสูง

เลเซอร์ไดโอด

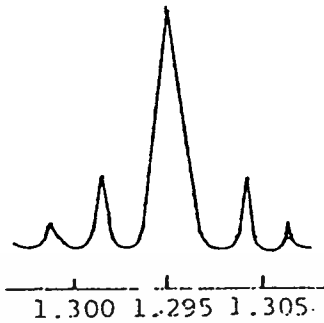
เลเซอร์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Laser Diode เรียกชื่อย่อว่า LD) ใช้วิธีการกระตุ้นให้ปล่อยแสงออกมา สมมติว่าจำนวนอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็น N และอยู่ในแถบวาเลนซ์ n_1 ตัว อยู่ในแถบนำ n_2 ตัว ในสภาพปกติ n_1 จะมากกว่า n_2 ถ้าเราให้แสงจากภายนอกแถมมันจะทำให้เกิดการปลดปล่อยเนื่องจากการกระตุ้น (Stimulated Emission) และการดูดพลังงาน (Absorption) โดยทั่วไปการดูดพลังงานจะมีขนาดมากกว่าทำให้แสงที่ป้อนเข้ามา มีขนาดลดลงไป แต่ถ้าทำให้ $n_2 > n_1$ [เรียกว่าเกิดการกระจายแบบผันกลับ (Inversion Distribution)] จะทำให้การกระตุ้นให้ปล่อยแสงมีค่ามากกว่าการดูดพลังงาน ในกรณีนี้จะทำให้ความเข้มแสงที่ป้อนเข้ามาเพิ่มมากขึ้น และเกิดปฏิกิริยาการขยายแสง (Light Amplification Action)

สำหรับสารกึ่งตัวนำการฉีด (Injection) ของอิเล็กตรอนโดยการทำให้กระแสไหลก็จะเกิดปฏิกิริยาการขยายทางกระแสได้เช่นเดียวกับกรณีของวงจรไฟฟ้า หลักการขยายกลับป้อนมาทำได้โดยใช้ระนาบสะท้อนกลับ (Reflection Plane) 2 อันวางหันหน้าเข้าหากันดังรูปที่ 2.13 นั่นคือแสงที่เกิดจากการกระตุ้นให้ปล่อยแสงนี้จะถูกขยายไปพร้อมกับเคลื่อนที่ไปด้วย และเมื่อไปกระทบกับระนาบสะท้อนกลับแล้วส่วนหนึ่งจะทะลุออกไปข้างนอก ส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับไปในทิศทางตรงกันข้าม และเมื่อแสงที่สะท้อนกลับนี้เมื่อไปถึงระนาบสะท้อนกลับอีกด้านก็จะเกิดผลเช่นเดียวกัน ในระหว่างที่ทำให้เกิดการป้อนกลับซ้ำกลับป้อนมาอยู่อย่างนี้จะถึงจุดหนึ่งที่พลังงานที่ถูกขยายโดยการกระตุ้นให้ปล่อยแสงมีค่ามากกว่าพลังงานที่สูญเสียไป ณ จุดนี้จะทำให้เกิดแสงที่ เรียกว่า เลเซอร์ ซึ่งเป็นแสงที่มี เฟสเดียวกันทำให้ มีความเข้มสูงมาก



รูปที่ 2.13 แสดงหลักการของการขยายกลับป้อนมาของแสง

แสงที่ได้จาก LD จะมีความยาวแสงกระจายออกเป็นจำนวนมากดังแสดงในรูปที่ 2.14

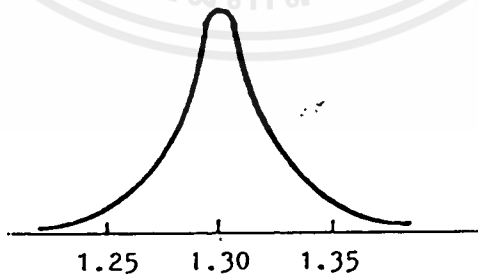


ความยาวคลื่น

รูป 2.14 แสดงความยาวคลื่นต่างๆของเลเซอร์

ไดโอดเปล่งแสง (LED)

ส่วนทางด้านไดโอดเปล่งแสง (LED : Light Emitting Diode) นั้นต่างจากเลเซอร์ไดโอดคือแทนที่จะใช้ปรากฏการณ์การปลดปล่อยเนื่องจากการกระตุ้น แต่จะใช้ปรากฏการณ์ของการปลดปล่อยตามธรรมชาติแทน ดังนั้นแสงที่ได้ออกมาจะมีช่วงความยาวคลื่นแสงกว้างมากทั้งนี้เพราะกำหนดจากความสัมพันธ์ของพลังงานของแถบนำกับแถบวาเลนซ์ที่มีความกว้างของพลังงานอยู่ในตัว และช่วงความยาวคลื่นแสงนี้เรียกว่าช่วงกว้างของสเปกตรัม (Spectrum Width) และ กำลังงาน (Output Power) ของไดโอดเปล่งแสงเมื่อเทียบกับเลเซอร์ไดโอดแล้วมีค่าน้อยกว่า แต่มีข้อดีคือโครงสร้างของไดโอดเปล่งแสงไม่ยุ่งยากทำให้สร้างได้ง่ายและมีราคาถูกกว่ามาก รูปที่ 2.15 เป็นรูปที่แสดงถึงช่วงความยาวคลื่นแสงของไดโอดเปล่งแสง



ความยาวคลื่นแสง

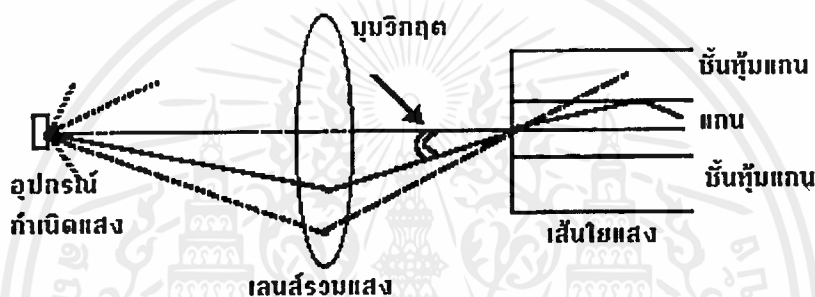
ความยาวคลื่นแสง

รูป 2.15 แสดงช่วงความยาวคลื่นแสงของไดโอดเปล่งแสง (LED)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเชื่อมแหล่งกำเนิดแสงกับเส้นใยนำแสง

โดยทั่วไปแล้วแสงที่ปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดแสงจะกว้างออก เนื่องด้วยปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของแสง (Diffraction) การป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสงที่มีขนาดเล็กมากประมาณสิบล้อมถึงหลายสิบล้อมไมโครเมตร จึงเป็นการยากที่จะให้แสงเข้าไปในเส้นใยนำแสง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการใช้วิธีการต่างๆ เช่น ใช้เลนส์มาทำการบีบลำแสงให้เล็กลงในการเชื่อมแสงระหว่างอุปกรณ์ปล่อยแสงกับเส้นใยแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงการเชื่อมแสงระหว่างอุปกรณ์ปล่อยแสงกับเส้นใยแสง

ในการป้อนแสงเข้าไปในแกนของเส้นใยแสง จำเป็นต้องปล่อยแสงเข้าไปด้วยค่าของมุมตกกระทบที่อยู่ในช่วงที่ต่ำกว่ามุมรับแสงสูงสุดของเส้นใยนำแสง ดังได้กล่าวมาแล้ว ตัวอย่างเช่น สมมติว่าป้อนแสงเข้าไปด้วยมุมตกกระทบที่มีค่ามากกว่ามุมรับแสงสูงสุดของเส้นใยนำแสง ดังแสดงด้วยเส้นประในรูปที่ 2.16 จะเห็นว่าแสงที่ป้อนเข้าไปนี้จะทะลุออกไปยังชั้นหุ้มแกน (Clad) หมด ด้วยเหตุนี้จึงต้องใช้เลนส์นำไปวางใกล้ๆ อุปกรณ์ปล่อยแสงเพื่อบีบแสงให้แคบลง ในทางตรงกันข้ามถ้าหากวางตำแหน่งของเลนส์ใกล้กับอุปกรณ์ปล่อยแสงมากเกินไปจะทำให้ลำแสงถูกขยายกว้างมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนของเส้นใยนำแสงทำให้ประสิทธิภาพการเชื่อมแสงต่ำลงไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับแต่งเลนส์ที่ใช้และปรับแต่งตำแหน่งของเลนส์ระหว่างอุปกรณ์ปล่อยแสงกับเส้นใยนำแสงให้เหมาะสมถูกต้องซึ่งเป็นการปรับที่ละเอียดมาก

2.3 เส้นใยนำแสง (Optical Fiber)

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงลักษณะการเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสง คุณสมบัติการส่งแสง การสร้างเส้นใยนำแสง วิธีการต่อเชื่อมเส้นใยนำแสง และอื่นๆที่เป็นความรู้พื้นฐานของเส้นใยนำแสง

เส้นใยนำแสงคืออะไร

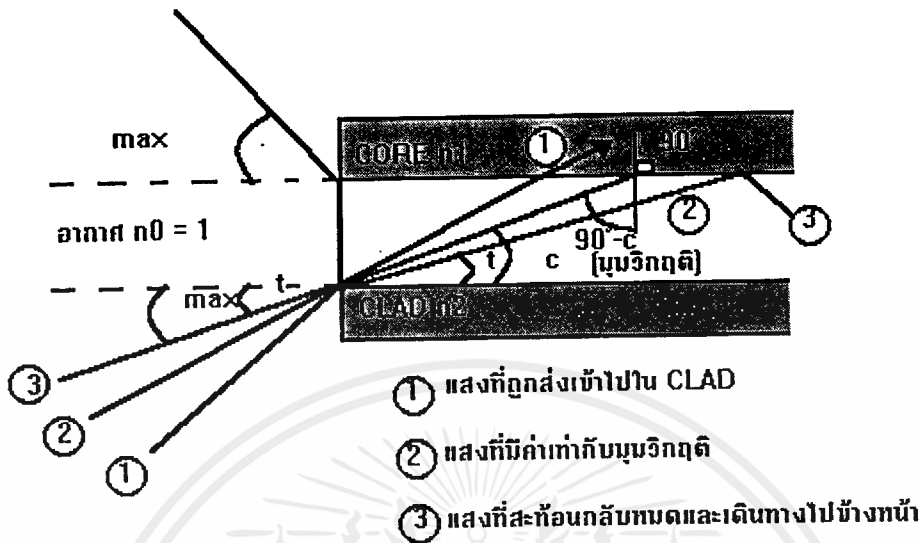
เส้นใยนำแสงคือ เส้นใยขนาดเล็กที่ทำหน้าที่เป็นตัวนำแสง โครงสร้างของเส้นใยนำแสงประกอบด้วยส่วนที่แสงเดินทางผ่านเรียกว่าแกนและส่วนที่หุ้มแกนอยู่เรียกว่าชั้นหุ้มแกน (Clad) ทั้งแกนและชั้นหุ้มแกนเป็นไดอิเล็กทริกใส 2 ชนิด (ไดอิเล็กทริกหมายถึงสารที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น แก้ว พลาสติก) โดยการทำให้ค่าดัชนีการหักเหของชั้นหุ้มแกนมีค่าน้อยกว่าค่าดัชนีการหักเหของแกนเล็กน้อยประมาณ $0.2 \sim 3 \%$ และอาศัยปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดของแสงสามารถทำให้แสงที่ป้อนเข้าไปในแกนเดินทางไปได้ เส้นใยนำแสงนอกจากมีคุณสมบัติการนำแสงดีเยี่ยมแล้วยังมีลักษณะเด่นอย่างอื่นอีก เช่น ขนาดเล็ก น้ำหนักเบาอีกด้วย

ลักษณะการเดินทางของแสงภายในเส้นใยนำแสง

ปัญหาอันดับแรกที่ต้องคำนึงถึงก็คือ ทำอย่างไรจึงจะสามารถป้อนแสงเข้าไปในแกนที่มีขนาดเล็กมากของเส้นใยนำแสงได้ และเมื่อป้อนแสงเข้าไปแล้วแสงนั้นจะเดินทางอย่างไรในแกน ซึ่งเราจะทำการศึกษาปัญหาพื้นฐานเหล่านี้

การป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสง

เนื่องจากว่าแสงที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงนั้นจะกระจายกว้างออกเนื่องจากปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของแสงตามที่ได้กล่าวมาแล้วในการที่จะป้อนแสงเข้าไปในแกนที่มีขนาดเล็กมากนั้นต้องใช้เลนส์ทำการรวมแสง แต่ทว่าแสงที่รวมนั้นไม่ใช่ว่าจะถูกป้อนเข้าไปในเส้นใยนำแสงได้ทั้งหมด แสงที่มีมุมตกกระทบที่เหมาะสมเท่านั้นจึงจะสามารถเข้าไปในเส้นใยนำแสงได้ รูปที่ 2.17 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยนำแสง จากรูปจะเห็นว่าที่จุดป้อนแสงของเส้นใยนำแสงนั้นจะเป็นจุดต่อของตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสงต่างกัน 3 ชนิด



รูปที่ 2.17 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยแสง

ตัวกลางทั้ง 3 ชนิดนี้คือ อากาศ แกนของเส้นใยแสง และชั้นหุ้มแกนของเส้นใยนำแสง ค่าดัชนีการหักเหของแสงของตัวกลางทั้ง 3 ชนิดแตกต่างกันจะเกิดการหักเห การสะท้อนกลับของแสงที่บริเวณรอยต่อของอากาศกับแกน และแกนกับชั้นหุ้มแกน มุมที่ทำให้แสงเกิดการสะท้อนกลับหมด เรียกว่า มุมวิกฤตตามที่ได้ทราบมาแล้วจากหัวข้อที่ผ่านมา

โหมดการเดินทางของแสงในเส้นใยแก้วนำแสง

แสงที่ป้อนเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงด้วยมุมรับแสงที่เท่ากับหรือน้อยกว่าค่ามุมวิกฤตนั้น แสงจะเดินทางในเส้นใยแก้วนำแสงด้วยลักษณะที่สะท้อนกลับไปกลับมาตรงรอยต่อของแกนกับชั้นหุ้มแกน พร้อมกับเคลื่อนที่ไปข้างหน้า เส้นใยนำแสงที่มีจำนวนโหมดการเดินทางของแสงจำนวนมากเรียกว่า Multimode Optical Fiber ส่วนเส้นใยนำแสงที่มีโหมดการเดินทางของแสงเพียงอันเดียว เรียกว่า Single Mode Optical Fiber

ชนิดของเส้นใยนำแสง

วิธีการแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงมีหลายวิธีกล่าวคือ แบ่งตามชนิดของสารไดอิเล็กตริกที่ใช้แบ่งตามจำนวนโหมดการเดินทางของแสง แบ่งตามลักษณะของดัชนีการหักเหของแกนดังแสดงในตาราง

ตาราง 2.1 การแบ่งชนิดของเส้นใยแสง

แบ่งตามชนิดของสาร ไดอิเล็กตริกที่ใช้	Silica Glass Optic Fiber
	Multi Component Glass Optic Fiber
	Plastic Optic Fiber
แบ่งตามจำนวน โหมดการเดินทางของแสง	Single Mode Optic Fiber
	Multi Mode Optic Fiber
แบ่งตามลักษณะของ ดัชนีการหักเหของแกน	Step Index Optic Fiber
	Graded Index Optic Fiber

(1) การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงตามชนิดของ ไดอิเล็กตริก

(1) Silica Glass Optic Fiber ซึ่งใช้ไดอิเล็กตริกที่เป็น Silica Glass

(2) Multi Component Glass Optic Fiber ซึ่งใช้ ไดอิเล็กตริกที่เป็นแก้วหลายชนิดปน กัน

(3) Plastic Optic Fiber ซึ่งใช้ไดอิเล็กตริกที่เป็นพลาสติก

สำหรับ (1) นั้นนอกจากจะใช้ซิลิกา (SiO_2) ที่บริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่แล้วยังใช้สารอื่น
เติมลงไปเพื่อให้ค่าดัชนีการหักเหเปลี่ยนแปลงตามต้องการ สารอื่นที่เติมลงไปนี้เรียกว่าสารเจือ
(Dopant) ได้แก่ เจอมาเนียม (Ge) โบรอน (B) ฟลูออรีน (F) เป็นต้น

สำหรับ (2) นั้นส่วนมากจะใช้แคลเซียมแก้ว แก้วที่มีโบรอนและซิลิกอนผสมและอื่นๆ
เป็นสารหลัก ส่วนสารเจือ ได้แก่ โซเดียม (Na) แคลเซียม (Ca)

สำหรับ (3) นั้นใช้สารพวก Silicon Resin, Acryl Resin (เช่น Polymetacryl Methyl
Acid : PMMA)

สำหรับเคเบิลเส้นใยนำแสงที่ใช้ในการสื่อสารโทรคมนาคมนั้นนิยมใช้เส้นใยนำแสงที่ทำ
มาจากซิลิกา (Silica Glass Optic Fiber) เพราะมีข้อดีคือ การสูญเสีย (Loss) ต่ำและคุณสมบัติ
การส่ง (Transmission Characteristics) คงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

แต่สำหรับงานที่ต้องการคุณสมบัติการส่งด้อยลงมา ใช้งานง่าย (เชื่อมต่อง่ายและหักยาก
แม้จะงอเส้นใยนำแสงมากๆ เป็นต้น) และใช้กับการสื่อสารระยะทางใกล้ใช้กับการเดินสายภายใน
รถยนต์และอื่นๆ ในกรณีนี้นิยมใช้เส้นใยนำแสงที่เป็นพลาสติก

(2) การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงตามจำนวนโหมดการเดินทางของแสง

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือชนิดโหมดเดี่ยว (Single Mode Optical Fiber) ใช้ชื่อว่า SM Fiber และอีกชนิดหนึ่งคือชนิดหลายโหมด (Multimode Optical Fiber) ตามที่ได้กล่าวถึงมาบ้างแล้ว

(3) การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงตามลักษณะของดัชนีการหักเห

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเห คือ

(1) ชนิดค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงกะทันหัน [Step Index Optic Fiber (SI - Fiber)] เป็นเส้นใยนำแสงที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหระหว่างแกนกับชั้นหุ้มแกน (Clad) เป็นลักษณะขั้นบันได (Step)

(2) ชนิดดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ [Graded Index Optical Fiber (GI - Fiber)] เป็นเส้นใยนำแสงที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหระหว่างแกนกับชั้นหุ้มแกน (Clad) ค่อยๆลดลงทีละน้อย

คุณสมบัติต่างๆของเส้นใยนำแสง

การสูญเสียแสงในเส้นใยนำแสง

ในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง มีองค์ประกอบสำคัญ 2 อันที่จะกำหนดความเร็วในการส่ง (Transmission Speed) และระยะห่างของการถ่ายทอดสัญญาณ (Repeater Span) องค์ประกอบเหล่านั้นคือ การสูญเสียแสงกับแบนด์วิธของการส่ง การสูญเสียแสง (Optical Loss) เป็นตัวบอกให้ทราบว่ากำลังของแสงที่เดินทางไปในเส้นใยนำแสงนั้นจะลดลงไปจากเดิมเท่าไร ซึ่งการสูญเสียแสงนี้ยังมีค่าน้อยเท่าไรจะทำให้สามารถส่งสัญญาณแสงได้ไกลมากยิ่งขึ้น

การสูญเสียแสงแบ่งออกตามความแตกต่างของโครงสร้างที่เกิดขึ้นได้เป็นการสูญเสียที่มีอยู่ในตัวของเส้นใยแสงเอง (Fixed Loss) และการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นมา (Addition Loss) เมื่อตอนนำเส้นใยนำแสงไปใช้ในระบบการสื่อสาร

- การสูญเสียที่มีอยู่ในตัวของเส้นใยนำแสง เกิดจากสาเหตุต่างๆ ได้แก่

(1) การสูญเสียแสงที่เกิดจากการดูดกลืนแสง (Absorption Loss)

การสูญเสียแสงที่เกิดจากการดูดกลืนแสงนี้ กล่าวคือ สารที่ใช้ผลิตเส้นใยนำแสงเองนั้นจะเป็นตัวดูดกลืนแสงที่เดินทางในเส้นใยนำแสงแล้วเปลี่ยนเป็นการสูญเสียทางความร้อน โดยทั่ว

ไปแล้วจะมีการดูดกลืนแสงอันเนื่องมาจากแก้วเอง (สารที่ใช้ผลิตเส้นใยนำแสง) และเนื่องมาจากสารอื่นที่เจือปนอยู่ในแก้ว (Impurity)

สำหรับการสูญเสียจากการดูดแสงของแก้วนั้น มันจะดูดกลืนแสง อุลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) กับแสงอินฟราเรด (Infrared) การสูญเสียจากการดูดแสงอันเนื่องมาจากสารแปลกปลอมปนอยู่นั้น ในตอนที่พัฒนาเส้นใยนำแสงใหม่นั้นปรากฏว่าส่วนใหญ่เป็นไอออนของโลหะต่างๆ แต่ต่อมาเทคนิคในการทำให้การสูญเสียแสงต่ำลงได้พัฒนาไปมากสามารถกำจัดไอออนของโลหะต่างๆออกไปได้

