

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เกรตติงยแก้วทำเป็น
ระบบตรวจวัดการสิ้นสะท้อน**



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**76659**
วัน,เดือน,ปี.....**- 3 S.ก. 2550**

b. **11850262**
i.....

โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FEASIBILITY STUDIES OF FIBER GRATING SENSORS FOR VIBRATION MONITORING SYSTEMS



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

Academic Year 2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง

การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เกรดดิงโยแก้ว

ทำเป็นระบบตรวจวัดการสั่นสะเทือน

นักศึกษา

นายชุตี ปาดิยเสวี

ภาควิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

สาขาวิชา

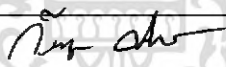

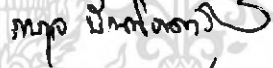
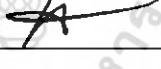
ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. ปรีชา

บุพาพิน

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักวิทยาศาสตร์บัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ อ.กীরชุต ศรีนวลจันทร์	
กรรมการ ผศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม	
กรรมการ อ.ภารุจ บัณฑิตาควิชย์	
กรรมการที่ปรึกษา รศ.ดร.ปรีชา บุพาพิน	



(รองศาสตราจารย์วิชาญ เดชิตธีระ)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เกรตติงโยแก้ว ทำเป็นระบบตรวจวัดการสั่นสะเทือน	
นักศึกษา	นายบุติ ปาติยเสวี	
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์	
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์	
ปีการศึกษา	2549	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. ปรีชา	ยุพาพิน

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เกรตติงโยแก้วทำเป็นระบบตรวจวัดการสั่นสะเทือน โดยศึกษาและ ทำการจำลองลักษณะความยาวคลื่นสะท้อนกลับจากตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นสะท้อนกลับโดยใช้โปรแกรมประยุกต์ MATLAB ตัวแปรที่ใช้ในการตั้งสมมุติฐานนี้ได้แก่ รัศมีของแกน ครรชนหักเหของแกน ระยะคาบของเกรตติง ผลกระทบของความเครียดต่อระยะคาบเกรตติง และผลกระทบของความเครียดและความเค้นและแสงต่อระยะคาบเกรตติงที่เกิดขึ้นกับระบบจำลองตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนเสมือน ซึ่งจากการจำลองสามารถวิเคราะห์ได้ว่าผลกระทบเหล่านี้มีผลต่อความยาวคลื่นสะท้อนกลับจริงแต่มีเพียง ระยะคาบของเกรตติง ผลกระทบของความเครียดต่อระยะคาบเกรตติง และผลกระทบของความเครียดและความเค้นและแสงต่อระยะคาบเกรตติงเท่านั้นที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระยะความยาวคลื่นสะท้อนกลับของเกรตติง ซึ่งผลจากการศึกษาและจำลองจากระบบตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนเสมือนนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนด้วยแบรกกเรตติงต่อไปได้

Special Project Title FEASIBILITY STUDIES OF FIBER GRATING
SENSORS FOR VIBRATION MONITORING
SYSTEMS

Name Yuti Bhatiyasevi

Department Applied Physics **Faculty of Science**

Program Applied Physics

Academic Year 2006

Special Project Advisor Asso.Prof.Preecha Yupapin

ABSTRACT

This special project reviews the achievements about the FBG for the implementation of fundamental functions such as vibration sensors and describes the potential applications of FBG sensors can be applied in the field of geophysics and it expected to development in the future. Firstly in this feasibility studies is set up difference hypothesis for effect to shifted center wavelength of FBG. The effect could be: radius of fiber core, refractive index of fiber core, pitch of FBG, Strain and Stress-Optic. After that use MATLAB for simulation of Reflectivity and apply that effect for feasibility studies to Vibration System. Finally analysis the effect of FBG in Vibration System for applications could include: rock deformation, fiber-optic geophone, optical based seismograph, vertical seismic profiling and structural monitoring of civil structures. Different techniques to detect strains and various applications will be reviewed and discussed.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบของพระคุณ รศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูงที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ แนวทางในการดำเนินการวิจัย ตลอดจน ช่วยตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี และขอกราบขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ซึ่งประกอบด้วย อ.เกียรติ ศรีนวลจันทร์ ผศ.สาหร่าย เล็ก ชุ่ม อ.ภารุจ บัณฑิตาวิทย์ ที่ช่วยแนะนำและช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้ความสนใจและ สนับสนุนด้านการศึกษาแก่ผู้วิจัยเสมอมา ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาท วิชาจนสามารถศึกษาและทำวิทยานิพนธ์สำเร็จได้

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณปรเมศ จันท์เพ็ง ที่ให้คำปรึกษา ตลอดจนให้คำแนะนำ และแนวทางในการเขียนคำสั่ง โปรแกรมประยุกต์เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัย

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณตีบตระกูล สุชาติ คุณวุฒินันท์ สุวรรณเจริญ คุณชัชวาล ศรี ภัคดี และคุณปิยวดี ขาบุญดี ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัย

ผู้เขียนขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ รวมทั้งบุคคลอื่นที่ได้มีส่วนช่วยเหลือและ เป็นกำลังใจแก่ผู้เขียนเสมอมา

คุณความดีของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้เขียนขอมอบเป็นสิ่งตอบแทนต่อท่านผู้มี พระคุณทั้งในอดีตและปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย.....	2
1.3 แนวเหตุผล.....	2
1.4 ขอบเขตในการวิจัย.....	3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 นิยามศัพท์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	5
2.1.1 กฎ 3 ข้อของแสง.....	5
2.1.2 เส้นใยแก้วนำแสง.....	8
2.1.2.1 ลักษณะการเดินทางของแสงภายในเส้นใยแก้วนำแสง.....	9
2.1.2.2 คุณสมบัติใยแก้วนำแสง.....	10
2.1.2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดแสง.....	19
2.1.2.4 แหล่งกำเนิดแสง.....	25
2.1.2.5 อุปกรณ์พาสซีฟทางแสง.....	32
2.2 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเครื่องมือจำลอง และตรวจวัดแรงดันสะท้อน.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแผ่นดินไหวและ หน่วยมาตราวัดริคเตอร์.....	42
2.2.1.1 ขนาดของแผ่นดินไหวตามมาตราริคเตอร์ (Richter).....	46
2.2.1.2 ความรุนแรงของแผ่นดินไหวตามมาตราเมอคัลลี ที่ปรับปรุงแล้ว (Modified Mercalli).....	47
2.2.1.3 ความแตกต่างระหว่างขนาดแผ่นดินไหว และความรุนแรงแผ่นดินไหว.....	49
2.2.2 การสร้างเครื่องมือจำลองและตรวจวัดแรงสั่นสะเทือน.....	50
บทที่ 3 วิธีขั้นตอนดำเนินงานและวิจัย	
3.1 จุดประสงค์ในการดำเนินงานและวิจัย.....	51
3.2 อุปกรณ์.....	51
3.3 ขั้นตอนดำเนินงานและวิจัย.....	52
บทที่ 4 ผลการจำลองและวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมประยุกต์	
4.1 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB.....	55
4.1-1 สมมติฐานเรื่องรัศมีของแกน.....	56
4.1-2 สมมติฐานเรื่องครรชนีหักเหของแกน.....	58
4.1-3 สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงระยะคาบของเกรตติ้ง.....	59
4.1-4 สมมติฐานผลกระทบของความเครียดต่อระยะคาบเกรตติ้ง.....	61
4.1-5 สมมติฐานผลกระทบของความเครียดและความเค้นและแสง ต่อระยะคาบเกรตติ้ง.....	62
4.2 วิเคราะห์ผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรม MATLAB.....	63
4.2-1 วิเคราะห์สมมติฐานเรื่องรัศมีของแกน.....	64
4.2-2 การวิเคราะห์สมมติฐานเรื่องครรชนีหักเหของแกน.....	65
4.2-3 การวิเคราะห์สมมติฐานเรื่องระยะคาบของเกรตติ้ง.....	66
4.2-4 การวิเคราะห์สมมติฐานเรื่องผลกระทบของความเครียด ต่อระยะคาบเกรตติ้ง.....	67
4.2-5 การวิเคราะห์สมมติฐานเรื่องผลกระทบของความเครียด และความเค้นและแสงต่อระยะคาบเกรตติ้ง.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะในโครงการ

5.1 สรุปผลการวิจัย.....	69
5.2 ปัญหาและอุปสรรค.....	71
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	71
รายการอ้างอิง	72
ภาคผนวก	73



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตาราง

หน้า

2.1 การสูญเสียจากการดูดกลืนของสารที่สารและความยาวคลื่นต่างๆ.....	12
2.2 แสดงค่าต่างๆของพินโพโตไดโอด.....	22
2.3 แสดงคุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง.....	25
2.4 แสดงลักษณะและคุณสมบัติของ LED.....	26
2.5 แสดงคุณลักษณะของแหล่งกำเนิดแสงแบบสารกึ่งตัวนำ.....	32
3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ในการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 แสดงกฎการหักเหของแสง.....	6
2.2 แสดงกฎการสะท้อนกลับของแสง.....	6
2.3 แสดงปรากฏการณ์การสะท้อนกลับหมด.....	8
2.4 แสดงส่วนประกอบของเส้นใยแก้วนำแสง.....	9
2.5 แสดงลักษณะการเดินทางของแสงภายใน เส้นใยแก้วนำแสงในกรณีต่างๆกัน.....	9
2.6 แสดงการลดทอนของแสงในใยแก้วนำแสงสัมพันธ์ กับความยาวคลื่น.....	11
2.7 แสดงการดูดกลืนจากไฮดรอกซิล.....	13
2.8 แสดงทางเดินของแสงในใยแก้วนำแสง.....	14
2.9 แสดงการสูญเสียของเส้นใยแก้วนำแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ.....	15
2.10 แสดงการสูญเสียที่ความยาวคลื่นต่างๆของ PCS.....	15
2.11 แสดงสเปกตรัมของการลดทอน.....	16
2.12 แสดงการกระจายของแสงเข้าไปในใยแก้วนำแสง.....	16
2.13 ไดอะแกรมของการหา NA ของใยแก้วชนิดดัชนีหักเหชั้นบันได.....	18
2.14 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยแก้วนำแสง.....	19
2.15 แสดงโรซี่โทม์ของอุปกรณ์รับแสง.....	20
2.16 แสดงโครงสร้างของเวกคัมโฟโตไดโอด.....	20
2.17 แสดงโครงสร้างของโฟโตมัลติพลายเออร์.....	21
2.18 แสดงพีเอ็นโฟโตไดโอด.....	22
2.19 แสดงโครงสร้างของ พินโฟโตไดโอด.....	22
2.20 แสดงสเปกตรัมเรสปอนส์ของพินโฟโตไดโอด ซึ่งทำมาจาก Si และ InGaAs.....	23
2.21 แสดงวงจรมูลจากโครงสร้างของพินโฟโตไดโอด.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.22 แสดงวงจรรขยายของพิน โฟโตไดโอด.....	23
---	----

หน้า

2.23 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์และหลักการทำงาน อวาลานซ์โฟโตไดโอด (APD)	24
2.24 แสดงรอยต่อสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าและแถบพลังงานที่เกี่ยวกับไดโอด.....	25
2.25 แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างกำลังของแสง จาก LED กับกระแสไฟฟ้า.....	27
2.26 แสดงการทำงานของดิจิตอลมอดูเลชัน (Digital Modulation)	27
2.27 แสดงการทำงานของแอนะล็อกมอดูเลชัน (Analog Modulation)	28
2.28 แสดงไดโอดเลเซอร์ชนิด AlGaAs.....	29
2.29 แสดงการมอดูเลตแบบดิจิตอลนั้นมี I_{dc} เป็นกระแสขีดเริ่มเปลี่ยน เมื่อกระแส i_s เป็นศูนย์ สำหรับแอนะล็อกมอดูเลชัน.....	30
2.30 แสดงการมอดูเลตแบบแอนะล็อกนั้นมี I_{dc} เป็นกระแสขีดเริ่มเปลี่ยนเมื่อกระแส i_s เป็นศูนย์.....	30
2.31 ความสัมพันธ์กำลังและกระแสไบแอสใน ไดโอดเลเซอร์.....	31
2.32 แสดงโครงสร้างทางกายภาพของคัปเปลอร์.....	33
2.33 แสดงลักษณะการทำงาน และ โครงสร้างของแบรคเกรตติง.....	34
2.34 แสดงลักษณะความยาวคลื่นที่แบรคเกรตติงสะท้อนกลับ.....	35
2.35 การตอบสนองที่เกิดจากความเค้นและอุณหภูมิของแบรคเกรตติง.....	36
2.36 แสดงลักษณะวัตถุทรงกระบอกถูกแรง F มีขนาดเท่ากัน กระทำในทิศตรงข้ามกัน.....	38
2.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (σ) กับความยาว (L)	39
2.38 แสดงลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหว.....	42
2.39 แสดงลักษณะของการเกิดรอยเลื่อนแผ่นดินไหว และลักษณะของแรงที่เกิดขึ้น.....	43
2.40 แสดงบริเวณเกิดแผ่นดินไหวเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม 2547.....	44
2.41 แสดงการยุบตัวของแผ่นดินไหวจากจุดกึ่งกลางการเกิด.....	45
3.1 แสดงแผนผังการจัดอุปกรณ์การทดลองขั้นที่ 1.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 แสดงแผนผังอุปกรณ์ในจำลองการตรวจวัดทั้งระบบ.....	53
3.3 แสดงแผนผังอุปกรณ์ในจำลองการตรวจวัด.....	53
4.1 แสดงลักษณะของSingle Degree of Freedom Force Vibration ที่เกิดขึ้นกับระบบ.....	55
4.1 แสดงความยาวคลื่นสะท้อนกลับเมื่อพิจารณาสมมุติฐานครั้งที่ 1.....	56
4.2 แสดงความยาวคลื่นสะท้อนกลับเมื่อพิจารณาสมมุติฐานครั้งที่ 2.....	56
4.3 แสดงความยาวคลื่นสะท้อนกลับต่อรัศมี เมื่อพิจารณาสมมุติฐานครั้งที่ 3.....	57
4.4 แสดงความยาวคลื่นสะท้อนกลับต่อดัชนีหักเห เมื่อพิจารณาสมมุติฐานครั้งที่ 1.....	58
4.5 แสดงความยาวคลื่นสะท้อนกลับต่อดัชนีหักเห เมื่อพิจารณาสมมุติฐานครั้งที่ 2.....	58
4.6 แสดงความยาวคลื่นสะท้อนกลับต่อดัชนีหักเห เมื่อพิจารณาสมมุติฐานครั้งที่ 3.....	59
4.7 แสดงความยาวคลื่นสะท้อนกลับต่อระยะคาบของเกรตติง เมื่อพิจารณาสมมุติฐานครั้งที่ 1.....	59
4.8 แสดงความยาวคลื่นสะท้อนกลับต่อระยะคาบของเกรตติง เมื่อพิจารณาสมมุติฐานครั้งที่ 2.....	60
4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดกับการเปลี่ยนแปลง ของความยาวคลื่นสะท้อนกลับแบบเชิงเส้น.....	60
4.10 แสดงความยาวคลื่นสะท้อนกลับต่อผลกระทบที่เกิดจาก ความเครียดที่ต่างกัน 8 ช่วง.....	61
4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความเครียดกับ การเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นสะท้อนกลับ.....	61
4.12 แสดงความยาวคลื่นสะท้อนกลับต่อผลกระทบ ของความเครียดและอุณหภูมิ.....	62
4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความเครียดและอุณหภูมิกับ การเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นสะท้อนกลับ.....	62
4.14 แสดงความยาวคลื่นสะท้อนกลับที่กึ่งกลางเท่ากับ 977.30 nm.....	63
4.15 การวิเคราะห์สมมุติฐานเรื่องรัศมีของแกน.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.16 การวิเคราะห์สมมุติฐานเรื่องครรชนีหักเหของแกน.....	65
4.17 การวิเคราะห์สมมุติฐานเรื่องระยะคาบของเกรตติง.....	66
4.18 การวิเคราะห์สมมุติฐานเรื่องผลกระทบของความเครียด ต่อระยะคาบเกรตติง.....	67
4.19 การวิเคราะห์สมมุติฐานเรื่องผลกระทบของความเครียด และอุณหภูมิต่อระยะคาบเกรตติง.....	68