(2) การสูญเสียแสงที่เกิดจากการกระจัดกระจายแสงแบบเรลีย์ (Rayleigh Scattering Loss)

การสูญเสียแบบนี้เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อแสงไปกระทบกับวัตถุที่มีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่นแล้วทำให้แสงนั้นกระจัดกระจายออกไปในทิศทางต่างๆ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการกระเจิงแสงแบบเรลีย์ (Rayleigh Scattering)

สำหรับการผลิตเส้นใยนำแสงนั้นทำได้โดยการให้ความร้อนแก่แท่งแก้วซึ่งเรียกว่าแท่งเตรียม (Preform) จากนั้นจึงทำการดึงแท่งแก้วให้เป็นเส้นใยนำแสงขนาดเล็ก และในตอนนี้ต้องทำให้เส้นใยนำแสงนั้นมีอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว โดยการทำเช่นนี้จะทำให้ความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นเกิดขึ้น (หรือความไม่สม่ำเสมอของค่าดัชนีการหักเห) ตกค้างอยู่อย่างนั้นในเส้นใยนำแสง และเป็นสาเหตุทำให้เกิดการกระจายแสงแบบเรลีย์ขึ้นในเส้นใยนำแสง จัดเป็นสาเหตุการเกิดการสูญเสียแสงที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในขั้นตอนการผลิตถือเป็นการสูญเสียแสงที่มีประจำอยู่ในตัวของเส้นใยนำแสง

(3) การสูญเสียจากการกระจัดกระจายแสงอันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในเส้นใยนำแสง (Ununiformity Loss)

สำหรับเส้นใยนำแสงที่สร้างขึ้นมาจริงๆนั้นไม่สามารถสร้างเส้นใยนำแสงที่มีลักษณะกลม 100 % ได้ นอกจากนั้นแกนและชั้นหุ้มแกนที่ประกบกันเป็นเส้นใยนำแสงก็ไม่สามารถทำให้ได้ลักษณะรูปทรงกระบอกที่สม่ำเสมอกันอย่างสมบูรณ์ตลอดความยาวของเส้นใยนำแสงได้ กล่าวคือตรงรอยต่อของแกนกับชั้นหุ้มแกนนั้นจะไม่สม่ำเสมอตลอดทำให้เกิดการกระจายของแสง ทำให้แสงบางส่วนไม่สามารถเดินทางไปในแกนได้จะกระจายออกไปข้างนอก ดังนั้นรอยต่อที่ไม่เรียบสม่ำเสมอจะทำให้แสงที่เดินทางเกิดการสะท้อนกลับอย่างสะเปะสะปะทำให้เกิดการสูญเสียแสงเพิ่มขึ้น

- การสูญเสียที่เพิ่มขึ้นมานั้นเกิดจากสาเหตุต่างๆ ได้แก่

(1) การสูญเสียจากการกระจายแสงอันเนื่องมาจากการงอโค้งของเส้นใยนำแสง (Bending Loss)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นการสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อเส้นใยนำแสงถูกทำให้งอโค้งไป สำหรับการงอโค้งเส้นใยนำแสง แสงที่มีมุมงอโค้งมากกว่ามุมวิกฤติแล้ว แสงนั้นจะกระจายออกไปนอกแกนทำให้เกิดการสูญเสียขึ้น ดังนั้นในการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงจะต้องระมัดระวังอย่าให้เกิดการงอเส้นใยนำแสงเป็นส่วนโค้งที่มีรัศมีเกินกว่ารัศมีที่ยอมให้งอโค้งได้

(2) การสูญเสียที่เกิดจากการโค้งงอจุลภาค (Micro Bending)

เป็นการสูญเสียที่เกิดจากการที่มีแรงกดที่ไม่สม่ำเสมอมากระทำต่อด้านข้างของเส้นใยนำแสง ทำให้แกนของเส้นใยนำแสงบิดงอไปเล็กน้อยเป็นเหตุให้การสูญเสียเพิ่มขึ้น การสูญเสียนี้เรียกว่าการสูญเสียจากการโค้งงอจุลภาค (Micro Bending) ด้วยเหตุนี้ในการออกแบบโครงสร้างเส้นใยนำแสงจะต้องทำการป้องกันแรงกดจากทางด้านข้าง เช่นทำชั้นป้องกันการกระแทกหุ้มเส้นใยนำแสง เป็นต้น

(3) การสูญเสียที่เกิดจากการต่อเส้นใยนำแสง (Connection Loss)

กรณีที่ทำการต่อเส้นใยนำแสง 2 เส้นเข้าด้วยกันนั้น อันดับแรกจำเป็นต้องทำการปรับแกนทั้งสองที่แสงเดินทางผ่านให้ตรงกันพอดี ถ้าหากว่าแกนทั้งสองต่อกันไม่สนิทอย่างสมบูรณ์นั้น แสงที่ออกจากแกนด้านหนึ่งบางส่วนของมันจะไม่เข้าไปในแกนอีกด้านหนึ่ง แต่จะกระจายออกไปข้างนอกทำให้เกิดการสูญเสีย

(4) การสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างเส้นใยนำแสงกับอุปกรณ์กำเนิดแสงและอุปกรณ์รับแสง (Coupling Loss)

แสงที่ปล่อยออกจากอุปกรณ์ต้นกำเนิดแสงนั้น กรณีที่ใช้อุปกรณ์ต้นกำเนิดแสงได้แก่ เลเซอร์ไดโอด (LD) หรือไดโอดเปล่งแสง (LED) จะมีความแตกต่างกันทางความกว้างของลำแสงที่ปล่อยออกมาจากต้นกำเนิดแสง เลเซอร์ไดโอดจะมีการสูญเสียของการเชื่อมต่อแสงน้อยกว่า

2.4 เซนเซอร์แบบแบรกกเรตติง (Bragg Grating Sensor)

การพัฒนาทางด้านระบบการตรวจวัดโดยใช้เลเซอร์ส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ได้มีการนำเซนเซอร์แบบแบรกกเรตติง (Bragg Grating Sensor) มาใช้ร่วมด้วยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการตรวจวัดโครงสร้างของวัตถุ ซึ่งระบบการตรวจวัดนี้เป็นระบบการตรวจวัดความเครียด (แรงที่กระทำกับวัตถุและระยะยืดที่เกิดขึ้นภายในวัตถุ) หรืออุณหภูมิของวัตถุ

การสร้างเกรตติงบนเส้นใยแก้วนำแสง

เกรตติงเป็นอุปกรณ์ที่ตอบสนองความยาวคลื่นได้ในช่วงแคบๆ (Narrow Band) ใช้ในการสะท้อนความยาวคลื่นของแบรกก (Bragg Wavelength) ซึ่งความยาวคลื่นที่ใช้จะต้องสัมพันธ์กับช่องห่างระหว่างเกรตติงหรือที่เราเรียกว่าพิทช์ (Pitch : Λ) สามารถหาได้จากสมการ

$$\lambda_B = 2mn_c\Lambda \quad (2.7)$$

λ_B = ความยาวคลื่นของแบรกกที่เกิดการสะท้อนกลับ

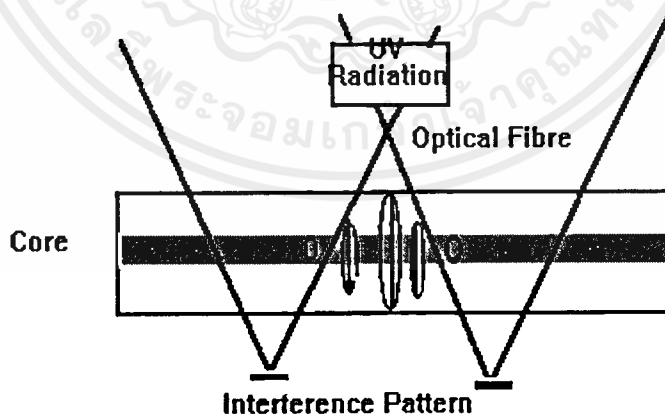
$m = 1, 2, 3, \dots, \infty$ (อันดับของเกรตติงที่เกิดการสะท้อนกลับของความยาวคลื่น, λ_B)

n_c = ดัชนีหักเหของแสง

การสร้างเกรตติงบนไฟเบอร์นี้มีวิธีสร้าง 3 วิธีด้วยกันคือ

1. การแทรกสอดจากแสงสองลำ (Two Beam Interference)
2. การแทรกสอดจากช่องเปิดหลายช่อง (Phase Mask)
3. การเขียนลงตรงๆ โดยใช้เลเซอร์กำลังสูง (Writing Grating Point By Point)

1. การแทรกสอดจากแสงสองลำ (Two Beam Interference) โดยการยิงลำแสงอุลตราไวโอเลต (Ultraviolet) 2 ลำที่มีความเข้มสูงไปที่เส้นใยแก้วนำแสงแล้วทำให้เกิดการแทรกสอดของลำทั้งสองขึ้นเกิดเป็นแถบมืดแถบสว่างบนเส้นใยแก้วนำแสง (เกรตติง)

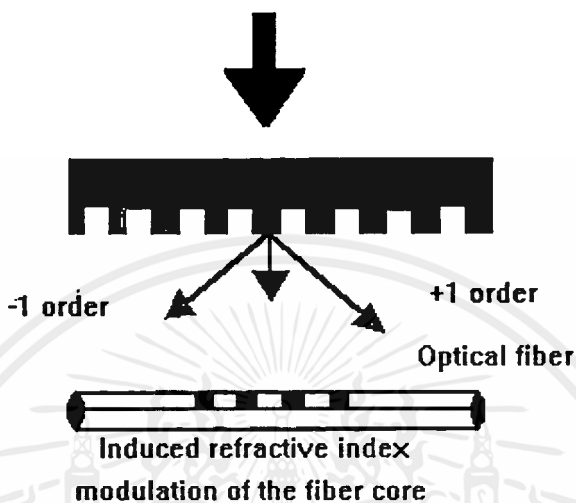


รูปที่ 2.18 เกรตติงที่เกิดจากการแทรกสอดของแสงอุลตราไวโอเลต 2 ลำ

2. การแทรกสอดจากช่องเปิดหลายช่อง (Phase Mask) โดยการฉาย Excimer Laser [Excimer Laser คือ แสงซึ่งเกิดจากการกระตุ้นของธาตุใหม่ 8A (ก๊าซเฉื่อย) มีความยาวคลื่นแสงประมาณ

175 - 351 nm] ให้ตกกระทบช่องเปิดหลายช่องจากนั้นแสงจะเลี้ยวเบนออกมาชนกันเกิดเป็นการแทรกสอดของแสงขึ้นจึงได้เป็นลายของเกรตติงขึ้นมา

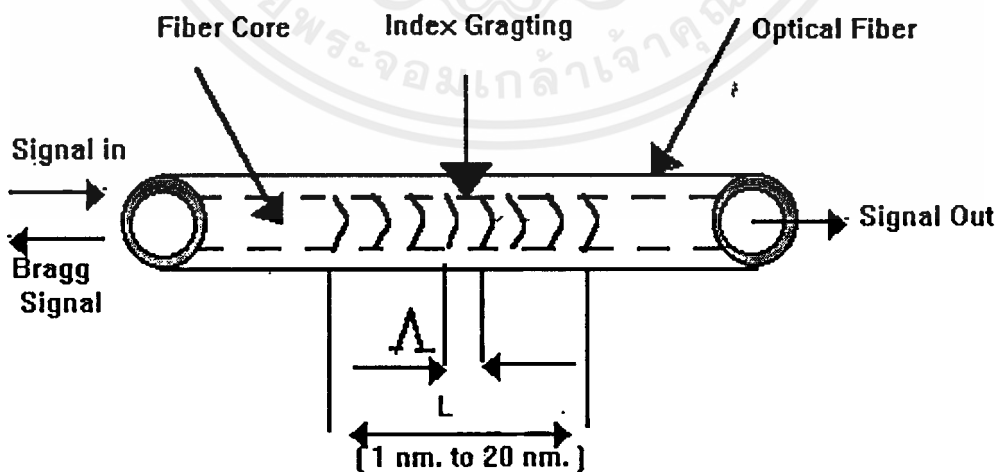
Excimer laser source [Kr or ArF]



รูปที่ 2.19 เกรตติงที่เกิดจากการยิงแสงเลเซอร์กระทบช่องเปิดหลายช่อง

3. การเขียนลงไปตรงๆ โดยใช้เลเซอร์กำลังสูง (Writing Grating Point By Point) วิธีนี้จะใช้พัลส์เดี่ยวของเลเซอร์แบบเอกซ์ไซเมอร์เขียนไปบนสลิคที่วางอยู่บนแกนของเส้นใยนำแสงซึ่งค่าดัชนีหักเหของแกนเปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสงจึงทำให้เกิดเป็นลายของเกรตติงขึ้นมา

โครงสร้างของแบรกกเซนเซอร์ (Bragg Sensor)



รูปที่ 2.20 แสดงโครงสร้างภายในเส้นใยแก้วนำแสงของเซ็นเซอร์แบบแบรกกเกรตติง

แบรคเซนเซอร์เป็นระบบการตรวจวัดซึ่งอาศัยความยาวคลื่นแสงในการตรวจวัด โดยสามารถให้ความละเอียดในการวัดได้น้อยกว่า 10^{-3} นาโนเมตร แต่เดิมระบบตรวจวัดนี้ใช้ตัววิเคราะห์สเปกตรัมทางแสง ซึ่งสิ่งเหล่านี้มีข้อจำกัดในการใช้งานและมีราคาสูง

ต่อมาระบบการตรวจวัดดังกล่าว ได้มีการพัฒนาในด้านต่างๆ เช่น โครงสร้างของระบบตรวจวัด รวมทั้งวิธีการดีมอดูเลชัน (Demodulation) ซึ่งทำให้มีระดับความสามารถในการวัดสูงขึ้น และความคลาดเคลื่อนมีน้อยลง

ข้อดีของการตรวจวัดโดยใช้วิธีเซนเซอร์แบบแบรคเกรตติง (Bragg grating sensor)

1. มีค่าความละเอียดสูง (High Resolution) ซึ่งมีค่าน้อยกว่า $1 \mu\text{strain}$, (μE), 10^{-6} % ต่อการเปลี่ยนแปลงความยาว 100 เมตร หรือ 0.1°C
2. ค่าที่วัดได้จะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของการวัด (เอาท์พุทที่ได้เป็นเส้นตรง)
3. สามารถทำการตรวจวัดอุณหภูมิได้หลายจุดรวมทั้งสามารถตรวจวัดปริมาณอย่างอื่นที่ต้องการ เช่น ความดันได้พร้อมๆกันภายในเส้นใยแก้ว 1 เส้น

การนำไปใช้ประโยชน์

ปัจจุบันนี้ ได้มีการนำแบรคเซนเซอร์มาใช้ประโยชน์ เช่น

- ที่สะพานเบดดิ้งตันเทรล (Beddington Trail) ในเมืองคาลการี รัฐอัลเบอร์ตาในประเทศแคนาดา ได้มีการนำเส้นใยแก้วนำแสงใส่ไว้ภายในโครงสร้างของสะพานเพื่อตรวจสอบสภาพการรับน้ำหนักของสะพาน
- ได้มีการนำแบรคเซนเซอร์ใช้กับปีกของเครื่องบิน เพื่อตรวจสอบสภาพของปีกเครื่องบินว่ามีสภาพพร้อมที่จะทำงานหรือไม่ ซึ่งจะทำการตรวจสอบก่อนเครื่องจะขึ้นและระหว่างการบินด้วย และยังสามารถตรวจสอบ อุณหภูมิ ความดัน และตำแหน่งหรือบริเวณที่มีการกระแทกได้ด้วย

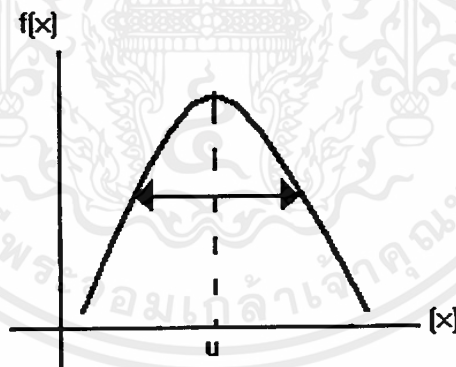
2.5 ฟังก์ชันความคลาดเคลื่อน (Error Function)

ฟังก์ชันความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์แบบแบรคเกรตติงเป็นผลของการสะท้อนกลับของย่านความถี่ที่สัมพันธ์กับเงื่อนไขของแบรค ซึ่งในทางทฤษฎีผลของการสะท้อนกลับของเงื่อนไขของแบรคเป็นการสะท้อนของความยาวคลื่นเดียว แต่ในการทดลองหรือทางปฏิบัติแล้วการสะท้อนกลับออกมานั้นเป็นย่านความถี่ เนื่องมาจากลักษณะการสร้างของแบรคเซนเซอร์และธรรมชาติของการกระจายความร้อนให้กับวัตถุ โดยลักษณะการสร้างของแบรคเซนเซอร์นั้นจะทำให้เกิดรบกวนบนเส้นใยแก้วนำแสงมีผลทำให้เส้นใยแก้วนำแสงกบบริเวณที่มีค่าดัชนีการหักเหของ

แสงเปลี่ยนไปห่ากันเป็นค่าหนึ่งหรือความยาวคลื่นแบรค (Λ) โดยในแบรคเซนเซอร์จะมีบริเวณดังกล่าวต่อเนื่องหลายๆ ครั้ง ซึ่งทำให้เงื่อนไขของการสะท้อนและการส่งผ่านของแสงเป็นไปตามเงื่อนไข แต่การสร้างบริเวณร็วรอยทำให้เกิดบริเวณของร็วรอยที่มีความห่าเท่ากันพอดีนั้นทำได้ยากหรือกล่าวได้ว่าบริเวณของร็วรอยนั้นมีขนาดเกือบจะเท่ากันทุกร็วรอย ทำให้เงื่อนไขการสะท้อนของแบรคเซนเซอร์ไม่เป็นความยาวคลื่นเดียว แต่จะเป็นย่านของความยาวคลื่นโดยจะมีค่าของความยาวคลื่นกลาง (Central Wavelength) เป็นบริเวณที่มีความเข้มสูงที่สุดแล้วกระจายออกด้านข้างทั้งสอง ในลักษณะของกราฟการกระจายแบบปกติซึ่งสามารถอธิบายด้วยคณิตศาสตร์ของการกระจายโดยการใช้สมการการกระจายแบบปกติ (Gaussian Distribution หรือ Normal Distribution) เมื่อ λ แทนความยาวคลื่นค่าต่างๆ และ μ แทนค่าความยาวคลื่นกลาง และค่า σ เป็นค่าการกระจายของความยาวคลื่น

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad -\infty < x < \infty \quad (2.8)$$

กราฟระหว่าง $f(x)$ กับ x จะเป็นดังรูปข้างล่าง



รูปที่ 2.21 แสดงกราฟของการกระจายแบบปกติ

2.6 อินเตอร์เฟียร์มิเตอร์: การวัดค่าความยาวคลื่นและการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่น

เครื่องมือที่ใช้ประโยชน์จากการแทรกสอดของแสงเรียกว่า อินเตอร์เฟียร์มิเตอร์ ในทางแสงเครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมี 2 ชนิด คือ ชนิดไมเคลสัน (Michelson Interferometer) และ ชนิดแฟบริ - เพอโรต์ (Fabry - Perot Interferometer)

ในการที่จะทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างแสงอาพันธ์ 2 ลำนั้น อินเตอร์เฟียร์มิเตอร์ จะทำการแยกลำแสงจากแหล่งกำเนิดออกเป็น 2 ส่วน หรือมากกว่านั้น แต่ละส่วนที่ถูกแยกออกไปจะมีการเคลื่อนที่ไปในตัวกลางเป็นระยะทางต่างๆกัน จากนั้นก็จะกลับมาพบกันและแทรก

เอกสารนี้จะมีการเคลื่อนที่ไปในตัวกลางเป็นระยะทางต่างๆกัน จากนั้นก็จะกลับมาพบกันและแทรก
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

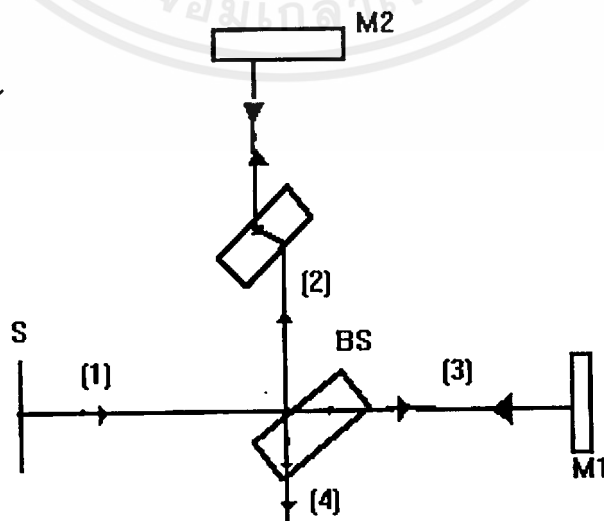
สอดกันทำให้เกิดภาพการแทรกสอดขึ้น ด้วยเหตุดังกล่าวจึงมีการแบ่งชนิดของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ตามการแยกลำแสงจากแหล่งกำเนิด กล่าวคือ

อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดแยกหน้าคลื่น (Wavefront Division Interferometer) ในเครื่องมือชนิดนี้จะมีการแยกหน้าคลื่นของลำแสงจากแหล่งกำเนิดแล้วนำแสงที่แยกออกไปเหล่านั้นมาแทรกสอดกัน ดังเช่นที่เกิดในกรณีของการแทรกสอดจากสลิตคู่ของยัง การแทรกสอดจากกระจกของลอยด์ และจากปริซึมคู่ของเฟรเนล

อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดแยกแอมพลิจูด (Amplitude Division Interferometer) เครื่องมือชนิดนี้จะใช้ตัวแยกลำแสงทำการแยกแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า (และสนามแม่เหล็ก) ของแสงจากแหล่งกำเนิด แล้วนำแอมพลิจูดมารวมกันในที่สุด อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดไมเคลสัน และชนิดเพบริ - เพอโรต์ก็จัดเป็นเครื่องมือชนิดนี้ แต่ทั้งสองจะมีลักษณะการแยกลำแสงที่แตกต่างกัน

2.6.1 อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดไมเคลสัน

หลักการของเครื่องมือชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.22 S เป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบแผ่กระจายให้ลำแสง (1) ออกมา เมื่อลำแสงนี้ไปตกกระทบที่ตัวแยกลำแสง (Beam Splitter; BS) (BS ในเครื่องมือนี้จะเป็นแท่งแก้วที่ฉาบผิวเพื่อให้เกิดการสะท้อนได้ 50 %) จะเกิดการแยกลำแสงออกเป็น 2 ลำที่มีแอมพลิจูดเท่ากัน คือลำแสงสะท้อน (2) และลำแสงที่ส่งผ่านไป (3) ลำแสงทั้งสองลำนี้จะไปสะท้อนที่กระจก M_1 และ M_2 และกลับมาตามแนวเดิมไปสู่ตัวแยกลำแสงอีกครั้งหนึ่ง ในครั้งนี้ลำแสง (2) จะทะลุผ่านและลำแสง (3) จะสะท้อนที่ตัวแยกลำแสงแล้วออกไปด้วยกันเป็นลำแสง (4) และทำให้เกิดการแทรกสอดขึ้น



รูปที่ 2.22 แสดงหลักการของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดไมเคลสัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจก M_1 และ M_2 สามารถปรับให้ตั้งฉากซึ่งกันและกันได้โดยใช้สกรูที่ติดอยู่ด้านหลัง นอกจากนี้กระจกบานหนึ่งยังสามารถเลื่อนเข้า - ออกได้ตามแนวของลำแสง การเลื่อนนี้จะทำให้ความแตกต่างระยะทางแสง (Optical Path Difference; OPD) ของลำแสง (2) และ (3) มีค่าเปลี่ยนแปลงได้ตามต้องการ ในรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าลำแสง (2) และ (3) มีการเคลื่อนที่ผ่านตัวแยกลำแสงไม่เท่ากัน กล่าวคือลำแสง (2) ผ่านเพียง 1 ครั้งในขณะที่ลำแสง (3) ผ่านถึง 3 ครั้ง เพื่อแก้ปัญหาที่ความแตกต่างระยะทางแสงจากลำแสงทั้งสองลำที่เคลื่อนที่ในตัวแยกลำแสงไม่เท่ากันจึงได้มีการเพิ่มอุปกรณ์อีกชิ้นหนึ่งคือตัวชดเชย (Compensator) C เข้าไปในแนวของลำแสง (2) โดยให้ C เป็นแก้วชนิดเดียวกับตัวแยกลำแสงและมีความหนาเท่ากันวางขนานกันกับตัวแยกลำแสง ด้วย ลำแสง (2) จึงมีการเคลื่อนที่ผ่านแผ่นแก้ว 3 ครั้งเท่ากับลำแสง (3)

การนำอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิด ไมเคลสันไปใช้ประโยชน์

เราสามารถนำอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิด ไมเคลสันไปใช้ในการวัดความหนาของฟิล์มบางนำไปตัดแปลงใช้ในการวัดดัชนีหักเหของแก๊สต่างๆ ใช้ในการวัดความแตกต่างของความยาวคลื่นของเส้นสเปกตรัมที่อยู่ใกล้กันมาก เช่น ถ้ามีเส้นสเปกตรัม 2 เส้นที่มีค่าความยาวคลื่น λ และ λ' ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก เมื่อนำแสงนี้มาศึกษาด้วยเครื่องมือชนิดนี้จะทำให้ได้ชุดของวงมืด - สว่างเป็น 2 ชุด โดยแต่ละชุดจะสอดคล้องกับความยาวคลื่นแต่ละค่าตามสมการ

$$2d \cos\theta = m\lambda ; \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{สำหรับวงมืด}) \quad (2.9)$$

ถ้าเราสังเกตวงมืด - สว่างใกล้จุดศูนย์กลาง นั่นคือ $\cos\theta \cong 1$ และให้ d คงที่ จะได้

$$m\lambda = m'\lambda' \quad (2.10)$$

ชุดของวงมืด - สว่างของแต่ละความยาวคลื่นนี้อาจซ้อนทับกันหรือไม่ก็ได้ขึ้นกับค่า d ในกรณีที่มีการซ้อนทับกันจะมองเห็นภาพการแทรกสอดคมชัด แต่ถ้าชุดของวงมืด - สว่างชุดหนึ่งมีวงมืดไปอยู่ตรงตำแหน่งวงสว่างของอีกชุดหนึ่งจะมองเห็นภาพการแทรกสอดมีความสว่างค่อนข้างสม่ำเสมอโดยตลอด ดังนั้นถ้าเราปรับระยะระหว่างกระจกไป 2 ตำแหน่ง โดยให้แต่ละตำแหน่งเกิดการซ้อนทับของชุดวงมืด - สว่างทั้งสอง ก็จะสามารถนำผลไปหาค่าความแตกต่างของความยาวคลื่นได้ดังนี้

ในขณะที่ชุดของวงมืด - สว่างทั้งสองซ้อนทับกัน แสดงว่าอันดับที่ของวงของทั้ง 2 ชุดเท่ากัน นั่นคือ

$$m = m' + N \quad (2.11)$$

ถ้าให้ d_1 เป็นความแตกต่างระยะทางแสงของกระจกในขณะนั้น จะได้

$$\frac{2d_1}{\lambda} = \frac{2d_1}{\lambda'} + (N) \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่หอสมุดฯ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไป (เผยแพร่) โยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อไปถ้าปรับระยะ OPD ระหว่างกระจกให้เป็น d_2 และทำให้เกิดการซ้อนทับของชุดวงมืด - สว่าง อีกครั้งหนึ่ง ก็จะได้

$$m = m' + (N + 1) \tag{2.13}$$

หรือ

$$\frac{2d_2}{\lambda} = \frac{2d_2}{\lambda'} + (N + 1) \tag{2.14}$$

สมการ (2.12) และ (2.13) เขียนได้ใหม่ โดยใช้ $\Delta d = d_2 - d_1$ และ $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ เป็น

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda\lambda'}{2\Delta d} \tag{2.15}$$

หรือ

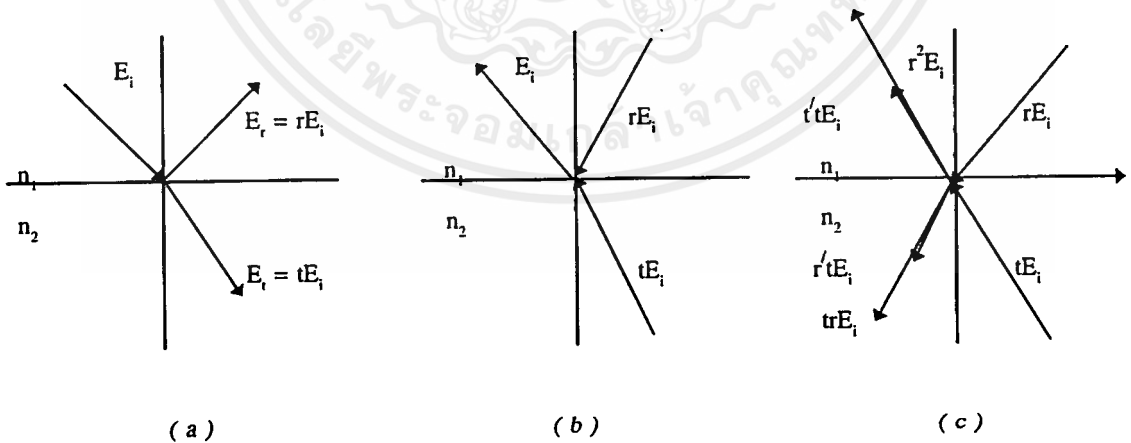
$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2\Delta d} \tag{2.16}$$

เนื่องจาก λ และ λ' มีค่าใกล้เคียงกัน

2.6.2 การแทรกสอดจากลำแสงหลายลำในแผ่นคู่ขนาน (Multiple - Beam Interference)

ในการศึกษาอินเตอร์เฟียร์อิมิตอร์ข้างต้นเป็นกรณีที่เกี่ยวข้องกับการแยกลำแสงออกเป็น 2 ลำ แล้วทำให้ทั้งสองลำกลับมารวมกันอีก แต่สำหรับอินเตอร์เฟียร์อิมิตอร์ชนิดเพปรี - เพอโรต์นั้น ลำแสง 2 ลำที่ถูกแบ่งจะเกิดการสะท้อนอีกหลายครั้งทำให้ได้ลำแสงที่มารวมกันมีหลายลำแสง

โดยปกติแล้ว เมื่อมีลำแสงตกกระทบผิวรอยต่อของตัวกลางคู่ใดๆจะเกิดการหักเหผ่านไปในตัวกลางหนึ่งและการสะท้อนกลับในอีกตัวกลางหนึ่งเสมอ



รูปที่ 2.23 แสดงการสะท้อนและการหักเหของแสง

จากรูปที่ 2.23 ถ้าให้

E_i แทนแอมพลิจูดของแสงตกกระทบ

E_r แทนแอมพลิจูดของแสงสะท้อน

E_t แทนแอมพลิจูดของแสงที่ทะลุผ่าน

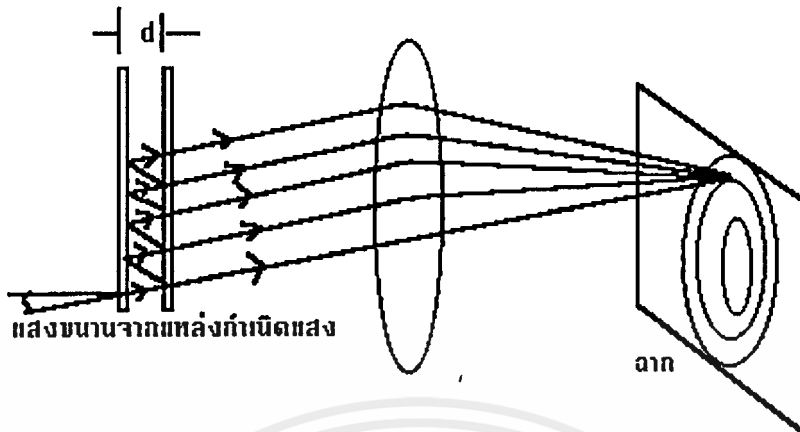
$$\text{และกำหนดให้ สัมประสิทธิ์การสะท้อน } r \equiv \frac{E_r}{E_i}$$

(2.17)

$$\text{สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน } t \equiv \frac{E_t}{E_i}$$

ในรูปที่ 2.23 จะเห็นได้ว่าที่ผิวรอยต่อระหว่างตัวกลาง n_1 และ n_2 แสงตกกระทบ E_i จะแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ แสงสะท้อน rE_i และแสงส่งผ่าน tE_i

เรานำผลข้างต้นนี้ไปใช้ในการศึกษาการสะท้อนหลายๆครั้งระหว่างผิวขนานกันดังรูปที่ 2.24 โดยให้ลำแสงตกกระทบมีแอมพลิจูด E_0 และตกกระทบที่มุม θ_i และให้ r กับ t เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านในกรณีการสะท้อนภายนอก ส่วน r' กับ t' เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านในกรณีการสะท้อนภายใน จากรูปนี้เราจะเห็นว่าถ้าเราใช้ลำแสงตกกระทบเพียงลำเดียวจะมีลำแสงสะท้อนกลับขึ้นไป และลำแสงที่ส่งผ่านไปอีกด้านหนึ่งจำนวนมากมายังลำแสงสะท้อนหรือลำแสงหักเหซึ่งเป็นแสงอาพันธ์เหล่านี้จะแทรกสอดกัน และเราสามารถสังเกตดูได้โดยการนำเลนส์นูนมารวมแสง ดังแสดงในรูปสำหรับกรณีของแสงหักเหที่ผ่านออกไป



รูปที่ 2.25 แสดงแผนภาพของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพริ-เพอโรต์

มีการใช้แผ่นแก้วหรือควอตซ์ 2 แผ่นวางขนานกันเพื่อทำให้เกิดฟิล์มอากาศที่มีผิวสองด้านขนานกัน แผ่นแก้วหรือควอตซ์ที่ใช้ต้องมีด้านในเรียบมากและสะท้อนดีมากด้วย การสะท้อนนี้ทำได้โดยฉาบโลหะบางชนิด เช่น เงินหรืออะลูมิเนียมบางส่วนไว้บนแผ่นแก้วหรือควอตซ์นั้นเพื่อให้แสงผ่านทะลุจากภายนอกเข้าไปสะท้อนระหว่างแผ่นแก้วหรือควอตซ์ทั้งสองได้ ชนิดของโลหะที่ฉาบต้องเลือกให้เหมาะกับช่วงของความยาวแสงที่ใช้ เช่น เงินจะให้การสะท้อนดีในย่านที่ตามองเห็น แต่ในช่วง 400 นาโนเมตรการสะท้อนจะไม่ดี ส่วนอะลูมิเนียมจะให้การสะท้อนในช่วง 400 นาโนเมตรได้ดีกว่าเป็นต้น การฉาบฟิล์มโลหะนี้ต้องฉาบเรียบและบาง ความเรียบต้องเรียบกว่า $\lambda/50$ และควรบางประมาณ 50 นาโนเมตร เพื่อให้แสงสามารถส่งผ่านได้ด้วย ระยะห่างระหว่างแผ่นแก้วหรือควอตซ์นี้มีความสำคัญมากเพราะเป็นความหนาของฟิล์ม d ที่ทำให้เกิดการแทรกสอด ความหนานี้อาจทำให้คงที่หรือปรับค่าได้ก็ได้ ถ้าช่องว่างหรือระยะระหว่างแผ่นแก้วหรือควอตซ์เปลี่ยนแปลงได้อุปกรณ์นี้จะเรียกว่า “อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์” แต่ถ้าระยะระหว่างแผ่นแก้วหรือควอตซ์ถูกยึดให้คงที่ด้วยการใส่แผ่นวัสดุที่มีความหนาค่าหนึ่ง (เรียกว่า Spacer) ระหว่างแผ่นแก้วหรือควอตซ์ทั้งสองอุปกรณ์นี้จะเรียกว่า “เอตาลอน” (Etalon)

จากรูปมีแหล่งกำเนิดแสงชนิดความยาวคลื่นเดียว ให้แสงลำหนึ่งออกมาโดยทำมุม θ ดังรูป 2.25 ลำแสงนี้จะทำให้เกิดการสะท้อนหลายๆครั้งและมีแสงหักเหผ่านออกไปอีกด้านหนึ่งไปรวมกันด้วยเลนส์นูนและเกิดภาพการแทรกสอดบนฉาก ลักษณะของภาพการแทรกสอดที่เกิดขึ้นนี้สามารถหาได้จากสมการ

$$\Delta = 2n_g d \cos \theta = 2d \cos \theta \quad \text{โดยใช้ } n_r = 1 \quad (2.18)$$

โดย Δ คือค่าผลต่างของระยะทางทางแสงของลำแสงที่ทะลุผ่านคู่วัดที่ติดกัน

d คือระยะระหว่างผิวสะท้อนแสงของแผ่นแก้วหรือควอตซ์ทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

θ คือมุมที่แสงทำกับเส้นตั้งฉากของผิวแผ่นแก้วหรือควอตซ์

$$\text{ดังนั้น} \quad \delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{4\pi}{\lambda} d \cos\theta \quad (2.19)$$

โดยที่ δ = ผลต่างของมุมทางแสง (phase difference)

ดังนั้นโดยการคิดแฟกเตอร์ของความต่างเฟส $e^{i\delta}$ ในแต่ละอัมปลิจูดของอัมปลิจูดของลำแสงที่ทะลุผ่านแล้วหาผลรวม จะได้ว่า

$$\begin{aligned} E_T &= E_0 t^2 + E_0 t^2 r^2 e^{i\delta} + E_0 t^2 e^{i2\delta} + \dots \\ &= \frac{E_0 t^2}{1 - r^2 e^{i\delta}} \end{aligned} \quad (2.20)$$

ความเข้มของอัมปลิจูดของลำแสงที่ทะลุผ่าน คือ

$$I_T = E_T^2 = E_T E_T^* = \frac{E_0^2 t^4}{(1 - r^2 e^{i\delta})(1 - r^2 e^{-i\delta})} \quad (2.21)$$

พิจารณาส่วนของสมการที่ (2.21)

$$\begin{aligned} (1 - r^2 e^{i\delta})(1 - r^2 e^{-i\delta}) &= (1 + r^4) - r^2(e^{i\delta} + e^{-i\delta}) \\ &= (1 + r^4) - 2r^2 \cos\delta \\ &= (1 - r^2)^2 + 2r^2(1 - \cos\delta) \end{aligned}$$

$$\text{แต่ } \cos\delta = 1 - 2\sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad (1 - r^2)^2 + 2r^2(1 - \cos\delta) &= (1 - r^2)^2 + 4r^2 \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \\ &= (1 - R)^2 + 4R \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \\ &= (1 - R)^2 \left[1 + \frac{4R \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)}{(1 - R)^2} \right] \end{aligned}$$

แทนใน (2.21)

$$I_T = \frac{I_0 T^2}{(1 - R)^2} \left[\frac{1}{1 + \frac{4R \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)}{(1 - R)^2}} \right] \quad (2.22)$$

ในที่นี้ $I_0 = E_0^2$

= ความเข้มของลำแสงตก

$$R = r^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \text{ค่าการสะท้อน (reflectance)} = \frac{I_R}{I_0}$$

$$T = t^2$$

$$= \text{ค่าการส่งผ่าน (transmittance)} = \frac{I_T}{I_0}$$

Fringe Profile - Airy Function

ค่าความเข้มของภาพการแทรกสอดจากอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดแฟบริ - เพอโรต์บนริ้วสว่างหนึ่งๆ จะไม่เท่ากันที่ทุกๆ จากขอบหนึ่งถึงอีกขอบหนึ่งของริ้ว จึงเรียกชื่อว่าภาพความเข้มของริ้วรอย (Fringe Profile) ความคมชัดของภาพการแทรกสอดมีส่วนสำคัญมากต่อกำลังแยก (Resolving Power) ของเครื่องมือนี้ จากสมการ

$$I_T = \left[\frac{(1-r^2)^2}{1+r^4-2r^2 \cos \delta} \right] I_0, \Delta \lambda = 0.01 \text{ nm}$$

เมื่อ $\Delta T = 1^\circ \text{C}$ (2.23)

และใช้ความสัมพันธ์ $\cos \delta = 1 - 2 \sin^2 \left(\frac{\delta}{2} \right)$

จะทำให้เขียนค่าการทะลุผ่าน (Transmittance) T หรือเรียกว่าแอร์ฟังก์ชัน [Airy Function (A)] ได้เป็น

$$T = \frac{I_T}{I_0} = \frac{1}{1 + \left[\frac{4r^2}{(1-r^2)^2} \right] \sin^2 \left(\frac{\delta}{2} \right)} = A \quad (2.24)$$

ค่าในวงเล็บคือ $4r^2 / (1-r^2)^2$ ขึ้นกับสัมประสิทธิ์การสะท้อนเพียงอย่างเดียวเท่านั้น คำนี้นี้เรียกว่าสัมประสิทธิ์ฟิเนส (Coefficient of Finesse) ใช้สัญลักษณ์ว่า F

นั่นคือค่าสัมประสิทธิ์ฟิเนสส์ $F = \frac{4R}{(1-R)^2}$ (2.25)