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

สิ่งมีชีวิตทุกชนิดรู้จักปรับตัวและเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อมของโลกที่มีกระบวนการปรับสมดุลและเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งมีมนุษย์เป็นสิ่งมีชีวิตชนิดหนึ่งที่ต้องปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมที่อยู่ด้วย ตั้งแต่เดิมมานุษย์ต้องการเอาชนะธรรมชาติ แต่เมื่อพบว่าการเอาชนะธรรมชาตินั้นเป็นไปได้ จึงหันความสนใจสู่การป้องกันอันตรายจากธรรมชาติ หนึ่งในอันตรายจากธรรมชาติในทุกวันนี้คือ แผ่นดินไหว ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนตัวของเปลือกโลก ทำให้เกิดแรงในจุดที่เกิดการเคลื่อนตัวอย่างมหาศาลจนก่อให้เกิดภัยพิบัติใหญ่หลวง เพื่อป้องกันจึงต้องมีการพัฒนาการทำนายโดยใช้การตรวจวัดแรงสั่นสะเทือน

ในทศวรรษที่ผ่านมาเราทราบถึงความถี่และความเครียดที่เพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากการบีบอัดตัวของขอบเปลือกโลก การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก สนามโน้มถ่วง การเคลื่อนตัวของแมกมา น้ำใต้ดิน ปริมาณก๊าซเรดอนที่เพิ่มขึ้น รวมถึงการส่งคลื่นวิทยุที่มีความยาวคลื่นสูง ในโครงการพิเศษนี้มุ่งความสนใจไปยังการวัดความถี่และความเครียดที่เพิ่มขึ้น โดยใช้ไฟเบอร์แบร็กเกรตติงเซ็นเซอร์ ซึ่งต้องพิจารณาปัญหาเกี่ยวกับความไวในการวัดความเครียดที่เปลี่ยนแปลงในขณะนั้น แล้วนำไปคำนวณเป็นค่าหน่วยวัดริกเตอร์

ในโลกไร้พรมแดนทุกวันนี้การติดต่อสื่อสารเป็นสิ่งจำเป็นและขาดเสียไม่ได้เลย รวมถึงการตรวจวัดและการเตือนภัย จึงต้องนำไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ามาใช้ร่วมกับเครื่องมือตรวจวัดความเครียดด้วยไฟเบอร์แบร็กเกรตติงเซ็นเซอร์ ในการประมวลและส่งข้อมูลแบบทันทีไปยังเว็บเซิร์ฟเวอร์ที่จัดเตรียมไว้ เพื่อความสะดวกในการตรวจสอบข้อมูลและศึกษาในเรื่องที่เกี่ยวกับธรณีฟิสิกส์ต่อไปในภายภาคหน้า

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาระบบตรวจวัดแผ่นดินไหวที่ใช้อยู่ในปัจจุบันยังพบปัญหาที่ควรแก้ไขในด้านความล่าช้าของการวิเคราะห์ผลจากเครื่องวัดแผ่นดินไหว(Seismograph) และการแจ้งเตือน ทั้งนี้เนื่องจาก

- ระบบเดิมต้องทำการวัดขนาดของพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมา ซึ่งคำนวณได้จากการติดตามลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหว ทำให้เกิดปัญหาซึ่งยากต่อการวิเคราะห์ผล โดยต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระบบเดิมไม่สามารถวัดแรงสั่นสะเทือนเล็กๆหลายๆครั้ง ที่อาจก่อให้เกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ และแผ่นดินไหวระลอกหลัง (After Shock)
- ระบบเดิมไม่สามารถวัดแรงสั่นสะเทือนในขอบเขตที่จำกัด เพื่อศึกษาธรณีฟิสิกส์ได้
- ระบบเดิมไม่สามารถใช้ในการช่วยทดสอบการก่อสร้างอาคารให้มีความมั่นคงแข็งแรงในพื้นที่เสี่ยงภัย

จากปัญหาที่พบเหล่านี้จึงควรพัฒนาอุปกรณ์การวัดขนาดเล็กที่สามารถติดตั้งในบริเวณที่ต้องการศึกษาหรือพื้นที่เสี่ยงภัยและมีความรวดเร็ว สะดวกในการวิเคราะห์ผล รวมถึงสามารถตรวจสอบการสั่นสะเทือนแบบระบบประมวลผลและส่งข้อมูลแบบทันที เพื่อเพิ่มการเตรียมพร้อมที่ดีของประชาชน จะช่วยลดการสูญเสียได้มาก

1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย

- เพื่อศึกษาคุณสมบัติในการวัดความเครียดของไฟเบอร์แบร็กเกรตติงเซ็นเซอร์
- เพื่อศึกษาและพัฒนาระบบตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนแผ่นดินไหวให้สามารถตรวจจับแรงสั่นสะเทือนให้เร็วขึ้นและสามารถวัดแรงสั่นสะเทือนในระดับเล็กๆได้ เพื่อประยุกต์ใช้ในทั้งด้านธรณีฟิสิกส์ การสร้างอาคารสถาน และการสร้างสะพานแขวน
- เพื่อความสะดวกรวดเร็วในการทราบข้อมูลโดยใช้ระบบประมวลผลและส่งข้อมูลทันที

1.3 แนวเหตุผล

แบบทดลองการวัดความเครียดด้วยไฟเบอร์แบร็กเกรตติงเซ็นเซอร์ เป็นแบบทดลองตัวอย่างของการตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนและแผ่นดินไหว เพื่อการศึกษาเชิงธรณีฟิสิกส์และป้องกันภัยจากธรรมชาติได้ในระดับหนึ่ง

1.4 ขอบเขตในการวิจัย

โครงการพิเศษนี้ศึกษาถึง เครื่องมือวัดแผ่นดินไหว โดยมีขอบเขตการศึกษา ดังนี้

- การวิจัยเลือกใช้ไฟเบอร์แบรกรวดตึงเช่นเซอร์เพื่อวัดความเครียด
- ทำการออกแบบการทดลองเพื่อทำการทดสอบระบบวัดความเครียด
- ทำการวิเคราะห์ผลในหน่วยริกเตอร์
- การวิจัยเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการเก็บค่าและวิเคราะห์ผล

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

- ศึกษาขั้นตอนการทำงานตลอดจนปัญหาและอุปสรรคในการสร้างเครื่องมือวัดแรงสั่นสะเทือน
- สืบค้นงานวิจัย ทฤษฎี และหน่วยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเครื่องมือวัดแรงสั่นสะเทือน
- เก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องและจำเป็นต้องใช้ในการสร้างเครื่องมือวัดแรงสั่นสะเทือน
- ออกแบบการทดลองจากทฤษฎีข้างต้น ทำการแปลงผลที่ได้ให้อยู่ในหน่วยมาตราวัดมาตรฐานริกเตอร์ รวมถึงการจัดเก็บฐานข้อมูลและนำเข้าข้อมูลในการสร้างเครื่องมือวัดแรงสั่นสะเทือน
- พัฒนาอุปกรณ์ในการทดลองเพื่อสร้างเป็นเครื่องมือที่ใช้งานได้จริง
- สร้างและพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอีเทอร์เน็ต โดยใช้ภาษาซีคอนโทรลเลอร์ในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อส่งไปยังเว็บเซิร์ฟเวอร์ที่จัดเตรียมไว้
- ทดสอบใช้เครื่องมือและปรับปรุง
- ใช้งานจริง
- วิเคราะห์ผลที่ได้จากการสร้างเครื่องมือ เปรียบเทียบกับเครื่องมือตรวจวัดที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน
- สรุปผลที่ได้จากงานวิจัยและเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้เครื่องมือตรวจวัดขั้นนี้สามารถใช้ในการศึกษาในเชิงธรณีฟิสิกส์ในการประยุกต์ใช้เพื่อช่วยสร้างแผนที่การเคลื่อนตัวของเปลือกโลก
- การตรวจวัดและทำนายแรงสั่นสะเทือนที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งก่อสร้างได้ล่วงหน้าสามารถช่วยลดความเสียหายในชีวิตและทรัพย์สินลงได้
- นำไปประยุกต์ใช้ในการวัดแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับสะพานแขวนเพื่อใช้ในการบำรุงรักษาหรือใช้ในการวัดแรงสั่นสะเทือนที่ปีกของอากาศยาน

1.7 นิยามศัพท์

ความเครียด	หมายถึง	แรงที่กระทำกับวัตถุ และระยะยืดที่เกิดขึ้นภายในวัตถุ
น้ำใต้ดิน	หมายถึง	ปริมาณระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงอยู่ในชั้นดิน โดยจะมีค่าเพิ่มหรือลดขึ้นอยู่กับสภาพอากาศและลักษณะความเป็นกรด เบสในดิน รวมถึงความแข็งของหินที่เจือปนอยู่ในดิน
วัดขนาด	หมายถึง	การวัดพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาและคำนวณจากลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหว
แมกม่า	หมายถึง	หินหลอมละลายที่อยู่ภายใต้เปลือกโลกเมื่อได้รับพลังงานความร้อนจากแกน โลก และลอยตัว ผลักดันเปลือกโลกตอนบนอยู่ตลอดเวลา
ริคเตอร์	หมายถึง	ค่าปริมาณที่บ่งชี้ขนาด ณ บริเวณศูนย์กลางแผ่นดินไหว ซึ่งมีหน่วยเป็นความดันต่อหนึ่งบริเวณพื้นที่(dyne – cm) โดยสามารถแยกได้ถึง 8 ระดับ
แผ่นดินไหวระลอกหลัง	หมายถึง	การเกิดแผ่นดินไหวขนาดเล็กตามมาซ้ำอีกหลายระลอกหลังจากเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โครงการพิเศษนี้เป็นการพัฒนาและออกแบบระบบตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนด้วยไฟเบอร์ ออปติกเซ็นเซอร์ที่มีข้อเด่นในด้านความเร็วในการตรวจวัด ง่ายต่อการบำรุงรักษา และราคาถูก ทั้งนี้ ก่อนที่จะได้ทำการจำลองอุปกรณ์ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาและทบทวนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการ จำลองอุปกรณ์ตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนด้วยตัวตรวจวัดที่ใช้หลักการของใยแก้วนำแสง เพื่อนำมาใช้ เป็นแนวทางในการออกแบบระบบที่จะพัฒนาขึ้น การศึกษานี้ได้แบ่งการทบทวนทฤษฎีและ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งเป็นการศึกษาแนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับ หลักการ พื้นฐานและธรรมชาติของแสง รวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองเครื่องมือตรวจวัด ส่วนที่สองเป็น การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองและสร้างเครื่องมือตรวจวัด ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

สำหรับการสื่อสารและส่งข้อมูลด้วยใยแสงนั้น แสงจะเป็นตัวนำพาข่าวสาร ข้อมูลต่างๆ จากจุดส่งไปยังจุดรับ ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานของแสงที่จำเป็นในการศึกษา การเดินทางของแสงภายในเส้นใยแสง

2.1.1 กฎ 3 ข้อของแสง

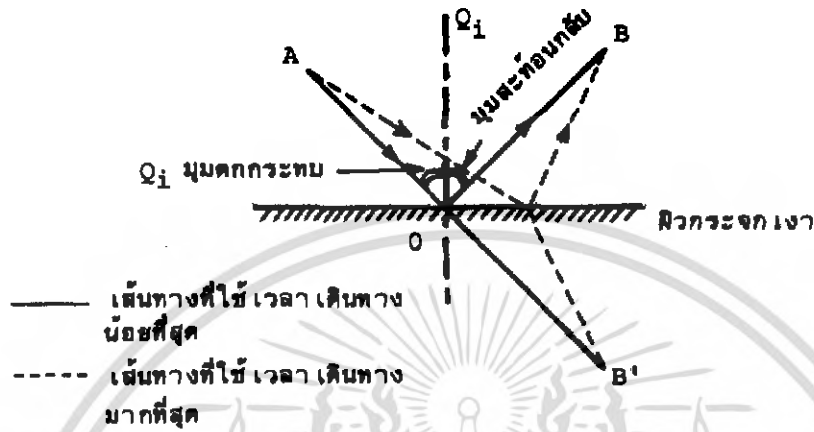
ในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงค่าเดียวกันนั้น แสงจะเดินทางเป็นเส้นตรง ส่วน ตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงต่างกันนั้นตรงรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง แสงจะเกิดการหักเห และเกิดการสะท้อนกลับ ปกติการหักเหและสะท้อนกลับเกิดขึ้นจากคุณสมบัติทั้ง 3 ข้อของแสง ได้แก่ คุณสมบัติการเดินทางเป็นเส้นตรงของแสง คุณสมบัติการหักเหของแสง และคุณสมบัติการสะท้อน กลับของแสง ดังได้กล่าวมาข้างต้น คุณสมบัติเหล่านี้เรียกว่า กฎ 3 ข้อของแสง

สำหรับกฎข้อแรกที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติการเดินทางเป็นเส้นตรงของแสงนั้นเป็นทฤษฎี ของ FERMA อยู่แล้วจะไม่นำมากล่าวซ้ำอีกในที่นี้ จะกล่าวเฉพาะกฎการสะท้อนกลับของแสงและ กฎการหักเหของแสงเท่านั้น