ซึ่งเป็นค่าที่บอกความคมชัดของวงการแทรกสอด

ดังนั้นแอร์ฟังก์ชัน $A = \frac{1}{1 + F \sin^2 \left(\frac{\delta}{2} \right)}$ (2.26)

ดังนั้นสมการ (2.22) จะเป็น

$$I_T = \frac{I_0 T^2}{(1-R^2)} \frac{1}{1 + F \sin^2 \left(\frac{\delta}{2} \right)}$$

$$= \frac{I_0 T^2}{(1-R^2)} A \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน r มีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1 จึงทำให้ค่า F มีค่าอยู่ระหว่าง 0 กับ ∞ ค่า F นี้ สามารถใช้บอกความคมชัดของภาพการแทรกสอดได้ในระดับหนึ่ง กล่าวคือ

$$\text{ถ้ากำหนดค่าความคมชัดเป็น } \frac{(I_T)_{\max} - (I_T)_{\min}}{(I_T)_{\min}} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\min}}$$

จากสมการ (2.27) จะเห็นว่า

$$1. I_T \text{ มีค่าสูงสุด คือ } T_{\max} = 1 \text{ เมื่อ } \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) = 0$$

$$\left(\frac{\delta}{2}\right) = n\pi$$

$$\text{หรือ } \delta = 2n\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.28)$$

$$I_T(\max) = \frac{I_0 T^2}{(1-R)^2} \quad (2.29)$$

ในกรณีนี้ $A = 1$ สำหรับทุกค่าของ F หรือทุกค่าของ R

$$2. I_T \text{ มีค่าต่ำสุด คือ } T_{\min} = \frac{1}{1+F} \text{ เมื่อ } \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) = 1$$

$$\left(\frac{\delta}{2}\right) = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots$$

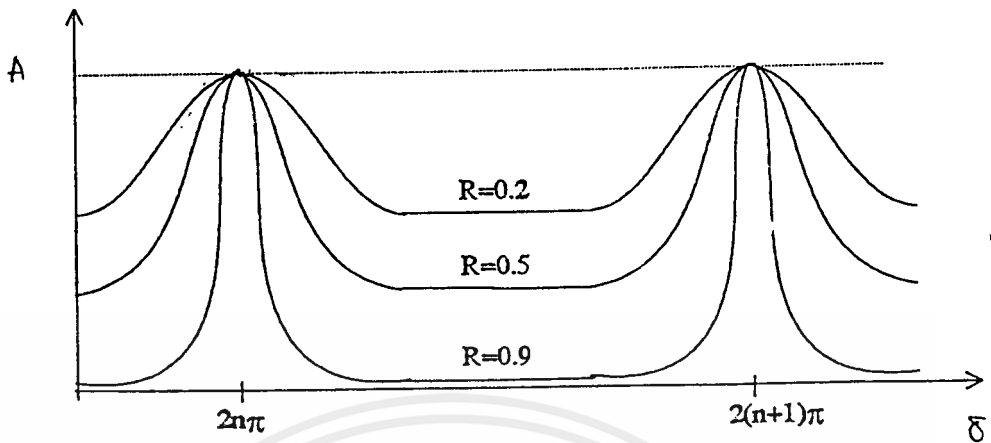
$$\delta = (2n+1)\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.30)$$

$$I_T(\min) = \frac{I_0 T^2}{(1+R)^2} = \frac{1}{1+F} \quad (2.31)$$

เมื่อให้ $I_0 = 1$ และ $T^2 = (1-R)^2$

$$\text{ดังนั้นความคมชัดของภาพการแทรกสอด} = \frac{1 - \frac{1}{1+F}}{\frac{1}{1+F}} = F \quad (2.32)$$

แต่ละค่าของ F จะให้กราฟของแอมพลิจูด (A) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ δ จากสมการ (2.27) ค่าของ A จะมีผลต่อ I_T ซึ่งกราฟที่ได้แสดงในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 กราฟแอร์ฟังก์ชันที่ให้การกระจายความเข้มของริ้วรอย
ในการแทรกสอดจากลำแสงหลายลำในแผ่นคู่ขนาน

จากรูปเป็นการแสดงภาพความเข้มของริ้วรอยของค่า R คือ 0.2, 0.5 และ 0.9 ภาพของแต่ละริ้วรอยจะเห็นว่า T_{\max} มีค่าเป็น 1 ที่ $\delta = 2n\pi$ และ T_{\min} เป็น $1 / 1 + F$ ที่ $\delta = (n + 1/2)2\pi$ นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่า T_{\max} เป็น 1 เสมอไม่ว่า r มีค่าเท่าใด ส่วน T_{\min} มีค่าไม่เท่ากันและจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อ r เข้าใกล้ 1 ภาพความเข้มของภาพความเข้มของริ้วรอยมีส่วนสัมพันธ์กับค่า r อย่างมาก กล่าวคือค่า r ยิ่งเข้าใกล้ 1 ยอดของภาพความเข้มของริ้วรอยก็ยิ่งแหลมคมและขนาดของภาพความเข้มของริ้วรอยก็จะยิ่งแคบทำให้มีความคมชัดมากขึ้น อนึ่ง T จะมีค่าเข้าใกล้ 1 เมื่อเข้าใกล้ $2n\pi$ และจะมีค่าเกือบเป็นศูนย์ที่ δ ค่าอื่นๆดังรูปของภาพความเข้มของริ้วรอย สำหรับ $r = 0.9$ เป็นต้น

พิจารณาเงื่อนไขที่ I_r จะมีค่าสูงสุด

จากสมการที่ (2.28)

$$\delta = 2n\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

จากสมการที่ (2.19) $\delta = \frac{4\pi}{\lambda} d \cos\theta$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$2n\pi = \frac{4\pi}{\lambda} d \cos\theta$$

ดังนั้นเงื่อนไข I_r มีค่าสูงสุด หรือเงื่อนไขของริ้วสว่างคือ

$$2d \cos\theta = n\lambda, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.33)$$

ทำนองเดียวกันเงื่อนไข I_r มีค่าต่ำสุด หรือเงื่อนไขของริ้วมืดคือ

$$2d \cos\theta = (n + 1/2)\lambda, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.33) ที่จุดศูนย์กลางของรูปแบบวงรีร้อย $\theta = 0$ นั่นคือ รี้วสว่างกลาง (Central Bright Fringe) จะมีอันดับ $n = \frac{2d}{\lambda}$ และค่า n จะลดลงสำหรับรี้วที่ห่างจุดศูนย์กลางออกมา (เพราะว่า θ เพิ่มขึ้น)

สำหรับแหล่งกำเนิดแสงโซเดียมซึ่งให้เส้นสเปกตรัม 2 เส้น λ_1 และ λ_2 ถ้าเราปรับให้รี้วทั้ง 2 ชุดซ้อนกันเมื่อระยะระหว่างแผ่นแก้วหรือควอตซ์เท่ากับ d_1 ดังนั้น

$$2d_1 = m\lambda_1 = n\lambda_2 \quad (2.35)$$

ต่อไปค่อยๆเพิ่มระยะระหว่างแผ่นแก้วหรือควอตซ์จนกระทั่งรี้วทั้งสองชุดซ้อนกันอีกครั้งหนึ่ง สมมติว่าระยะระหว่างแผ่นแก้วหรือควอตซ์เป็น d_2 ให้อันดับของ λ_1 เปลี่ยนไป k และอันดับของ λ_2 จะเปลี่ยนไป $k + 1$ ดังนั้น

$$2d_2 = (m + k) \lambda_1 = (n + k + 1) \lambda_2 \quad (2.36)$$

$$2(d_2 - d_1) = k\lambda_1 = (k + 1)\lambda_2$$

$$\text{จาก } k\lambda_1 = (k + 1)\lambda_2 \quad \text{จะได้}$$

$$k(\lambda_1 - \lambda_2) = \lambda_2$$

$$\lambda_1 - \lambda_2 = \frac{\lambda_2}{k}$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_2}{k}$$

(2.37)

$$\text{แต่จาก } 2(d_2 - d_1) = k\lambda_1$$

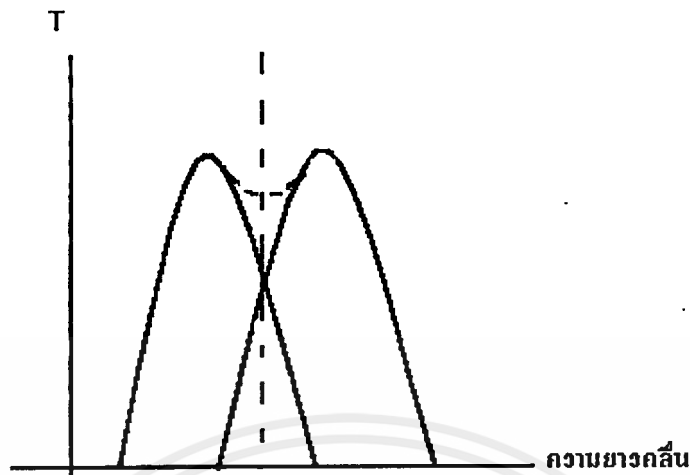
$$\text{ดังนั้น } \frac{1}{k} = \frac{\lambda_1}{2(d_2 - d_1)}$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_1\lambda_2}{2(d_2 - d_1)}$$

$$= \frac{\lambda_{\text{avg}}^2}{2\Delta d} \quad (2.38)$$

กำลังแยก (Resolving Power)

อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดแฟบริ - เพอโรต์จัดได้ว่าเป็นเครื่องมือที่มีกำลังแยกสูงมากเครื่องหนึ่ง ถ้าพิจารณาลำแสงตกกระทบว่าประกอบด้วยความยาวคลื่น 2 ค่า ภาพการแทรกสอดของเครื่องมือชนิดนี้ก็จะเห็นชุดวงกลมมืด - สว่าง 2 ชุด ถ้าเราพิจารณา 2 ชุดนี้เปรียบเทียบกันจะได้ผลดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 แสดงการเปรียบเทียบภาพความเข้มของรีวรอยของความยาวคลื่น 2 ค่า

ในรูปที่ 2.27 แสดงภาพความเข้มของรีวรอยของแต่ละความยาวคลื่น ยอดของภาพจะห่างกันมากหรือน้อยขึ้นกับความแตกต่างของความยาวคลื่นทั้งสอง ถ้าความแตกต่างยังน้อย ยอดภาพจะยิ่งชิดกันมากขึ้น และอาจจะยากต่อการบอกความแตกต่างนั้น

จากนิยามของกำลังแยก

$$\mathcal{R} \equiv \frac{\lambda}{(\Delta\lambda)_{\min}}$$

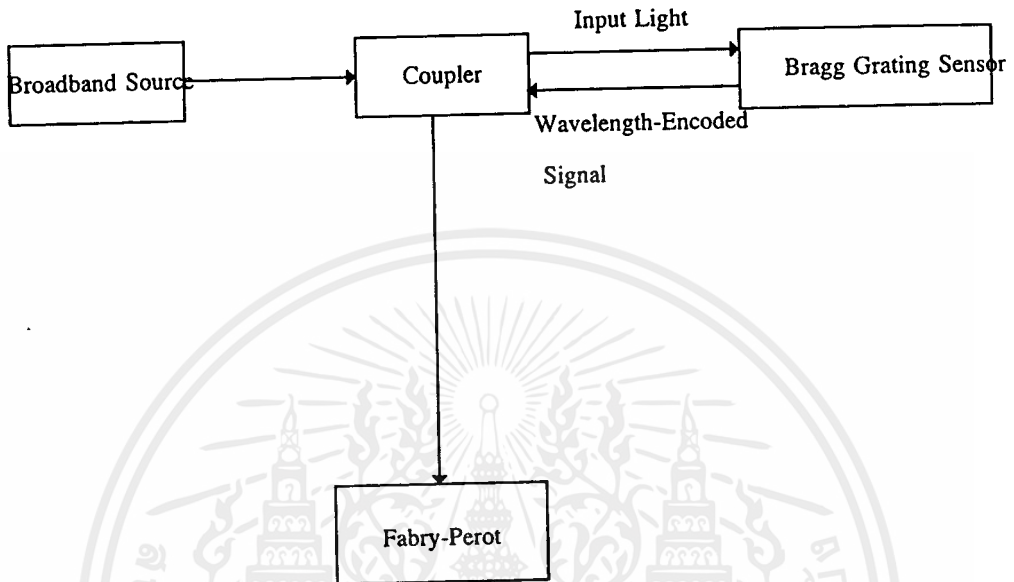
สำหรับอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดเพบริ - เพอโรต์ จะได้

$$\mathcal{R} = \frac{\pi}{2} n\sqrt{F} \quad (2.39)$$

โดยทั่วไปแล้ว ค่ากำลังแยกยิ่งสูงจะทำให้การแยกยิ่งดีขึ้น ในกรณีของเพบริ - เพอโรต์ นี้ ค่ากำลังแยกจะยิ่งมากขึ้นถ้า n หรืออันดับที่ของวงยิ่งมากขึ้น (หรือที่ใกล้ๆจุดศูนย์กลางของวง) และถ้าค่า F มากขึ้นด้วย

2.7 หลักการทำงาน

จากรูปการทดลองที่กล่าวไว้ในบทที่แล้ว



รูปที่ 2.28 ระบบการวัดอุณหภูมิโดยใช้เซ็นเซอร์แบบแบรกกเรตติง

เราสามารถอธิบายการทำงานจากรูปได้ว่า เมื่อป้อนแสงจากแหล่งกำเนิดแสงหลายความยาวคลื่น (Broadband Source) เข้าไปในสายเส้นใยแก้วนำแสง แสงเดินทางภายในเส้นใยแก้วนำแสงจนถึงแบรกกเรตติงที่ทำหน้าที่คล้ายเกรตติงและทำหน้าที่เป็นตัวตรวจวัดด้วย ตรงบริเวณที่เป็นแบรกกเรตติงนั้นจะมีค่าดัชนีหักเหแตกต่างจากบริเวณอื่นในเส้นใยแก้วนำแสงจึงทเดินทางมายังแบรกกเรตติงนี้เกิดการหักเหและมีแสงบางส่วนเกิดการสะท้อนกลับ โดยความยาวคลื่นของแสงที่สะท้อนกลับมานี้จะเป็นแสงที่มีค่าความยาวคลื่นเป็นไปตามเงื่อนไขของแบรกก คือ

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.40)$$

ณ อุณหภูมิหนึ่ง จะมีค่าความยาวคลื่นค่าหนึ่งที่สะท้อนกลับจากแบรกกเรตติงมายังตัวแพบริ-เพอโรต์ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง เส้นใยแก้วนำแสงจะเกิดการยืดหดตัวได้ทำให้ระยะห่างของแบรกกเรตติงเกิดการเปลี่ยนแปลง จึงทำให้ระยะห่างระหว่างระนาบแบรกกเปลี่ยนแปลง ดังนั้นความยาวคลื่นแสงที่สอดคล้องกับเงื่อนไขของแบรกกจึงเปลี่ยนแปลงไป จะทำให้ค่าความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับเงื่อนไขของแบรกกเปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ความยาวคลื่นจะถูกวัดค่าได้ด้วยอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ซึ่งที่ใช้ในที่นี้คือแพบริ-เพอโรต์

วิธีวัดความแตกต่างของความยาวคลื่นโดยแฟบริเพอโรต์

1. ตอนแรกเราต้องทำการปรับเทียบอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแฟบริ-เพอโรต์ก่อน โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียมนีออนซึ่งมีค่าความยาวคลื่นที่ทราบค่า เพื่อใช้หาค่าคงที่ของการเลื่อนไปของกระจกต่อการเลื่อนไปของไมโครมิเตอร์ ซึ่งกำหนดให้เป็นค่า K

$$K = \frac{\text{ระยะที่กระจกเลื่อน}}{\text{ระยะที่ไมโครมิเตอร์เลื่อน}} \quad (2.41)$$

เริ่มแรกนับจำนวนริ้วที่หายไปหรือเกิดขึ้นใหม่ที่จุดกลางของระบบริ้วการแทรกสอดบนฉากหรืออาจจะสังเกตจุดที่กำหนดที่อยู่ข้างๆจุดกลางของระบบริ้ว วิธีการนับริ้วให้นับทีละ 10 ริ้ว แล้วอ่านตำแหน่งบนไมโครมิเตอร์บันทึกไว้ นับจนถึงริ้วที่ 190 แล้วหาผลต่างระหว่างค่าที่อ่านได้จากไมโครมิเตอร์สำหรับริ้วที่ศูนย์กับริ้วที่ 100 ริ้วที่ 10 กับริ้วที่ 110 ริ้วที่ 20 กับริ้วที่ 120 ไปเรื่อยๆจนกระทั่งถึงริ้วที่ 90 กับริ้วที่ 190 ค่าเฉลี่ยของข้อมูลนี้เป็นค่าเฉลี่ยที่ไมโครมิเตอร์เลื่อนไปได้ เมื่อจำนวนริ้วผ่านจุดที่สังเกตเป็นจำนวน 100 ริ้ว จากค่าที่ได้นี้ถ้าทราบความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ก็สามารถคำนวณหาอัตราส่วนการเลื่อนไปของกระจกต่อการเลื่อนไปของไมโครมิเตอร์ได้โดยใช้สมการ

$$2d = m\lambda \quad (2.42)$$

2. เมื่อมีแสงมายังแฟบริเพอโรต์ขณะที่ยังไม่ใส่กล้องเทเลสโคป (Telescope) ให้ปรับกระจกทั้งสองแผ่นเพื่อให้ขนานกันตามลำดับต่อไปนี้

- ใช้แผ่นไอริส (Iris Diaphragm) โดยปรับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่ให้โตมากนักกว้างไว้ระหว่างต้นกำเนิดแสงกับคอลเลคเตอร์เลนส์ (Collector Lens) แล้วปรับสกรูที่อยู่ทางด้านหลังของกระจกแผ่นที่สองจนกระทั่งได้ภาพของแผ่นไอริส (Iris Diaphragm) ชัดเจนภาพเดียว

- ถ้ากระจกทั้ง 2 แผ่นเกือบจะขนานกันจะเกิดริ้ววงกลมที่มีศูนย์กลางร่วมกันซึ่งคมมากให้เห็นทันที

- ใส่กล้องเทเลสโคป (Telescope) ซึ่งได้โฟกัสไว้ที่อนันต์เรียบร้อยแล้ว
- ขณะนี้จะเห็นริ้วการแทรกสอด 2 ชุด ถ้าริ้วที่เห็นยังคมไม่มากแสดงว่าริ้วทั้ง 2 ชุด ยังไม่ขนานกันให้ทำการปรับสกรูทั้งสองข้างหลังกระจกอีกเล็กน้อย

เมื่อได้ริ้วที่คมชัดและสมมาตรดีแล้วก็เริ่มหมุนไมโครมิเตอร์จนกระทั่งริ้วการแทรกสอดของทั้งสองชุดซ้อนทับกันพอดีหรืออาจจัดให้อยู่ในลักษณะที่ริ้วทั้งสองชุดกำลังจะแยกกันพอดีให้อ่านตำแหน่งบนไมโครมิเตอร์แล้วบันทึกไว้ให้เป็น D_1 จากนั้นหมุนไมโครมิเตอร์ต่อไป จะเห็นว่าริ้วทั้งสองแยกออกจากกันและจะค่อยๆเข้ามารวมกันใหม่ ตำแหน่งที่ริ้วการแทรกสอดของทั้งสองชุดซ้อนทับกันพอดีหรือตำแหน่งที่ริ้วทั้งสองชุดกำลังจะแยกกันพอดีอีกครั้งหนึ่งให้อ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งนั้นไมโครมิเตอร์แล้วบันทึกไว้ให้เป็น D_2 จะได้ระยะที่ไมโครมิเตอร์เลื่อนไปคือ $(D_2 - D_1)$ นำค่าคงที่ที่ได้ตอนแรกไปหาค่าระยะที่กระจกเลื่อนไปจริงๆ $(d_2 - d_1)$

โดยใช้ความสัมพันธ์ $(d_2 - d_1) = K (D_2 - D_1)$ (2.43)

$(D_2 - D_1)$ คือ ระยะที่ไมโครมิเตอร์เลื่อนไปได้

$(d_2 - d_1)$ คือ ระยะที่กระจกเลื่อนไปได้จริง

K คือ ค่าคงที่ของการเลื่อนไปของกระจกต่อการเลื่อนไปของไมโครมิเตอร์

ดังนั้น ความแตกต่างของความยาวคลื่นสามารถคำนวณได้จากสมการ

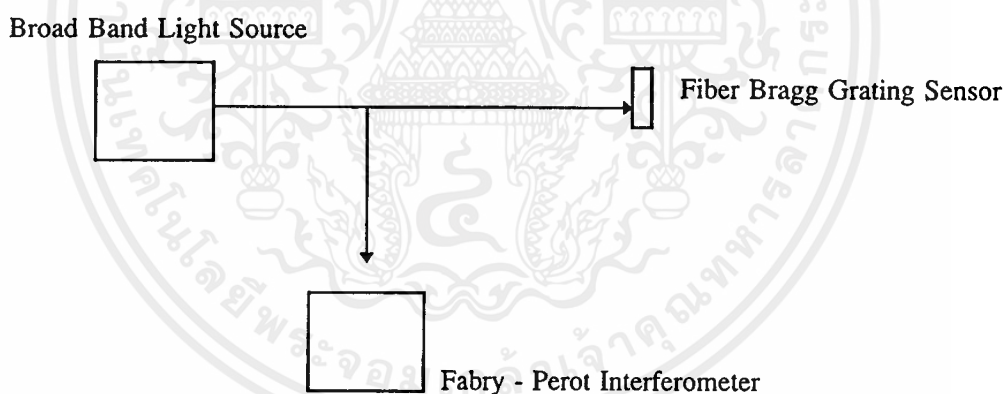
$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_{\text{avg}}^2}{2\Delta d} \quad (2.44)$$



บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

3.1 โปรแกรมจำลองเหตุการณ์ของเซ็นเซอร์แบบแบรคเกรตติง

ในการสังเกตความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไปอันเนื่องมาจากการสะท้อนกลับจากแบรคเซ็นเซอร์นั้นสามารถเลือกวิธีการศึกษาหรือสังเกตได้หลายวิธีโดยเลือกใช้อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดต่างๆเพื่อหาความยาวคลื่นของการสะท้อนที่แม่นยำ ในการทดลองสังเกตครั้งนี้ทางคณะผู้ค้นคว้าได้เลือกใช้อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแฟบริ-เพอโรต์ในการศึกษาโดยอาศัยหลักการทำงานขั้นพื้นฐานของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแฟบริ-เพอโรต์และสมการของแอร์ฟังก์ชันในการสร้างปรากฏการณ์ของการแยกความยาวคลื่น โดยระบบที่ทำการสร้างขึ้นโดยโปรแกรมเป็นดังแผนภาพ



รูปที่ 3.1 ระบบการวัดค่าความยาวคลื่นจากแสงสะท้อนกลับจากแบรคเกรตติง

ซึ่งอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแฟบริ-เพอโรต์นี้ สามารถพบเห็นได้จริงในห้องปฏิบัติการทางแสงของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ซึ่งทำให้ผู้วิจัยสามารถศึกษาลักษณะพื้นฐานของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดนี้ได้โดยไม่ยุ่งยากมากนัก และอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดนี้ยังเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานไม่ซับซ้อนทั้งยังเป็นอุปกรณ์ที่มีสมการคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ของการเปลี่ยนความยาวคลื่นได้อย่างชัดเจน

3.1.1 อุปกรณ์พัฒนาโปรแกรม

เครื่องมือพัฒนาโปรแกรมใช้วีซิวลเบสิกเวอร์ชัน 4.0 เป็นโปรแกรมที่สามารถพัฒนาโปรแกรมบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 95 ได้ซึ่งเป็นระบบปฏิบัติการในปัจจุบัน ทั้งยังสนับสนุนระบบการทำงานแบบ GUI และตกแต่งได้สวยงามซึ่งทำให้โปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นใช้ได้ง่ายและสะดวกต่อการนำไปใช้งาน

3.1.2 แบริกเซ็นเซอร์

การพัฒนาโปรแกรมที่สามารถทำนายความยาวคลื่นที่เกิดขึ้นจากการสะท้อนกลับจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรซึ่งเป็นคุณสมบัติต่างๆของตัวเซ็นเซอร์ เช่น ค่าความยาวคลื่นกลาง (Central Wavelength) ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของอุณหภูมิของระนาบในแบริกเซ็นเซอร์ ซึ่งแบริกเซ็นเซอร์ที่มีการจำหน่ายมี 2 แบบ คือ

1. แบบหัววัดอุณหภูมิ
2. แบบหัววัดความดัน

ซึ่งสามารถเลือกวัสดุที่ใช้ทำเซ็นเซอร์ว่าเป็นแก้ว (Glass - Fiber) หรือพลาสติก (Plastic - Fiber) โดยคุณสมบัติของเนื้อสารเป็นตัวกำหนดย่านของอุณหภูมิในการทำงานของตัวเซ็นเซอร์และค่าขีดจำกัดของหัววัด ซึ่งการจำหน่ายแบริกเกรดดิ่งนั้นผู้ซื้อสามารถกำหนดคุณสมบัติของเซ็นเซอร์ให้กับทางผู้ผลิตได้ ทั้งยังสามารถเลือกซื้ออุปกรณ์เสริมจากระบบที่ผู้ผลิตพัฒนาขึ้นเพื่อการใช้งานจริงได้ ตัวอย่างของคุณสมบัติของแบริกเซ็นเซอร์ที่ให้มาจากผู้ผลิตแสดงดังตาราง

ตาราง 3.1 แสดงคุณสมบัติของแบริกเซ็นเซอร์ของบริษัท JDS FITEL

ค่าความยาวคลื่นกลาง (Center wavelength)	820 - 1650 นาโนเมตร
ค่าแบนด์วิธ (Bandwidth)	0.1 - มากกว่า 20 นาโนเมตร
ค่าการสะท้อน (Reflectivity)	1% - 99.9 %
ค่าความไวของค่าความยาวคลื่นต่ออุณหภูมิ (Temperature sensitivity of wavelength)	0.01 นาโนเมตร / C โดยทั่วไป

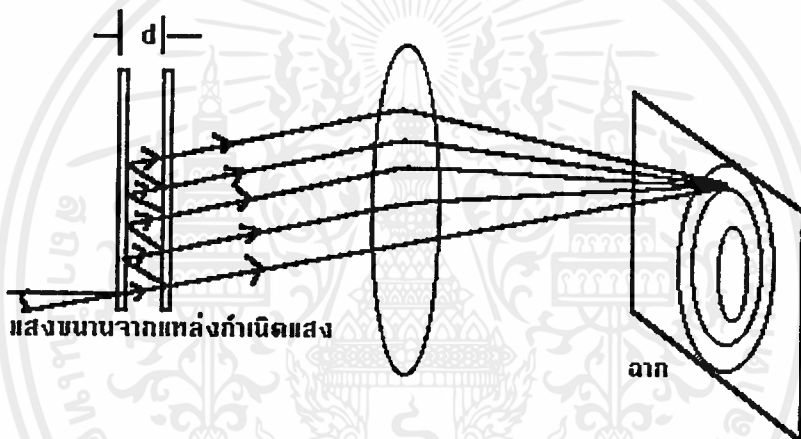
ซึ่งค่าที่ จำเป็นต่อการให้ข้อมูลการสะท้อนในที่นี้คือ

- ค่าความยาวคลื่นกลางที่อุณหภูมิมาตรฐาน
- ค่าความไวของการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นต่ออุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแฟบริ-เพอโรต์ใช้หลักการของการแทรกสอดจากลำแสงหลายลำในแผ่นคู่ขนานซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับใช้วัดความยาวคลื่นของแสงอย่างถูกต้องและยังใช้ในการศึกษาโครงสร้างอย่างละเอียดของเส้นสเปกตรัม เครื่องมือประกอบด้วยกระจกสองแผ่นวางขนานกัน โดยกระจกทั้งสองเคลือบด้วยเงินบางส่วนเพื่อให้แสงผ่านทะลุจากภายนอกเข้าไปสะท้อนระหว่างกระจกทั้งสองได้ ถ้าช่องว่างหรือระยะระหว่างกระจกเปลี่ยนแปลงได้ อุปกรณ์นี้จะเรียกว่าอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ แต่ถ้าระยะระหว่างกระจกถูกยึดให้คงที่ด้วยการใส่แผ่นวัสดุที่มีความหนาค่าหนึ่ง (เรียกว่า Spacer) ระหว่างกระจกทั้งสองอุปกรณ์นี้จะเรียกว่าเอตาลอน ส่วนรายละเอียดและหลักการทำงานของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแฟบริเพอโรต์ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2



รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแฟบริ-เพอโรต์

3.2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

วัตถุประสงค์หลักของโปรแกรมจำลองเหตุการณ์ของการสะท้อนในเซ็นเซอร์แบบแบรคเกรตติง คือต้องการหาความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไปและกราฟความเข้มของการสะท้อนที่สอดคล้องกับเงื่อนไขของเซ็นเซอร์แบบแบรคเกรตติงที่แสดงให้เห็นความแตกต่างของความยาวคลื่นที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ทั้งหมดนี้จะเป็นการจำลองเหตุการณ์ทางทฤษฎีเมื่อมีการสร้างระบบดังรูปที่ 3.1

3.2.1 ค่าความยาวคลื่นที่สะท้อนกลับ

ค่าความยาวคลื่นที่สะท้อนกลับของเซ็นเซอร์แบบแบรคเกรตติงในทางทฤษฎีเมื่ออุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่งจะให้เพียงความยาวคลื่นเดียวสะท้อนกลับออกมา ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความห่างของ

ริ้วในตัวเซ็นเซอร์แบบแบรคเกอร์ตึงเองจะมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิและสามารถหาความยาวคลื่นในการสะท้อนกลับได้จาก

$$\lambda_R = \lambda_0 + (C(T - T_0)) \quad (3.1)$$

เมื่อ λ_R = ความยาวคลื่นที่สะท้อนกลับ

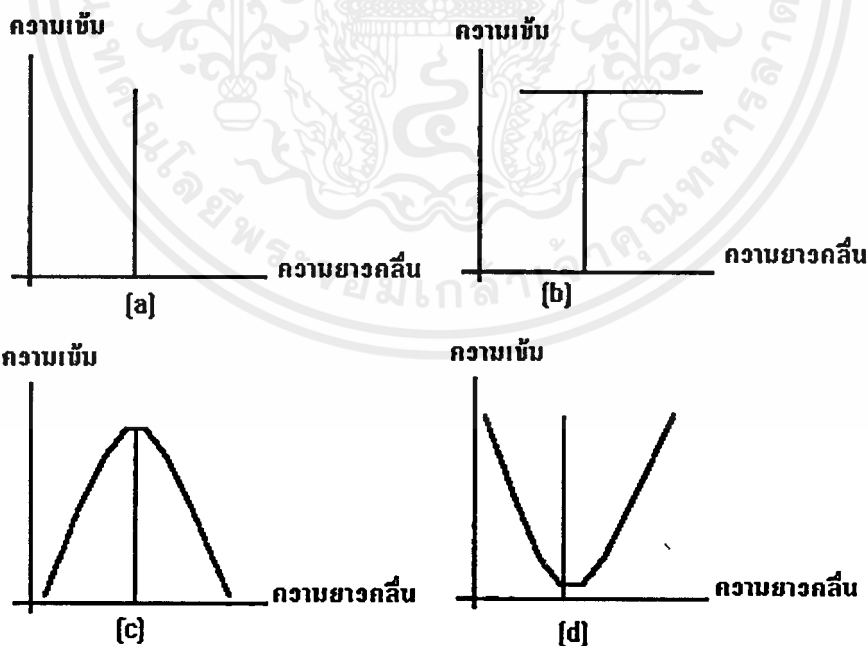
λ_0 = ความยาวคลื่นกลางที่อุณหภูมิมาตรฐาน

C = สัมประสิทธิ์การขยายตัวของเซ็นเซอร์แบบแบรคเกอร์ตึง

T = อุณหภูมิที่ทำการศึกษา

T_0 = อุณหภูมิมาตรฐานของเซ็นเซอร์แบบแบรคเกอร์ตึง

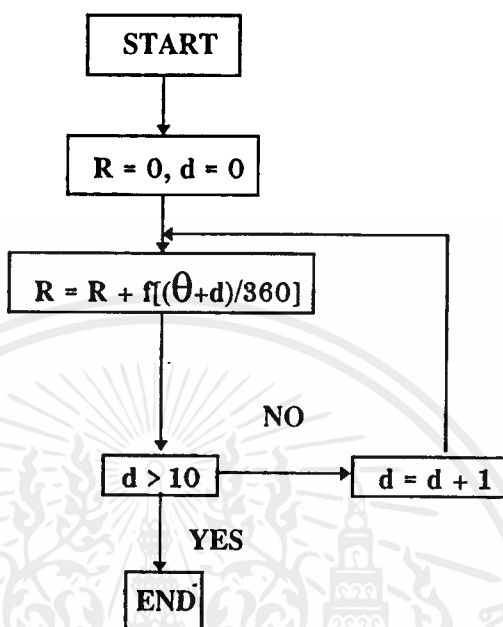
ซึ่งควรมีการสะท้อนออกมาเป็น λ_R ค่าเดียว แต่ในการศึกษาพบว่าการสะท้อนกลับของเซ็นเซอร์แบบแบรคเกอร์ตึงนั้นไม่ได้เป็น λ_R ค่าเดียวที่สามารถสะท้อนได้ แต่มีความยาวคลื่นค่าใกล้เคียงสะท้อนกลับออกมาด้วยอันเป็นผลมาจากกรณีต่างๆ เช่น การผลิตเซ็นเซอร์แบบแบรคเกอร์ตึงไม่สามารถทำให้รีวรอยเท่ากันทั้งหมด หรือความร้อนที่ให้ไม่เท่ากันทุกริ้วของเซ็นเซอร์แบบแบรคเกอร์ตึงดังที่กล่าวในบทที่ 2 ในที่นี้จะถือว่าการสะท้อนกลับของเซ็นเซอร์แบบแบรคเกอร์ตึงเป็นกราฟรูปการกระจายแบบปกติ [Normal หรือ Gaussian Distribution; $f(\lambda)$] แทนที่การกระจายแบบเส้นตรงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 (a) แสดงความยาวคลื่นสะท้อนกลับในอุดมคติ (b) แสดงความยาวคลื่นทะลุผ่านในอุดมคติ (c) และ

(d) แสดงความยาวคลื่นสะท้อนกลับและทะลุผ่านในกรณีเกิดขึ้นจริง

โฟลชาร์ตการหาค่าความยาวคลื่นที่สะท้อนกลับ



3.2.2 การหาปริมาตรการแทรกสอดที่เกิดจากแฟบริ-เพอโรต์

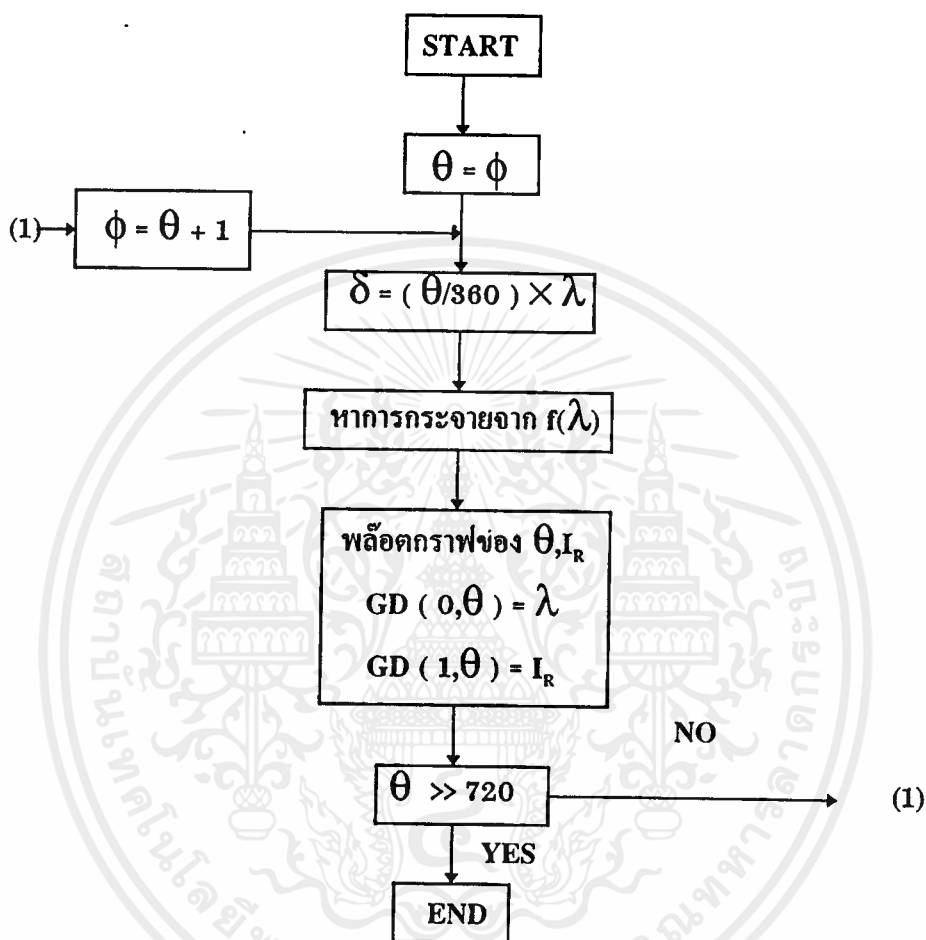
ปริมาตรแถบมีคสว่างที่เกิดขึ้นบนแฟบริ-เพอโรต์นั้นสามารถหาได้จากสมการของตัวแฟบริ-เพอโรต์ โดยส่วนประกอบต่าง ๆ นั้นในทางปฏิบัติสามารถปรับค่าได้เพื่อการหาค่าที่ชัดเจนสำหรับข้อมูลทางทฤษฎีของแฟบริเพอโรต์สามารถอธิบายได้ตามหัวข้อ (2.6) ที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น

จากสมการ (2.22)

$$I_T = \frac{I_0 T^2}{(1-R^2)} \frac{1}{1 + F \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)} \quad (3.2)$$