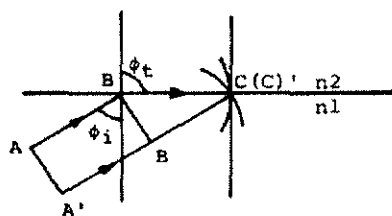
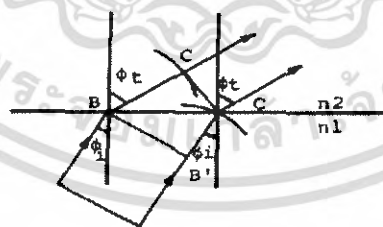
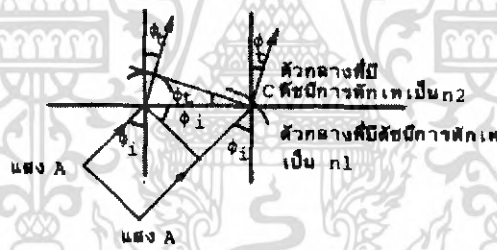
จากรูปที่ 2.1 สมมติว่าแสงเดินทางจากจุด A สะท้อนกลับที่ผิวกระจกเงาที่จุด O และ เดินทางไปถึงจุด B มุมตกกระทบของแสงที่จุด O คือมุม θ_i และมุมสะท้อนของแสงที่จุด O คือมุม θ_r จะเท่ากัน ปกติการหักเหเรียกว่า กฎการสะท้อนกลับของแสง ในรูปที่ 2.1 นี้ถ้าพิจารณาเส้นทางเดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแสงจากจุด A ไปยังจุด B ด้วยเวลาที่น้อยที่สุด ก็คือ เส้นตรง AOB' ซึ่งจุด B' ดังรูป และกรณีนี้ ก็เช่นกันมุมตกกระทบ θ_i เท่ากับมุมสะท้อน θ_r



รูปที่ 2.1 แสดงกฎการหักเหของแสง



รูปที่ 2.2 แสดงกฎการสะท้อนกลับของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกฎการหักเหของแสงนั้นแสดงดังรูป 2.2 โดยรูป 2.2a นั้นเป็นกรณีค่าดัชนีการหักเห $n_1 < n_2$ และรูป 2.2b นั้นเป็นกรณีที่ค่าดัชนีการหักเห $n_1 > n_2$ 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 นั้นเป็นเวลาพอดีกับที่ลำแสง A' เดินทางไปถึงจุด C' ที่รอยต่อของตัวกลางทั้งสอง โดยที่แสงใช้เวลาเดินทางในเส้นทาง BC และ B'C' เท่ากัน

สมมติว่าความเร็วของแสงในอากาศเป็น V และให้ความเร็วของแสงในตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเห n_1, n_2 เป็น $V/n_1, V/n_2$ ตามลำดับ จะได้ว่า

$$\frac{BC}{V/n_2} = \frac{B'C'}{V/n_1} \quad (2.1)$$

ดังนั้นถ้ากำหนดให้ มุมตกกระทบและมุมหักเหของลำแสง A เป็น θ_i และ θ_r และมุมตกกระทบของลำแสง A' มีค่าเท่ากับ θ_i แล้ว จากความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติ จะได้ว่า

$$BC = BC' \sin \theta_i \quad (2.2)$$

$$B'C' = BC' \sin \theta_r \quad (2.3)$$

โดยการใช้(1) เราสามารถพิสูจน์ได้ว่า

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r \quad (2.4)$$

โดยสมการที่ (2.4) ข้างต้นเรียกว่ากฎของ Snell (Snell's Law)

สำหรับกรณีของรูป 2.2c นั้นเป็นการสะท้อนกลับหมดของแสงในกรณีของ $n_1 > n_2$ ยกตัวอย่างเช่นแสงที่เดินทางจากน้ำไปยังอากาศถ้าหากมุมตกกระทบ θ_i มีค่ามากขึ้นๆ จะทำให้มุมหักเห θ_r มีค่าเข้าใกล้ 90 องศามากขึ้น และเมื่อมุมตกกระทบ θ_i มีค่าถึงค่าหนึ่งแล้วจะทำให้แสงไม่สามารถเดินทางเข้าไปในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเห n_2 ได้เลยนั่นคือเกิดการสะท้อนกลับหมดนั่นเองปรากฏการณ์นี้เรียกว่า "การสะท้อนกลับหมด" และมุมตกกระทบที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดนี้เรียกว่า "มุมวิกฤต"(Critical Angle)"

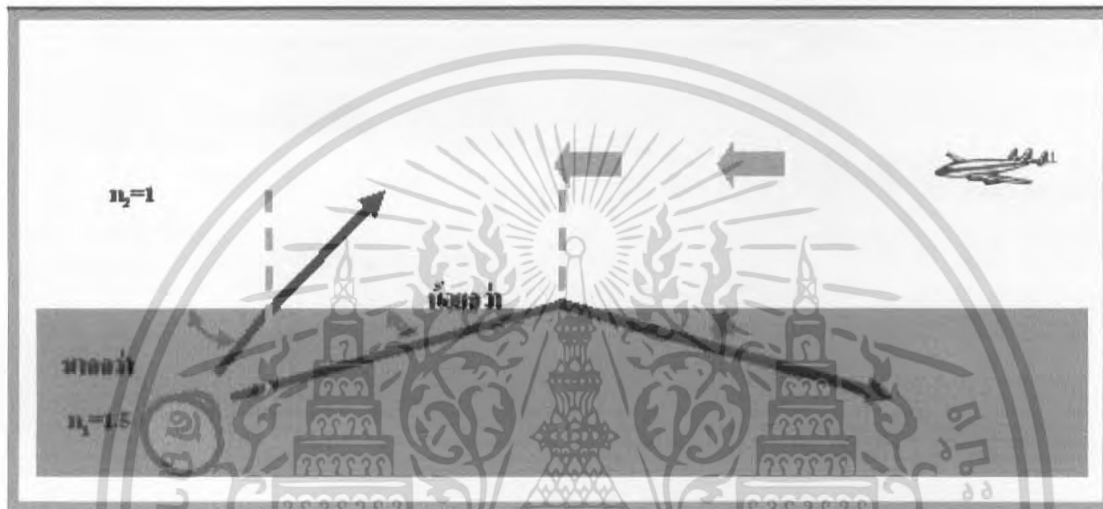
ดังนั้นถ้าให้มุมวิกฤตเป็น θ_c ในกรณีนี้มุมหักเห $\theta_r = 90$ องศา ดังนั้น $\sin \theta_r = \sin 90^\circ = 1$ กฎของ Snell ในกรณีเกิดการสะท้อนกลับหมดจะเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$\sin \theta_c = n_2/n_1 \quad (2.5)$$

จากสมการที่ (2.5) นี้จะสามารถหาของ θ_c ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างของปรากฏการณ์การสะท้อนกลับหมด แสดงดังรูป 2.3 กล่าวคือ เมื่อดำน้ำลงไป ในสระว่ายน้ำแล้วลืมหันมองจากใต้น้ำไปยังอากาศ เนื่องจากค่าดัชนีการหักเหของน้ำมีค่า ประมาณ 1.5 และของอากาศเป็น 1 จากสมการที่ (2.5) เราจะได้ $\theta_c = 42$ องศา แล้วเราจะมองไม่เห็นอะไรเลย การที่เรามองเห็นผิวน้ำในสระน้ำระดับนั้นก็คือปรากฏการณ์การสะท้อนกลับ หมดนั่นเอง

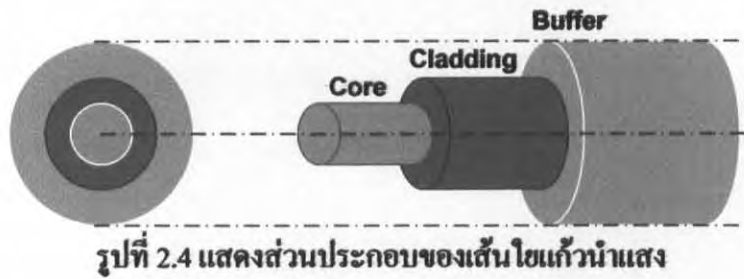


รูปที่ 2.3 แสดงปรากฏการณ์การสะท้อนกลับหมด

2.1.2 เส้นใยแก้วนำแสง

เส้นใยแสงคือ เส้นใยขนาดเล็กที่ทำหน้าที่เป็นตัวนำแสง โครงสร้างของเส้นใยแสง ประกอบด้วยส่วนที่แสงเดินทางผ่านเรียกว่า core และส่วนที่หุ้ม core เรียกว่า clad ทั้ง core และ clad นี้เป็นสารประเภท Dielectric ใส 2 ชนิด โดยการทำให้ค่าดัชนีหักเหของ clad มีค่าน้อยกว่าค่า ดัชนีหักเหของ core เล็กน้อยประมาณ 0.2-3% และอาศัยปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดของแสง ดังที่กล่าวในส่วนของ กลุ่ของแสง ข้างต้นแล้ว สามารถทำให้แสงที่ป้อนเข้าไปใน core เดินทาง ไปได้ นอกจากนั้นเนื่องจากกล่าวกันว่าเส้นใยแสงขนาดเล็กมากขนาดเท่าเส้นผม นั่นหมายถึงขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของ clad ซึ่งมีขนาดประมาณ 0.1 มม. ส่วน core ที่แสงเดินทางผ่าน นั้น มีขนาดเล็กลงไปอีกคือประมาณหลาย μm ~ หลายสิบล้าน μm เท่านั้น ซึ่งมีค่าหลายเท่า-หลายสิบล้านเท่า ของความยาวคลื่นแสงที่ใช้งาน ค่าต่างๆ เหล่านี้เป็นค่าที่กำหนดขึ้นจากคุณสมบัติการส่งและ คุณสมบัติทางเมคานิกส์ที่ต้องการ เส้นใยแสงนอกจากมีคุณสมบัติการส่งดีเยี่ยมแล้วยังมีลักษณะ เต้นอย่างอื่นอีกเช่น ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบของเส้นใยแก้วนำแสง

2.1.2.1 ลักษณะการเดินทางของแสงภายในเส้นใยแสง

ปัญหาอันดับแรกที่ต้องคำนึงถึงก็คือ ทำอย่างไรจึงจะสามารถป้อนแสงเข้าไปใน core ที่มีขนาดเล็กมากของเส้นใยแสงได้ และเมื่อป้อนแสงเข้าไปแล้ว แสงนั้นจะเดินทางอย่างไรใน core ซึ่งเราจะมาศึกษาถึงปัญหาพื้นฐานเหล่านี้

เนื่องจากว่าแสงที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงนั้น จะกระจายกว้างออกเนื่องจากปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของแสงตามที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น ในการจะป้อนแสงเข้าไปใน core ที่มีขนาดเล็กมากนั้นต้องใช้เลนส์ทำการรวมแสง แต่ทว่าแสงที่รวมนั้นไม่ใช่ว่าจะถูกป้อนเข้าไปในเส้นใยแสงได้ทั้งหมด แสงที่มีมุมตกกระทบที่เหมาะสมเท่านั้นจึงจะสามารถเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงได้ ดังรูป 2.5 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยแสง จากรูปจะเห็นว่าที่จุดป้อนแสงของเส้นใยแสงนั้นจะเป็นจุดต่อของตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงต่างกัน 3 ชนิด



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการเดินทางของแสงภายในเส้นใยแก้วนำแสงในกรณีต่างๆกัน

ตัวกลางทั้ง 3 ชนิดนี้คือ อากาศ core ของเส้นใยแก้วนำแสง และ clad ของเส้นใยแก้วนำแสง ถ้าให้ค่าดัชนีการหักเหของแสงของตัวกลางทั้ง 3 นี้เป็น n_0 , n_1 และ n_2 ตามลำดับ จะเกิดการหักเห, การสะท้อนกลับของแสงที่รอยต่อของอากาศกับ core และ clad ตามกฎที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ในที่นี้ให้มุมรับแสงของเส้นใยแสงที่มีค่ามากที่สุดเป็น θ_{max} จะพบว่าลำแสงที่มีความเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สุดนั้นมุมรับแสงตรงรอยต่อของ core และ clad นั้นมีค่าเป็นมุมวิกฤต เมื่อพิจารณาตรงรอยต่อของอากาศกับ core และของ core กับ clad นั้นจากกฎของ Snell จะได้ว่า

$$\sin \theta_{\max} = n_1 \sin \theta \quad (2.6)$$

$$\sin(90^\circ - \theta_c) = \cos \theta_c = n_2/n_1 \quad (2.7)$$

ดังนั้นกรณีที่มุมรับแสง θ_{\max} มีค่าสูงสุดได้นั้น

$$\sin \theta_{\max} = \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}} \doteq n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2.8)$$

เรียกว่าอัตราของผลต่างของดัชนีการหักเหของแสง

สำหรับ $\sin \theta_{\max}$ นี้ตามศัพท์เทคนิคเรียกว่า Numerical Aperture หรือ NA หมายถึงขนาดของการเปิดรับแสงผ่าน และใช้เป็นตัวเลขเงื่อนไขการป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยแสง นอกจากนั้นยังถือเป็นตัวประกอบพื้นฐานอันหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเชื่อมต่อแสง ระหว่างต้นกำเนิดแสงกับเส้นใยแสงด้วย ยกตัวอย่างสมมุติว่าเส้นใยแสงมี $n_1 = 1.475$ และ $n_2 = 1.46$ ในกรณีนี้มีค่า $NA = 0.21$ และขนาดของ core ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเชื่อมต่อแสงระหว่างต้นกำเนิดแสงกับเส้นใยแสง

หากขนาดของ core และ NA มีค่าคงที่แล้วกำหนดปริมาณของแสงที่ป้อนเข้าไปใน core ได้ทันที เส้นใยแสงที่มี core ขนาดใหญ่และมีค่า NA มากจะมีประสิทธิภาพการเชื่อมต่อแสงระหว่างต้นกำเนิดแสงกับเส้นใยแสงสูงมาก