เมื่อนำมารวมกับ โปรแกรมย่อยการหาค่าของการกระจายซึ่งมีขั้นตอนของโปรแกรมดังนี้

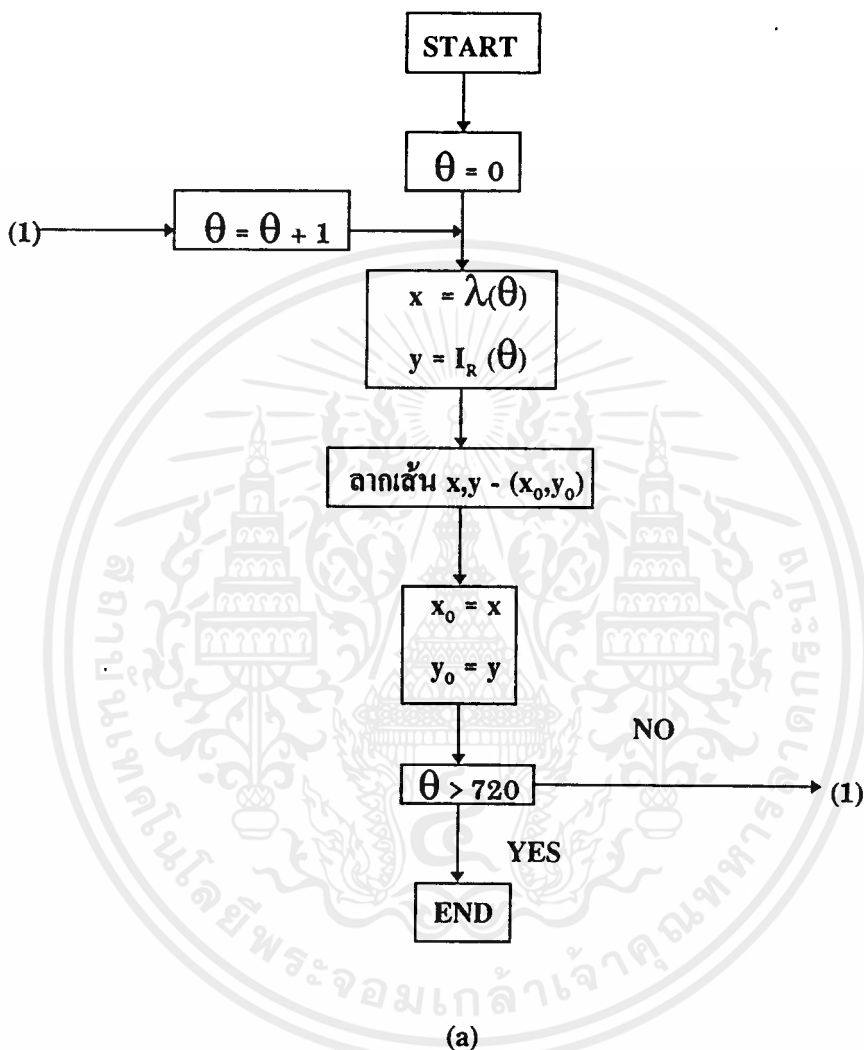
โพลซาร์ตการหาวิรอยบนเฟบริเพอโรต์

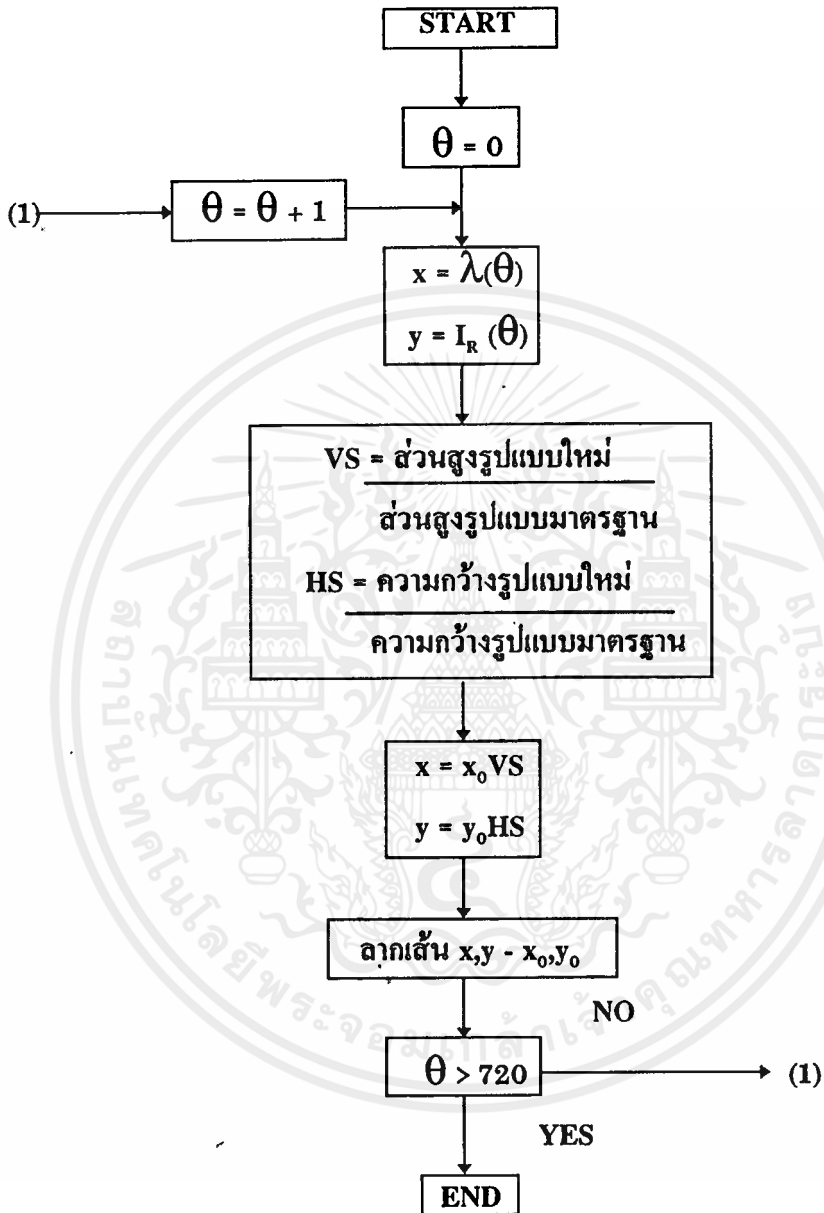


3.2.3 ส่วนการแสดงผลด้วยกราฟ

การแสดงผลด้วยกราฟในโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อแสดงกราฟความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นกับค่าความเข้มแสงที่สะท้อนจากเซ็นเซอร์แบบแบรคเกรตคิง ทั้งนี้ทำให้ได้กราฟผลการทดลองหาค่าความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไปเมื่อนำกราฟ 2 กราฟที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงหรือสองอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ซึ่งกราฟที่นำมาพล็อตแสดงเป็นผลของความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นกับความเข้มที่จุดกึ่งกลางของรีรูปร่างกลมบนฉากของเซ็นเซอร์แบบแบรคเกรตคิง ซึ่งข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จะได้จากสมการในหัวข้อ 3.2.1 และ 3.2.2 ตามลำดับ

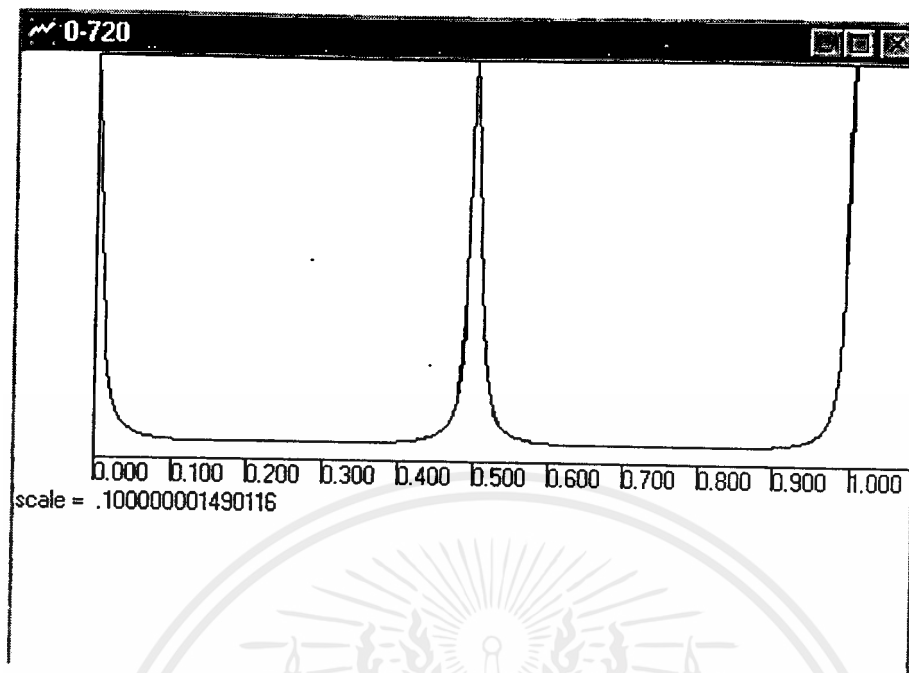
โฟลชาร์ตการแสดงผลด้วยกราฟ



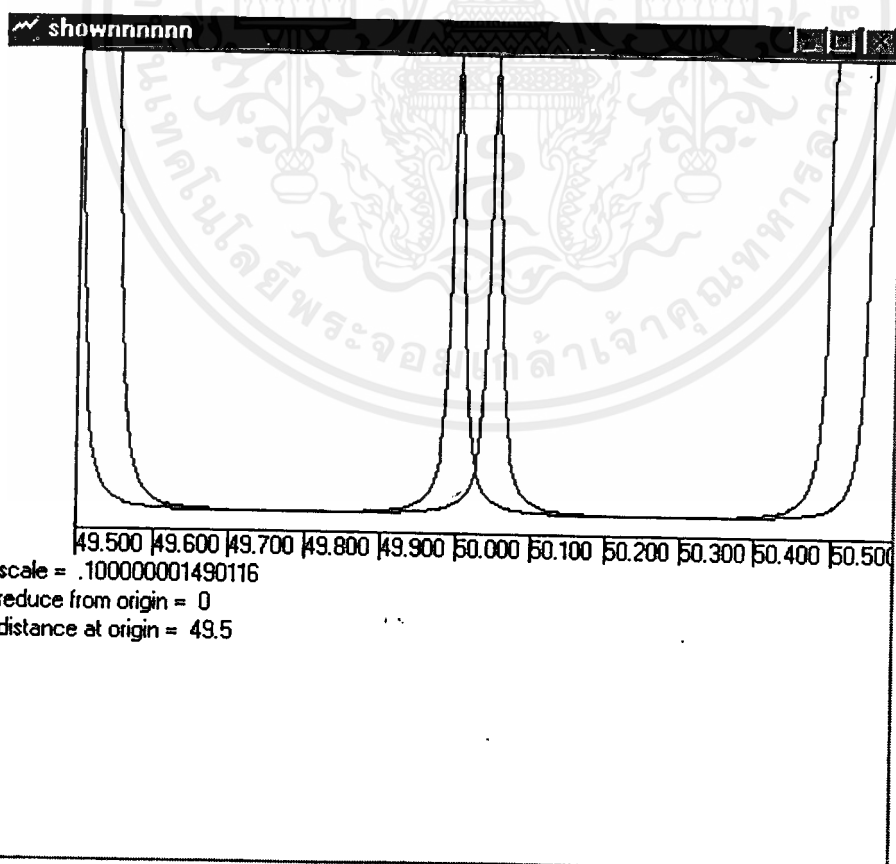


(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

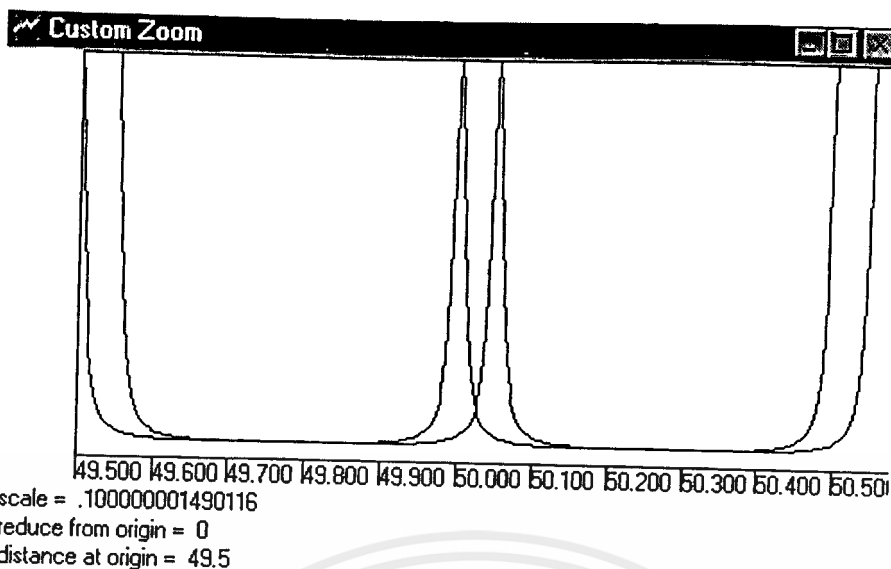


รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มที่จุดศูนย์กลางกับค่าผลต่างของระยะทางที่ค่าความยาวคลื่น
กลาง 1,000.1 และ 1,000 ซึ่งซ้อนทับกันอยู่ โดยแสดงค่าตั้งแต่ 0° - 720° (2 คาบ)



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มที่จุดศูนย์กลางกับค่าผลต่างของระยะทางที่ค่าความยาวคลื่น

กลาง 1,000.1 และ 1,000 เมื่อพิจารณาจากที่ 100 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้นเพื่อการศึกษาและวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มที่จุดศูนย์กลางกับค่าผลต่างของระยะทางที่ค่าความยาวคลื่น
กลาง 1,000.1 และ 1,000 ซึ่งสามารถเลือกได้โดยผู้ใช้งานจะพิจารณาลูกที่เท่าไร (ในกรณีนี้พิจารณาลูกที่ 100)

3.2.4 การแสดงผลในทางตัวอักษร

การแสดงผลด้วยตัวอักษร (Text Mode) เป็นการแสดงข้อมูลที่ได้ออกมาเป็นตัวอักษร (รายงาน) โดยจะให้ข้อมูลที่จำเป็นต่อผลการทดลองมาทั้งหมดซึ่งเป็นผลของการคำนวณเช่นเดียวกับกราฟ ซึ่งจะแสดงค่าออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนข้อมูลของระบบ (System data) กับส่วนข้อมูลที่ทำการซิมูเลทกราฟแล้ว (Simulation data)

```

Result from Simulation
System data
System reflective value of mirror = .9
System distance between mirror = 2 mm
Typically central lamda = 1000 nm
Temperature coeffeint of in-fiber bragg gratting sensor = .01 nm/degree celcius
-----
Simulation data
Lamda of initial data = 1000 nm
Lamda of final data = 1001 nm
Period width of lamda1 at fabryperot = .5 micro metre
Period width of lamda2 at fabryperot = .5005 micro metre
Temperature at lamda1 = 25 celcius
Temperature at lamda2 = 125.00000000001 celcius

```

รูปที่ 3.7 การแสดงผลในทางตัวอักษร

บทที่ 4

สรุปผลการทำงาน

ผลของการหาความยาวคลื่นที่สะท้อนกลับมาจากเซ็นเซอร์แบบแบร็กเกรตติงจากโปรแกรมที่เขียนขึ้น ผลที่ได้ คือ กราฟของความเข้มแสงกับผลต่างระยะทางแสงที่เปลี่ยนไปโดยเป็นผลของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแฟบริ-เพอโรต์ ซึ่งหากทำการสร้างระบบตามบทที่ 3 จะพบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองหรือค่าความยาวคลื่นที่ต้องการทราบนั้นต้องนำมาจากความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของแฟบริ-เพอโรต์

$$2m\pi = \frac{4\pi}{\lambda} d \cos \theta \quad (4.1)$$

หรือ

$$2d \cos \theta = m\lambda \quad (4.2)$$

เมื่อทำการทดลองวัดเรสโซแนนซ์ที่จุดสว่างกลางทำให้ $\theta = 0$ ความสัมพันธ์ที่ได้เป็น

$$2d = m\lambda \quad (4.3)$$

ซึ่งทำให้ทราบว่าระยะห่างของแถบสว่างที่เปลี่ยนไปคือ

$$x = \frac{d}{\lambda} \cos \theta \quad (4.4)$$

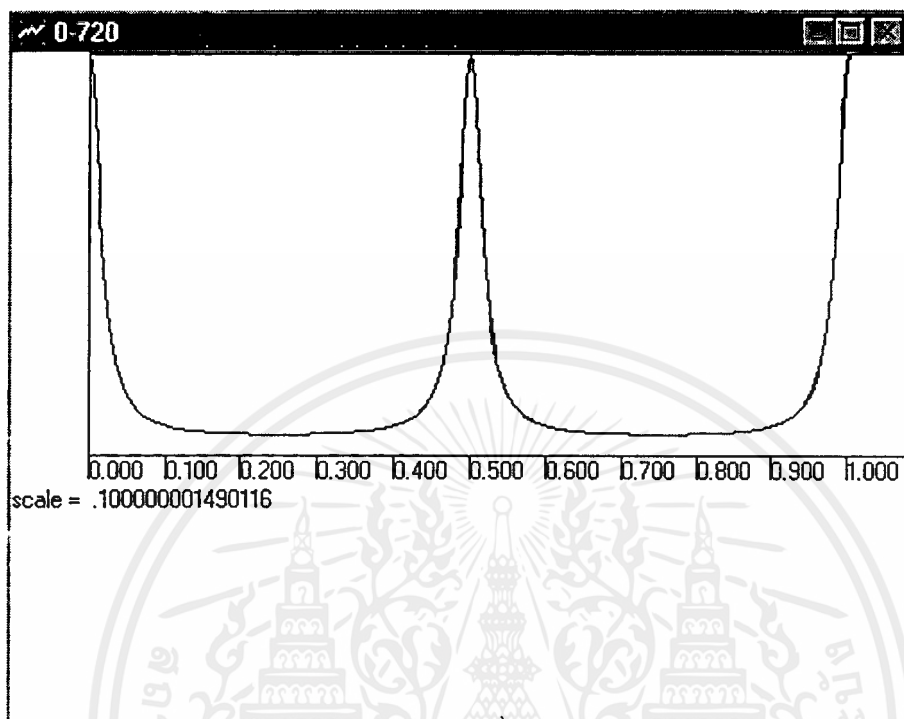
และสามารถหาค่า

$$\lambda = \frac{d}{x} \quad (4.5)$$

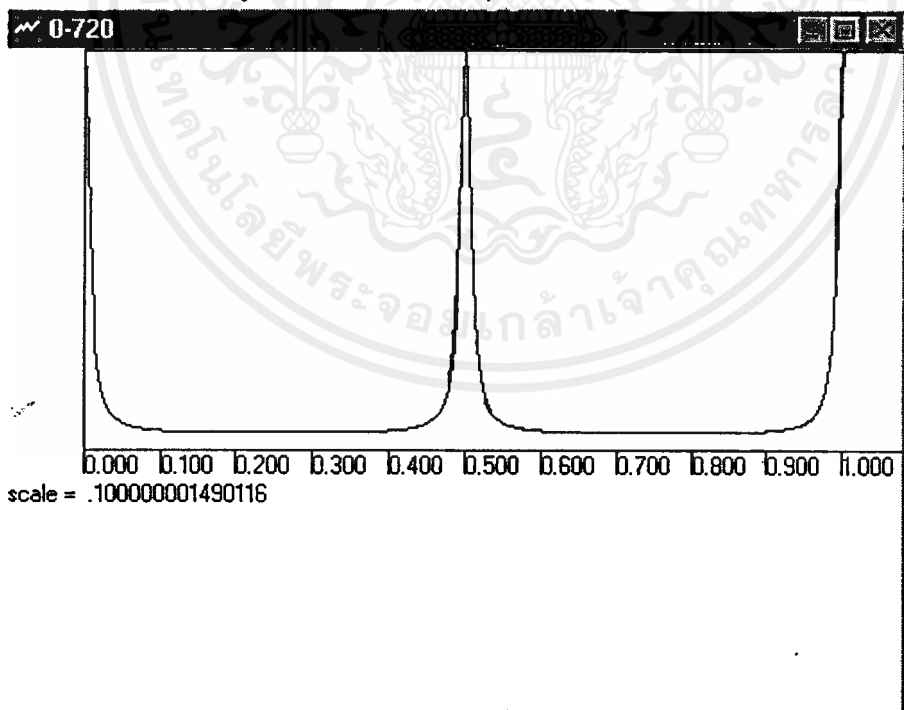
เมื่อ x คือระยะห่างระหว่างแถบสว่าง 2 แถบติดกัน

ค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อระบบ

ค่าการสะท้อน (R) และค่าการส่งผ่าน (T) เป็นค่าที่ใช้กำหนดความคมชัดของแถบมืดสว่างบนฉากของแฟบริ-เพอโรต์ ซึ่งทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงและยอดของจุดสูงสุดได้ชัดเจน จากโปรแกรมค่า R ที่เข้าใกล้ 1 จะทำให้กราฟคมชัดขึ้น

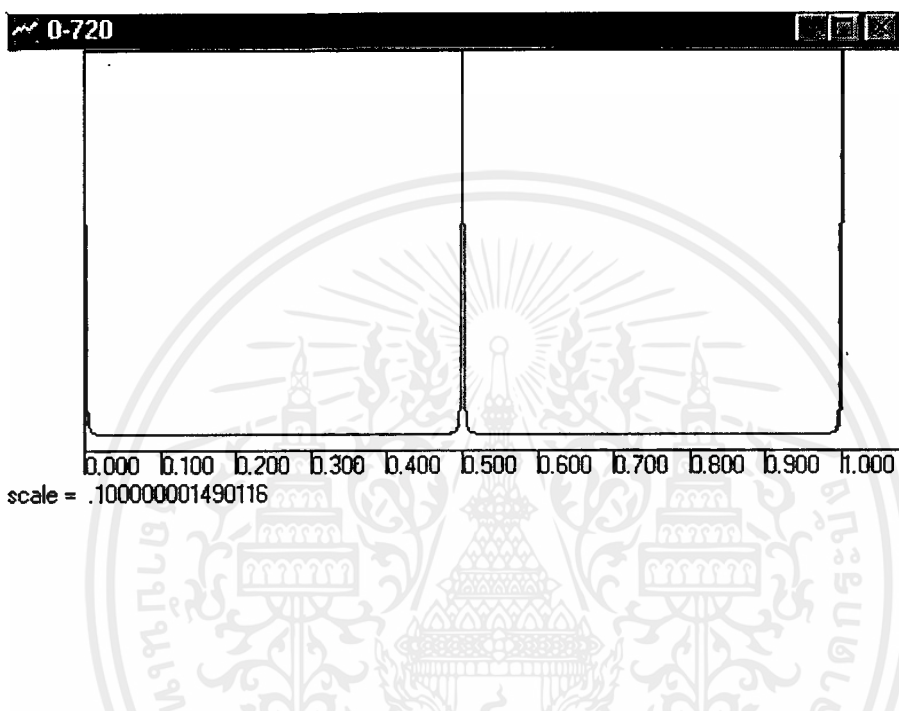


รูปที่ 4.1 กราฟจำลองเหตุการณ์ที่ค่า $R = 0.8$



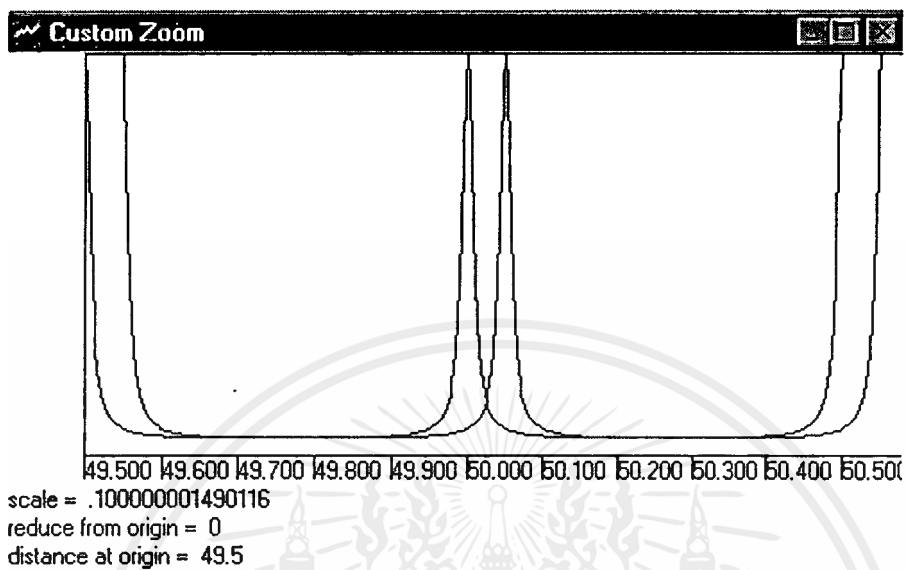
รูปที่ 4.2 กราฟจำลองเหตุการณ์ที่ค่า $R = 0.9$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟจำลองเหตุการณ์ที่ค่า $R = 0.99$