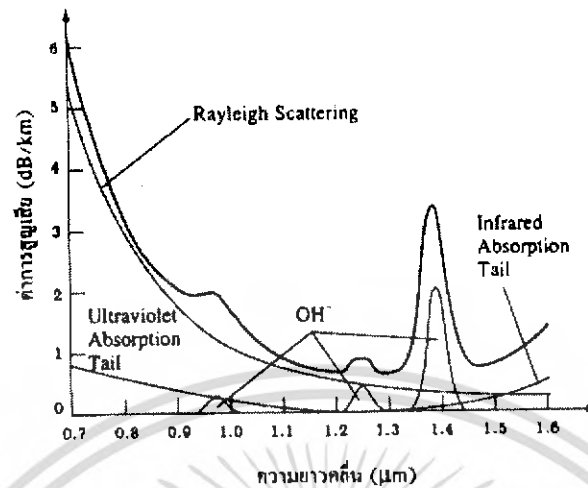
2.1.2.2 คุณสมบัติใยแก้วนำแสง

- การลดทอน

กำลังของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง (P_i) ถูกส่งเข้าไปในใยแก้วนำแสงยาว L กิโลเมตรแล้ว กำลังของแสงที่ออกจากเส้นใยแก้วนำแสง (P_o) เมื่อพิจารณาที่ $P_o < P_i$ โดยทั่วไปแล้วการสูญเสียกำลังของแสงในใยแก้วนำแสงจะกำหนดเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอน (Attenuation Coefficient α) ซึ่งมีหน่วยเป็นเดซิเบลต่อกิโลเมตร ซึ่งแทนด้วยความสัมพันธ์คือ

$$\alpha L = -10 \log \frac{P_o}{P_i} \quad (2.9)$$

เมื่อการลดทอนกำลังของแสงในใยแก้วนำแสงนั้นมีผลมาจากการดูดกลืนของในส่วนของแกนหรือเคลด การสะท้อนของรังสีของแสง และการโค้งงอของใยแก้วนำแสง



รูปที่ 2.6 แสดงการลดทอนของแสงในใยแก้วนำแสงสัมพันธ์กับความยาวคลื่น

1. การดูดกลืนของวัสดุ

พิจารณาการดูดกลืนในแก้วซิลิกาที่บริสุทธิ์ จากรูปข้างต้นรูปที่ 2.6 จะเห็นว่าแก้วซิลิกาที่บริสุทธิ์จะดูดกลืนแสงน้อย และจะเห็นได้ว่าอยู่ในช่วงของความยาวคลื่นระหว่าง 0.8 ถึง 1.6 ไมครอน จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวถูกเลือกเพื่อใช้งานทางด้านการสื่อสาร การดูดกลืนแบบนี้จะมีค่ามากบริเวณความยาวคลื่นในช่วงของอัลตราไวโอเล็ต(UV) และอินฟราเรด(IR)

2. การดูดกลืนจากภายนอก

การลดทอนของแสงที่เกิดจากการดูดกลืนแสงนี้เกิดจากการที่สารที่ใช้ผลิตเส้นใยแก้วนำแสงหรือแก้วนั้นมีสารอื่นเจือปนอยู่ทำให้เกิดการดูดกลืนของแสงขึ้น โดยทั่วไปแล้วจะมีการดูดแสงอันเนื่องมาจากแก้วและสารเจือปน ตัวอย่างเช่น กรณีที่มีสารเจือปนอยู่ 1 ในล้านส่วนก็จะทำให้เกิดการดูดกลืนแสงที่มีค่าดังตารางที่ 2.1

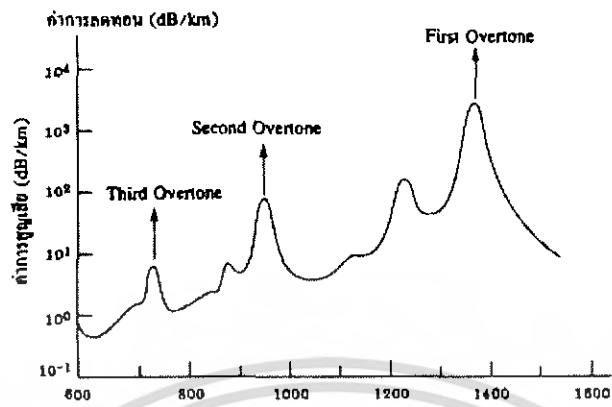
ตารางที่ 2.1 การสูญเสียจากการดูดกลืนของสารที่สารและความยาวคลื่นต่างๆ

สารเจือปน	ความยาวคลื่น (nm)	ค่าการสูญเสีย (dB/km)
Cr ³⁺	625	1.6
C ²⁺	685	0.1
Cu ²⁺	850	1.1
Fe ²⁺	1100	0.68
Fe ³⁺	400	0.15
Ni ²⁺	650	0.1
Mn ³⁺	460	0.2

เทคนิคการผลิตใยแก้วนำแสงสมัยใหม่นั้นสามารถลดอิมพัลส์ของสารเจือปนพวกนี้ได้จนถึงระดับที่ไม่มีผลต่อการดูดกลืนได้ อย่างไรก็ตามอิมพัลส์ตัวหนึ่งที่ไม่สามารถขจัดได้ก็คือไฮดรอกซิลซึ่งแสดงในรูป 2.7 จุดยอดของการสั่นพื้นฐานของอิมพัลส์ไฮดรอกซิล จะเกิดที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ 2.27 ไมครอน และพื้นฐานการสั่นที่ 4.2 ไมครอน ซึ่งการสั่นพื้นฐานนี้จะทำให้เกิดโอเวอร์โทน (Overtone) ที่ฮาร์โมนิกต่างๆ ดังนี้ 1.38, 0.95 และ 0.72 ไมครอน และเมื่อรวมระหว่างการสั่นพื้นฐานและโอเวอร์โทนจะได้จุดยอดที่ 1.24, 1.13 และ 0.88 ไมครอนตามลำดับ

3. การสะท้อนเรย์ลี

การดูดกลืนของใยแก้วนำแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นซึ่งขึ้นอยู่กับ การสะท้อนของแสงที่เกิดจากใยแก้วนำแสงมีค่าดัชนีหักเหที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนชนิดเรย์ลี (Rayleigh) จะเท่ากับ $1/\lambda^4$ ของค่าสูญเสียของกำลังแสงที่เกิดจากการสะท้อนเรย์ลีนั้นดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงการดูดกลืนจากไฮดรอกซิล

4. การสูญเสียจากการโค้งงอ

การสูญเสียจากการโค้งงอ (Bending Loss) แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือการโค้งงอชนิดมหภาค หรือ แมคโครเบนด (Macrobend) ที่มีรัศมีส่วนโค้งมากกว่า 10 มิลลิเมตร และการโค้งงอชนิดจุลภาคหรือ ไมโครเบนด (Microbend) ที่มีรัศมีส่วนโค้งน้อยกว่า 10 มิลลิเมตร โดยการโค้งงอแบบแมคโครเบนดเกิดขึ้นเมื่อเส้นใยแก้วม้วนอยู่รอบหลอดคีมวน เนื่องมาจากการถูกโค้งงอตามมุมต่างๆ การเกิดการสูญเสียเนื่องจากการโค้งงอแบบนี้รังสีของแสงที่เคลื่อนที่ในเส้นใยแก้วตรงบริเวณที่โค้งงอ ซึ่งทำให้แสงตกกระทบตรงรอยต่อระหว่างแกนและเคลด ที่มีค่าน้อยกว่ามุมวิกฤตจึงทำให้รังสีของแสงกระจายออกไปนอกเส้นใยแก้วดังแสดงในรูปที่ 2.8

พิจารณาการสูญเสียจากไมโครเบนด

$$L_f = N \langle h^2 \rangle \frac{a^4}{D^6 \lambda^3} \left(\frac{E_b}{E_f} \right)^{3/2} \quad (2.10)$$