ค่า d (ระยะห่างของกระจกในแฟบริเพอโรต์) เป็นตัวกำหนดขนาดความกว้างของแถบแสงที่ปรากฏบนฉากของแฟบริ-เพอโรต์ ซึ่งสมการทางคณิตศาสตร์ได้กล่าวถึงแล้วในหัวข้อก่อนหน้าซึ่งค่า d มากจะทำให้คาบของแถบสว่างกว้างขึ้น



รูปที่ 4.4 กราฟจำลองเหตุการณ์ที่ค่าความยาวคลื่น 1,000นาโนเมตร
 และ ความยาวคลื่น 1,001นาโนเมตร ของรั้วที่ 100

ค่าพารามิเตอร์บนแบร็กเกรตติงที่มีผลต่อความยาวคลื่นสะท้อนกลับได้แก่ ค่าคงที่อุณหภูมิ (Temperature Coefficient) เป็นค่าที่แสดงถึงความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับความยาวคลื่นที่จะเปลี่ยนไปแสดงดังตาราง ข้อมูลจากโปรแกรมเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิและค่าคงที่อุณหภูมิ

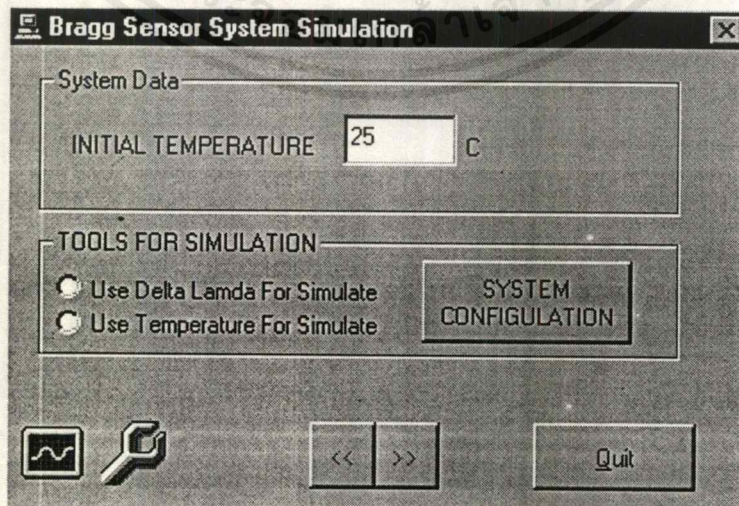
ตาราง 4.1 แสดงค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับค่าความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลง

อุณหภูมิ	ความยาวคลื่น
25	1,000
125	1,001
225	1,002
-100	999.75

ค่าคงที่ = $0.01 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$

ค่าความยาวคลื่นกลางมีผลต่อระบบเพียงเล็กน้อยแต่ค่าความยาวคลื่นกลางจะเป็นค่าที่ทางบริษัทผู้ผลิตกำหนดมาให้เหมาะสมกับค่าของแหล่งกำเนิดแสงของทางบริษัท ฟังก์ชันของโปรแกรมที่สร้างขึ้น

ในการจำลองเหตุการณ์เราสามารถใส่ค่าใดค่าหนึ่งใน 2 ค่าเพื่อทำการหากราฟ ซึ่งค่า 2 ค่าที่เราสามารถใช้ในการจำลองเหตุการณ์ ได้แก่ ค่าความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปหรือค่าอุณหภูมิ ดังหัวข้อเครื่องมือที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์ (Tools For Simulation) ที่แสดงในรูปแบบ

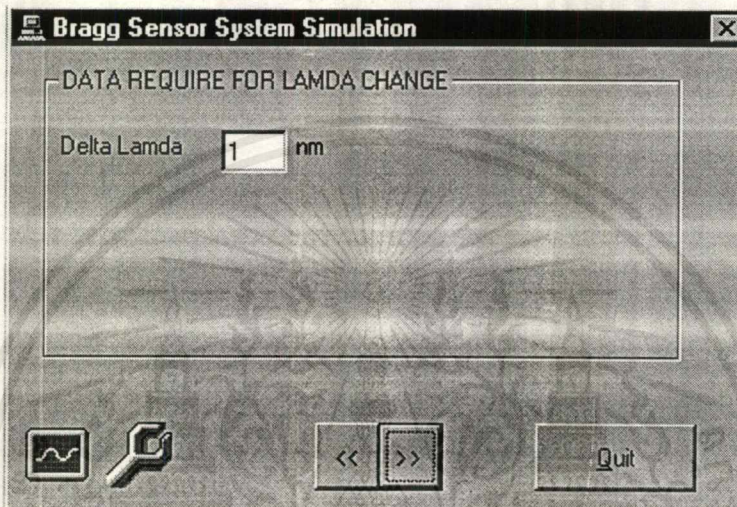


รูปที่ 4.5 แสดงหัวข้อที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์ (Tools For Simulation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

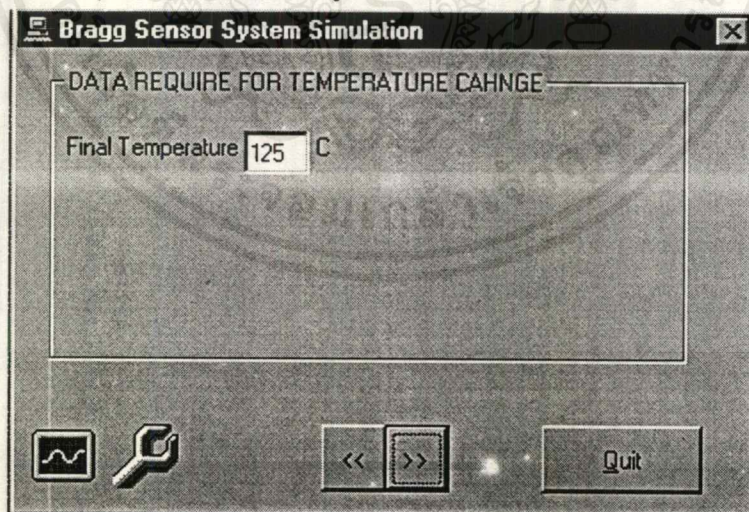
จากรูปจะมีช่องที่ให้เราใส่ข้อมูลอุณหภูมิเริ่มต้นเข้าไปจากนั้นให้เลือกว่าจะใช้ค่าความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไปหรือค่าอุณหภูมิในการจำลองเหตุการณ์ เมื่อทำการเลือกแล้วให้เลือกที่เครื่องหมาย >>

ถ้าเลือกค่าความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไปในการจำลองเหตุการณ์จะมีหน้าต่างให้เราใส่ค่าความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไปที่เราต้องการใช้จำลองเหตุการณ์ดังนี้



รูปที่ 4.6 เมื่อเลือกค่าความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงในการจำลองเหตุการณ์

แต่ถ้าเราเลือกค่าอุณหภูมิในการจำลองเหตุการณ์ก็จะมีหน้าต่างให้เราใส่ค่าอุณหภูมิสุดท้ายเพื่อใช้ในการจำลองเหตุการณ์ด้วยเช่นกันดังรูป

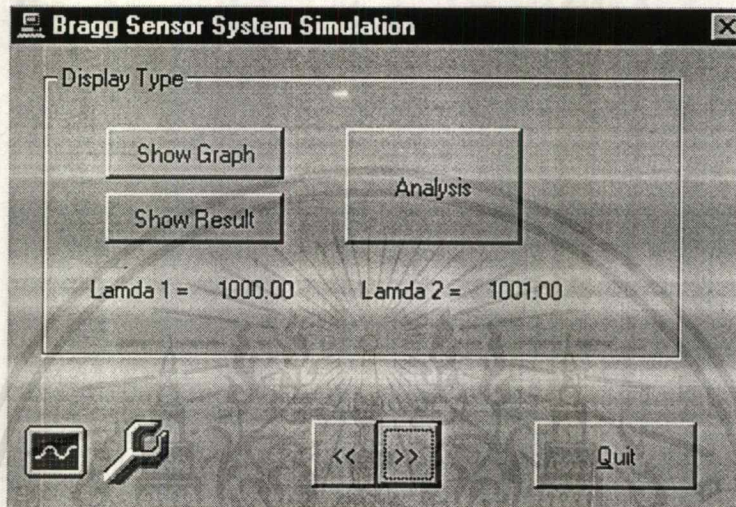


รูปที่ 4.7 เมื่อเลือกค่าอุณหภูมิในการจำลองเหตุการณ์

เมื่อใส่ค่าเสร็จให้เลือกที่เครื่องหมาย >> จะแสดงหน้าต่างดังรูปต่อไป

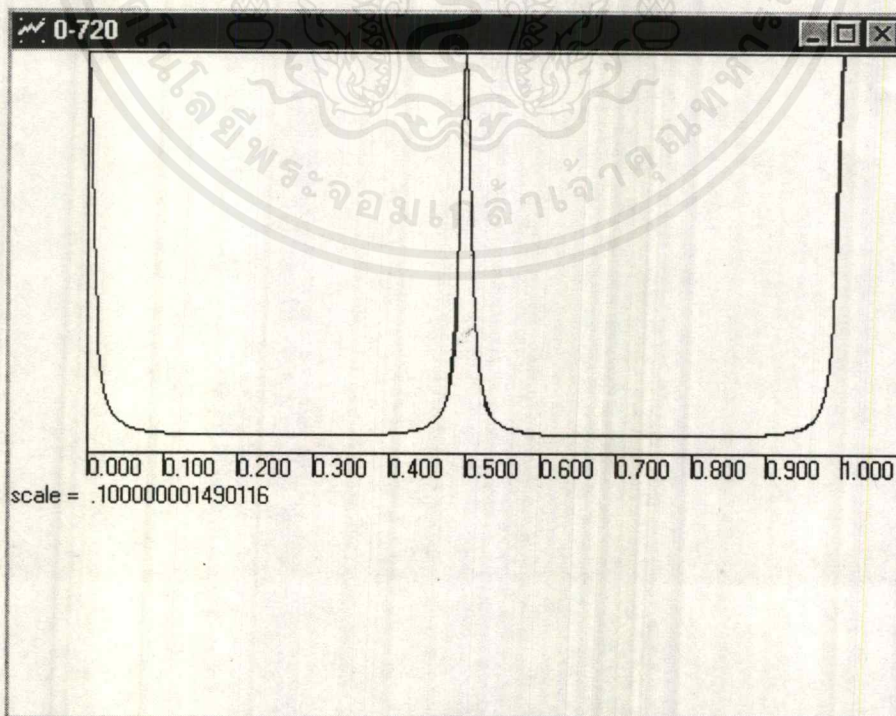
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แสดงกราฟ (Show Graph) เมื่อเลือกปุ่มนี้จะแสดงกราฟของ 2 แถบสว่างแรกที่อยู่ติดกันหรือที่ $\theta = 0-720^\circ$ โดยจะแสดงชุดของความยาวคลื่น 1 และ 2 ซ้อนกัน (ในกรณีนี้เราใช้ค่าความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไปในการจำลองเหตุการณ์) จากรูปจะเห็นว่า จะแสดงค่าความยาวคลื่น 1 และ 2 ออกมาด้วย



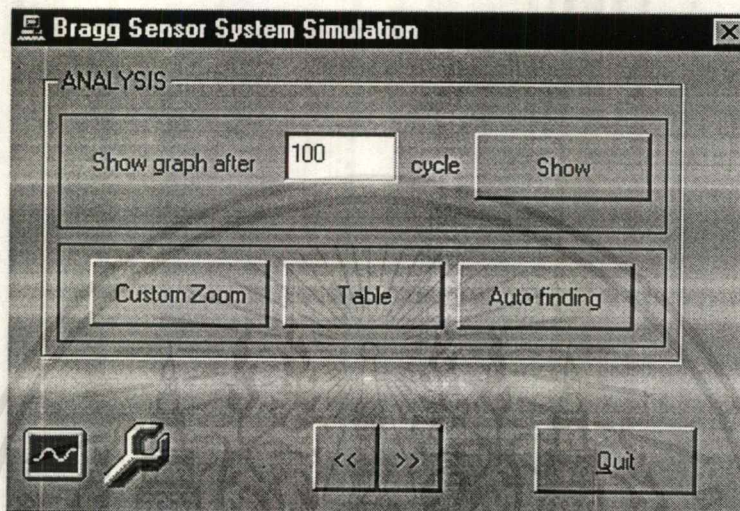
รูปที่ 4.8 แสดงฟังก์ชันการเลือกใช้ปุ่มแสดงกราฟ

จากรูปที่ 4.8 เมื่อทำการเลือกปุ่ม แสดงกราฟแล้วทำการเลือกที่เครื่องหมาย >> จะได้กราฟแสดงออกมาดังรูปต่อไปนี้



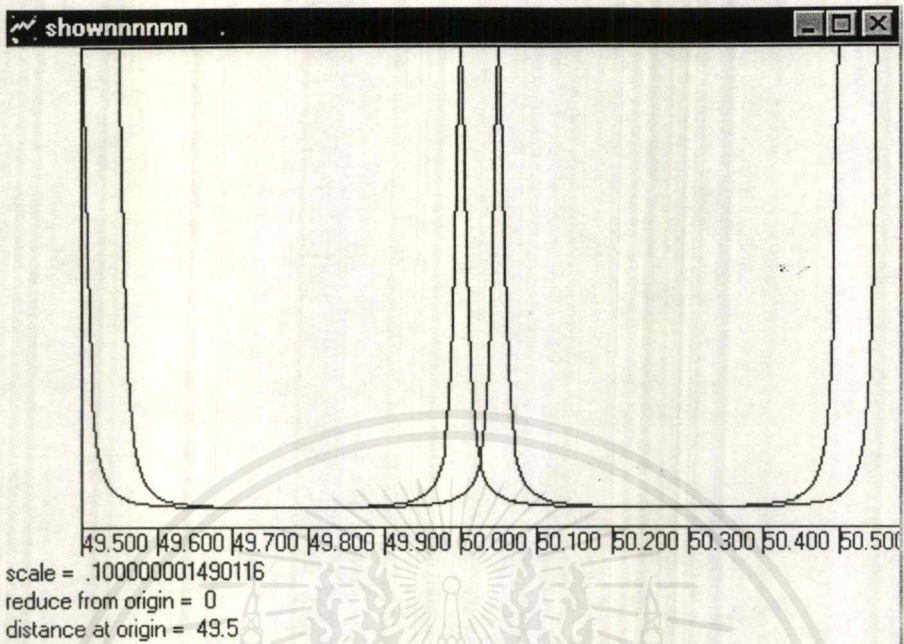
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 4.9 กราฟแสดงลักษณะของกราฟเมื่อทำการเลือกปุ่มแสดงกราฟ ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปุ่มวิเคราะห์ (Analysis) เป็นการนำข้อมูลที่ได้อาวิเคราะห์ความยาวคลื่น 2 ความยาวคลื่นจากเงื่อนไขที่ผู้ใช้กำหนด ซึ่งอาจเป็นค่าอุณหภูมิเริ่มต้น และ/หรือค่าอุณหภูมิสุดท้าย หรือความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเราทำการเลือกปุ่มวิเคราะห์จากรูปที่ 4.8 เราจะได้หน้าต่างแสดงดังรูปนี้



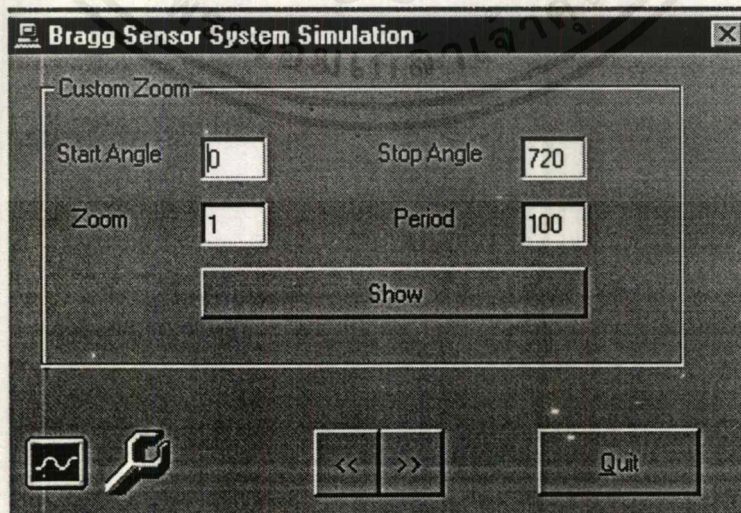
รูปที่ 4.10 แสดงฟังก์ชันวิเคราะห์เมื่อทำการเลือกปุ่มวิเคราะห์จากรูปที่ 4.8 จากรูปจะมีช่องให้เลือกว่าจะพิจารณากราฟลูกที่เท่าไรในที่นี้เราใช้ลูกที่ 100 จากนั้นเลือกปุ่มแสดง จะได้กราฟที่จำลองเหตุการณ์แล้วดังรูป

- แสดง (Show) แสดงผลของกราฟความสัมพันธ์หลักจากรีวชั่นทับกัน ไปอีกเป็นจำนวนรีวตามผู้ใช้กำหนด



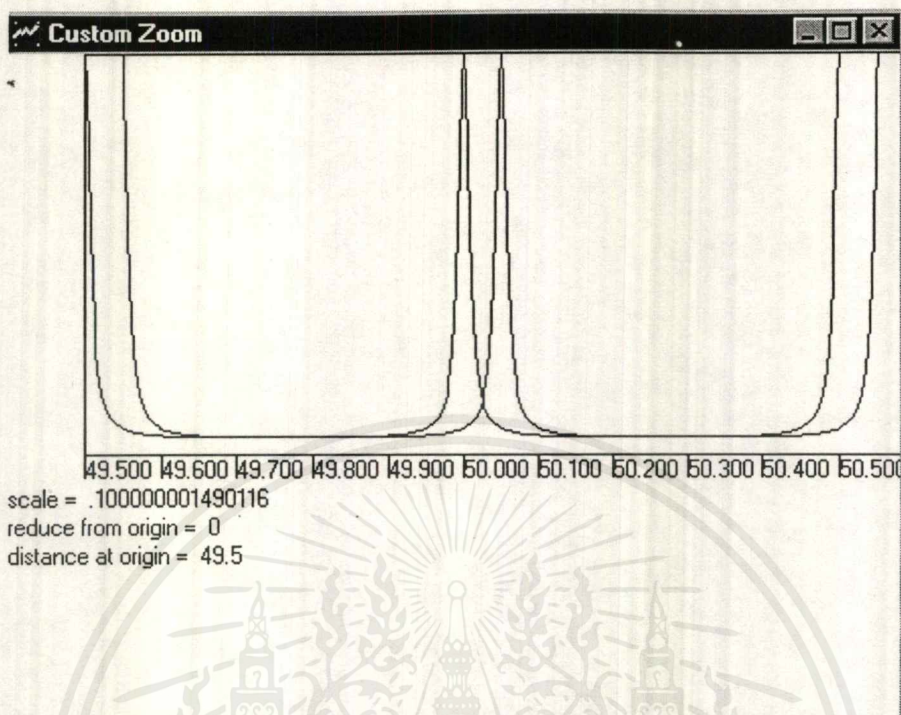
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงลักษณะของกราฟเมื่อเลือกปุ่มวิเคราะห์แล้วเลือกปุ่มแสดง แต่ถ้าเลือกที่ปุ่ม ขยาย โดยกำหนดเองหมายความว่าเราสามารถสั่งให้โปรแกรมทำงานหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมในการจำลองเหตุการณ์ได้จากการกำหนดค่าต่างๆของเราเอง

- ขยายโดยกำหนดเอง (Custom Zoom) ให้ผู้ใช้เลือกหากราฟความสัมพันธ์ที่เหมาะสม โดยสามารถกำหนดค่าต่างๆได้ดังรูป



รูปที่ 4.12 แสดงฟังก์ชันขยายโดยกำหนดเอง

เอกสาร และเมื่อทำการเลือกปุ่มแสดงจะได้กราฟแสดงออกมาดังกราฟต่อไปนี้ ภาตให้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงลักษณะของกราฟเมื่อเลือกปุ่มขยาย โดยผู้ใช้แล้วเลือกปุ่มแสดง

แต่ถ้าเราเลือกปุ่มหากราฟโดยอัตโนมัติหมายความว่าเราให้คอมพิวเตอร์ทำการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการจำลองเหตุการณ์เองโดยอัตโนมัติ

- หากกราฟโดยอัตโนมัติ (Auto Finding) หาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการนำเสนอกราฟของความยาวคลื่นทั้งสองโดยอัตโนมัติ

แต่ถ้าเราเลือกปุ่มตารางหมายความว่าเราสั่งให้คอมพิวเตอร์แสดงข้อมูลทั้งหมดที่นำมาใช้ในการจำลองเหตุการณ์ ซึ่งประกอบด้วยค่ามุม, ค่าความยาวคลื่น 1, ค่าความยาวคลื่น 2 และค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อน

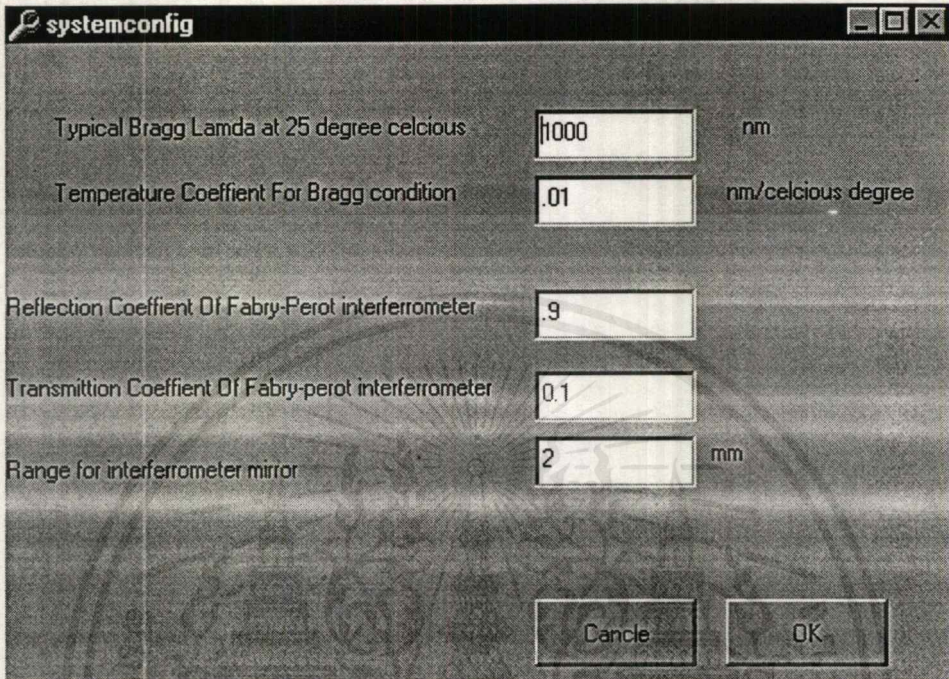
- ตาราง (Table) แสดงตารางข้อมูลที่นำมาวาดกราฟดังรูป

sita	lamda1	lamda2	%reflective
000	0.000000000000	0.000000000000	1.00000000
005	0.000000006944	0.000000006951	0.59348789
010	0.000000013889	0.000000013903	0.26776597
015	0.000000020833	0.000000020854	0.14018656
020	0.000000027778	0.000000027806	0.08435026
025	0.000000034722	0.000000034757	0.05597663
030	0.000000041667	0.000000041708	0.03981617

รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะของข้อมูลเมื่อทำการเลือกปุ่มตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ลักษณะของระบบ (System Configuration) เป็นหัวข้อที่ใช้ในการกำหนดคุณสมบัติต่างๆของระบบ โดยผู้ใช้ซึ่งเราสามารถเลือกปุ่มนี้ได้จากรูปที่ จากนั้นจะแสดงหน้าต่างออกมาดังรูป



รูปที่ 4.15

จากรูปที่ 4.10 เมื่อทำการเลือกไปที่สัญลักษณ์เครื่องมือทางมุมล่างซ้ายมือก็จะเข้าสู่หัวข้อการกำหนดคุณสมบัติต่างๆของระบบได้เช่นเดียวกันดังหัวข้อที่แล้วที่กล่าวมาข้างบน

โดยหัวข้อนี้จะแสดงค่าความยาวคลื่นแบรคที่อุณหภูมิเริ่มต้น (ในที่นี้ 25°C), ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแบรค, ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแฟบริ-เพอโรต์, ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแฟบริ-เพอโรต์, ค่าระยะห่างของกระจก, ค่าดีฟอลท์ (Default) ซึ่งเป็นค่าที่บอกให้ไปยังหน้าต่างแรกสุด, มีปุ่มยกเลิก (Cancel) คือยกเลิกการแสดงผลหัวข้อนี้และปุ่มตกลง (OK) เป็นปุ่มที่ใช้เมื่อกำหนดค่าต่างๆเสร็จแล้วจึงค่อยกดปุ่มนี้

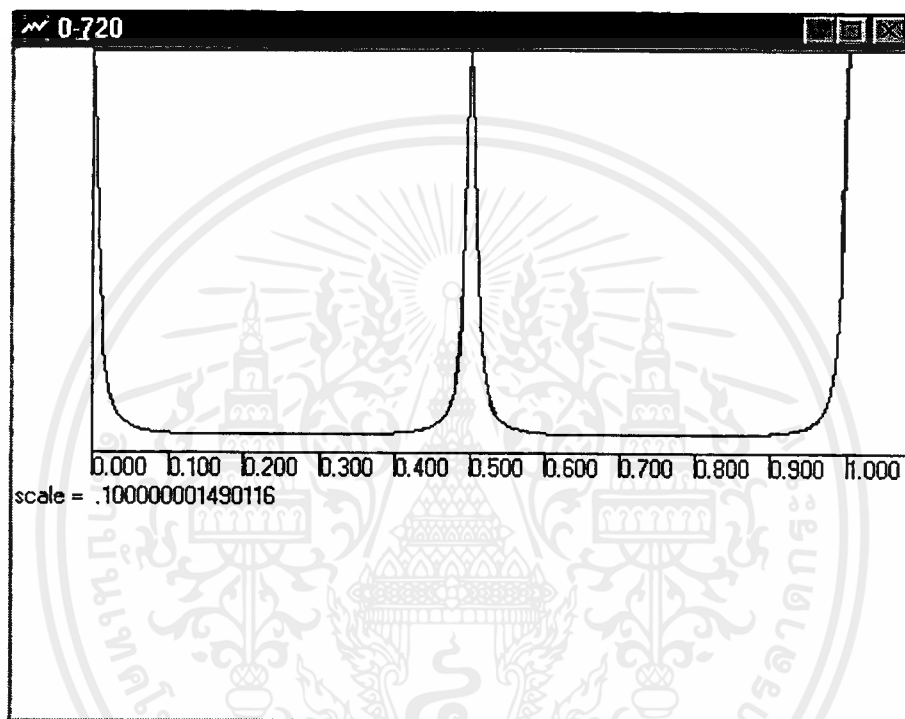
แนวทางการพัฒนา

โปรแกรมที่สร้างขึ้นเพื่อประโยชน์ในการจำลองเหตุการณ์จริงที่เกิดขึ้นในการทดลอง การเพิ่มขีดความสามารถของโปรแกรมจะทำให้ประสิทธิภาพของโปรแกรมเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ แต่อย่างไรก็ดีในขณะที่ทำการวิจัยค้นคว้าข้อมูลต่างๆที่หาได้ไม่สามารถหาได้จากความรู้ปัจจุบัน หรือ

หนังสือภายในห้องสมุด หรือภายในประเทศ จึงจำเป็นต้องศึกษาผ่านระบบอินเทอร์เน็ตกับบริษัท ผู้ผลิตโดยตรง

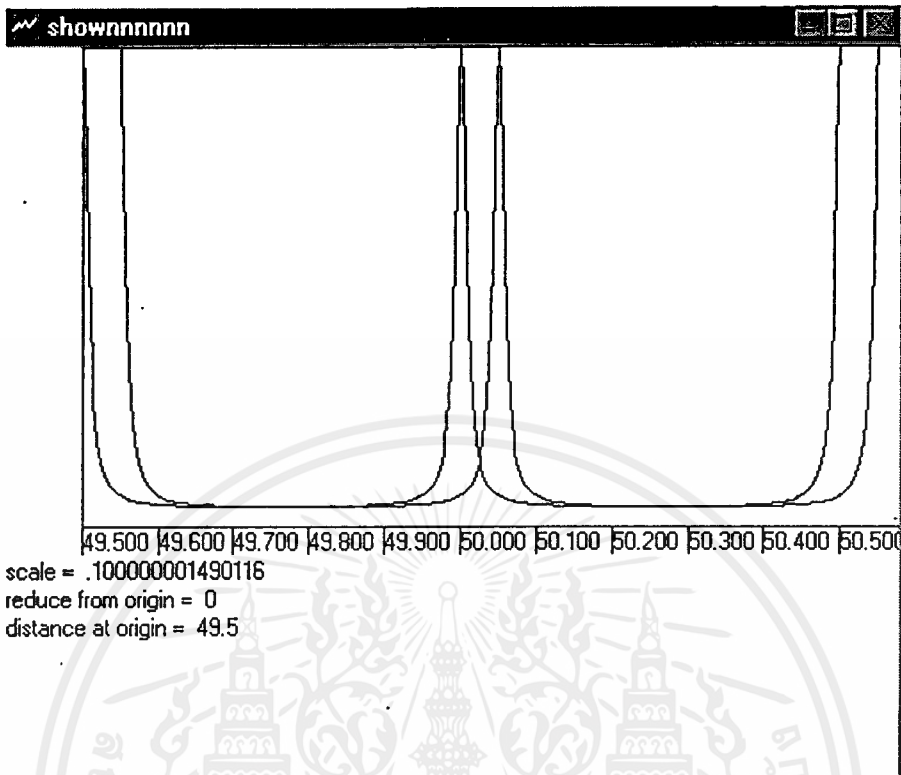
ตัวอย่างของผลที่ได้จากโปรแกรม

ที่ $\Delta\lambda = 1$

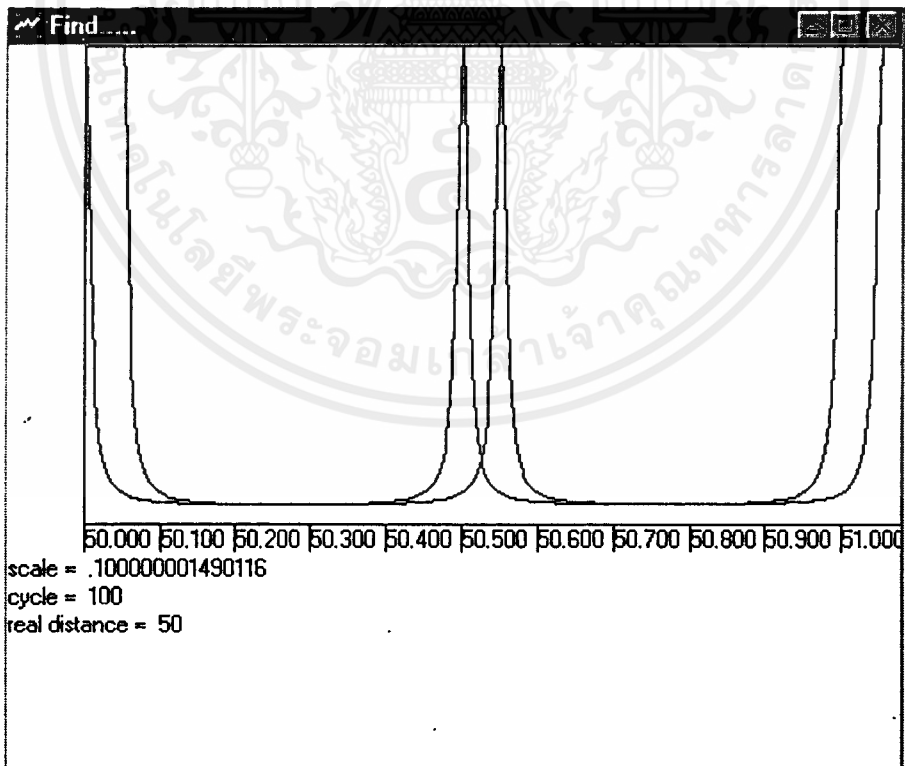


รูปที่ 4.16 กราฟปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



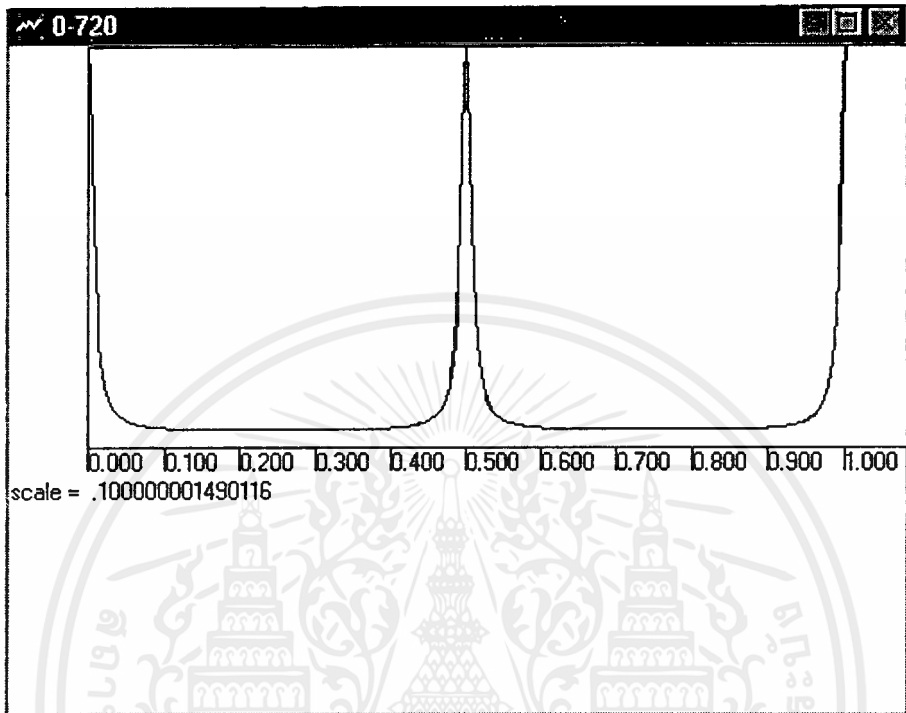
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงผลลัพธ์ (Result)



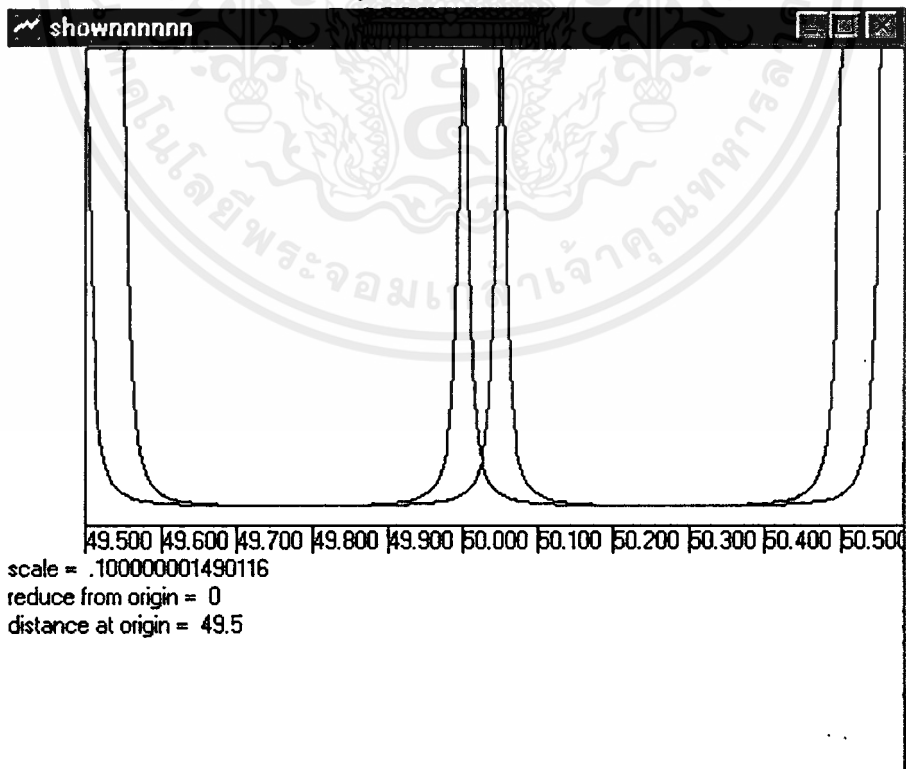
รูปที่ 4.18 กราฟ Auto Find

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ $\Delta T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$

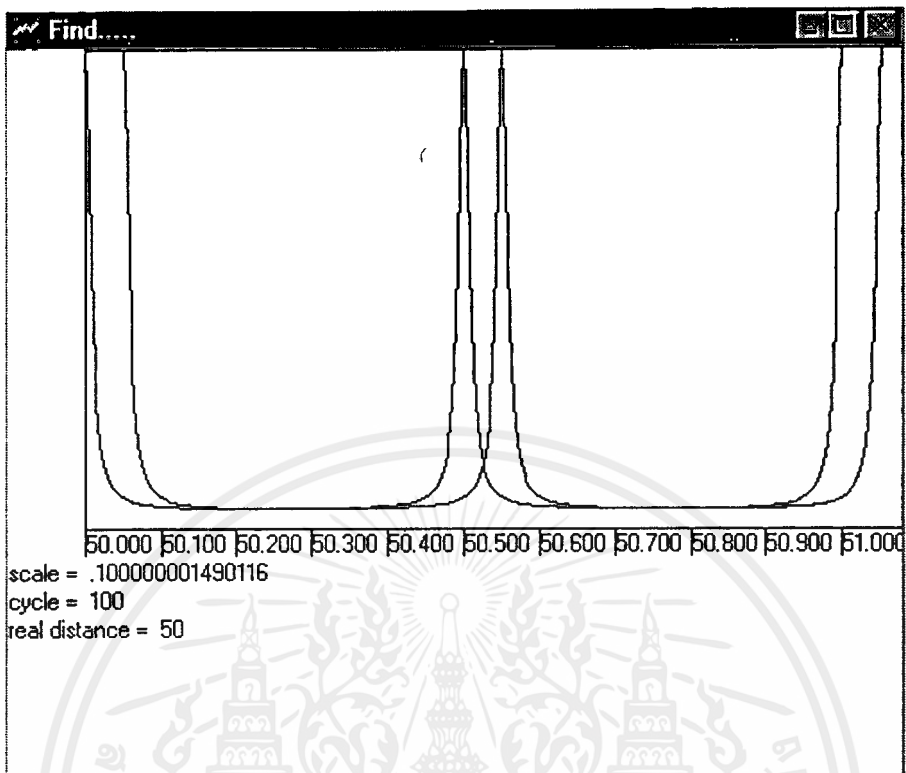


รูปที่ 4.19 กราฟปกติ



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงผลลัพธ์ (Result)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 กราฟ Auto Find

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- 1.) อภินันท์ มัถยานนท์, การสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง, 2538, คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ สจล.
- 2.) รศ. สุวรรณ คูสำราญ, ทัศนศาสตร์กายภาพ, 2537, คณะ
วิทยาศาสตร์ สจล.
- 3.) สถาบันวิจัยกองทัพเรือสหรัฐอเมริกา
website : booster.nrl.navy.mil/afospg/fbg61
- 4.) บริษัท Mellesgriot เทคโนโลยี จำกัด
website : mellesgriot.com/Fiber_optic_Ap
- 5.) บริษัท JDS FIBEL จำกัด
website : JDSFIBEL.com
- 6.) บริษัท Electrophotonics จำกัด
website : electrophotonics.com, electrophotonics.com/telecom/
- 7.) website : 161.122.12.144/overview/overview.html

ประวัติผู้เขียน

โครงการพิเศษฉบับนี้จัดทำขึ้นโดยนายฤชดา เกตุภู่งษ์ และนางสาวจิตตกานต์ ไชยปัญญา

- นายฤชดา เกตุภู่งษ์ เกิดเมื่อวันที่ 3 กันยายน พ.ศ. 2519 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาชั้นประถมที่โรงเรียนอัสสัมชัญสำโรง จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนอัสสัมชัญ จังหวัดกรุงเทพมหานคร การศึกษาชั้นปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ และจบการศึกษาในปี 2540

- นางสาวจิตตกานต์ ไชยปัญญา เกิดเมื่อวันที่ 7 สิงหาคม พ.ศ. 2519 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาชั้นประถมที่โรงเรียนผดุงดรุณี จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนสายน้ำผึ้ง จังหวัดกรุงเทพมหานคร การศึกษาชั้นปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ และจบการศึกษาในปี 2540