N คือ จำนวนโค้งของการโค้งงอต่อความยาว

h คือ ส่วนสูงเฉลี่ยของเคเบิลที่โค้งงอ

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของเคเบิลใยแก้วนำแสง

a คือ รัศมีของแกนใยแก้ว

λ คือ ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง

E_b คือ ค่าออสติติกโมดูลัสของใยแก้ว

E_f คือ ค่าออสติติกโมดูลัสของเคเบิล

พิจารณาค่าการสูญเสียจากแมคโครเบนด แปรผันกับ \exp^{-R/R_c}

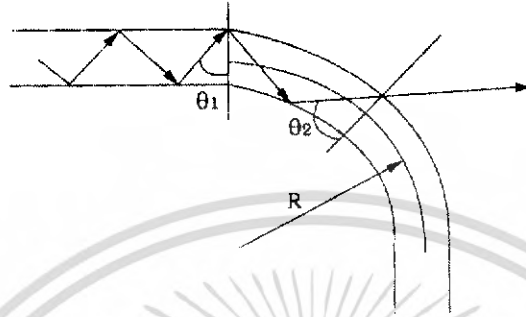
R คือ รัศมีของการโค้งงอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $R_c = a/(NA)^2$

a คือ รัศมีของแกนใยแก้ว

NA คือ นิวเมอริคัลอเปอร์เจอร์



θ_1 และ θ_2 คือมุมตกกระทบของลำแสงภายในใยแก้วนำแสง

รูปที่ 2.8 แสดงทางเดินของแสงในใยแก้วนำแสง

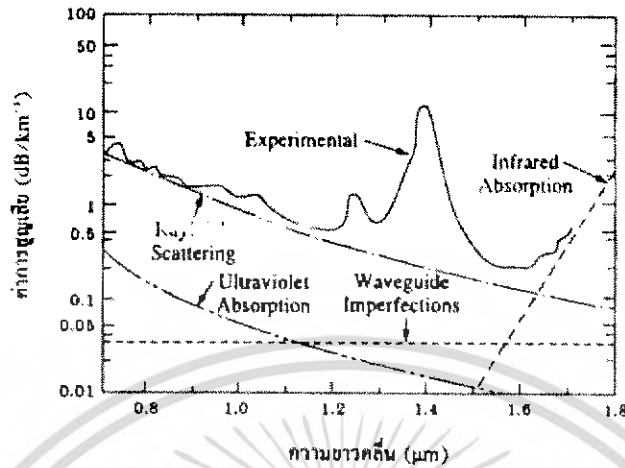
การสูญเสียของกำลังจะมีค่าต่ำสำหรับแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำ และถ้าผลต่างของค่าดัชนีหักเหระหว่างแกนและแคลคมี่ค่ามากก็จะทำให้การสูญเสียมีค่าสูง เส้นใยแก้วชนิดโหมคเดียวที่ทำงานที่ความยาวคลื่นยาวๆ จะไวต่อการสูญเสียจากการโค้งงอ และเส้นใยแก้วที่ถูกพันอยู่รอบแกนม้วนที่มีรัศมี 10 เซนติเมตร ซึ่งนับว่าสั้นนั้นก็สามารถแก้ไขได้โดยการตัดใยแก้วนำแสงส่วนที่โค้งงอทิ้งไปได้ การโค้งงอชนิดไมโครเบนด์เกิดขึ้นจากความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างทางเรขาคณิตของเส้นใยแก้วนำแสงในกระบวนการผลิตเช่น รัศมีของแกน จุดต่อระหว่างแกน และแคลคที่ขรุขระ เป็นต้น ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการผลิตนอกจากนั้นการที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแก้วไม่เท่ากันตลอดทั้งเส้นก็ทำให้มีแสงบางส่วนกระจายออกมาจากใยแก้วนำแสงได้เช่นกัน

5. การลดทอนรวม

พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอนทั้งหมด ตามสมการ

$$\alpha = \alpha_A + \alpha_B + \alpha_C \quad (2.11)$$

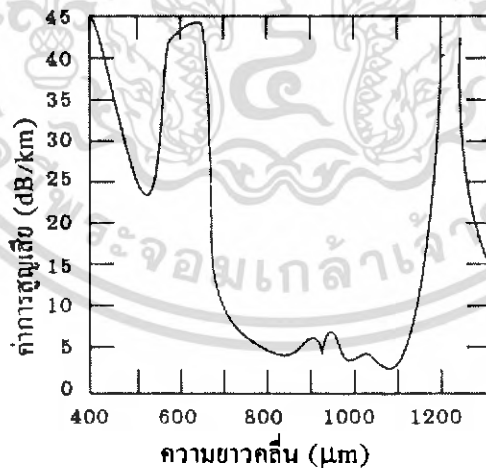
เมื่อ α_A α_B α_C คือค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอนภายในใยแก้วนำแสงที่แสงเดินทางผ่านไปตำแหน่ง A, B และ C รูปที่ 2.9 ข้างล่างแสดงการลดทอนที่วัดได้สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดียว ซึ่งเห็นว่าการลดทอนต่ำสุดจะอยู่ที่ความยาวคลื่น $\lambda = 1.55$ ไมครอนเพื่อให้สูญเสียต่ำสุด



รูปที่ 2.9 แสดงการสูญเสียของเส้นใยแก้วนำแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ

6. การลดทอนและวัสดุใยแก้ว

พี ซี เอส เป็นเส้นใยแก้วที่มีการสูญเสียสูงมาก ทั้งนี้เพราะเส้นพลาสติก (Plastic Fiber) จะมีการสูญเสียมากที่สุด แต่เมื่อพิจารณาใยแก้วฟลูออไรด์ จะมีการสูญเสียในช่วงความยาวคลื่นของอินฟราเรดที่มีค่าต่ำกว่าเส้นใยแก้วชนิดอื่นๆ จึงทำให้สามารถใช้ในช่วงความยาวคลื่นมากกว่า 1.6 ไมครอนขณะเดียวกันก็สามารถลดการสะท้อนเรย์ลีที่ความยาวคลื่นยาวๆ ได้ด้วย

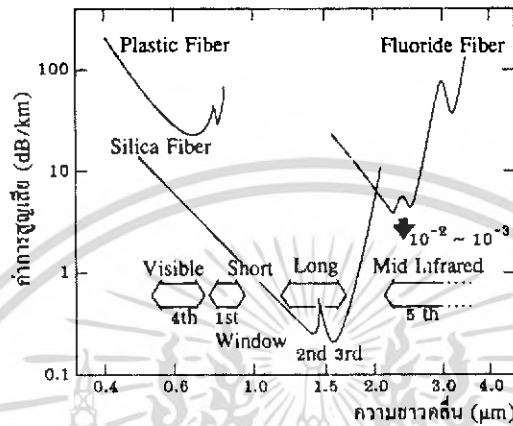


รูปที่ 2.10 แสดงการสูญเสียที่ความยาวคลื่นต่างๆของ PCS

7. สเปกตรัมของการลดทอน

สเปกตรัมของการลดทอนในรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นว่าช่วงความยาวคลื่นที่มีค่าการสูญเสียต่ำจะมีอยู่ 3 ช่วง คือ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 850, 1300 และ 1500 นาโนเมตร ซึ่งแต่ละความยาวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นจะมีการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ เช่น 850 นาโนเมตร ใช้งานทางด้าน Local Area Network(LAN) 1300 นาโนเมตร ใช้งานทางด้าน High Speed LAN และ 1500 นาโนเมตร ใช้งานทางด้านสื่อสาร



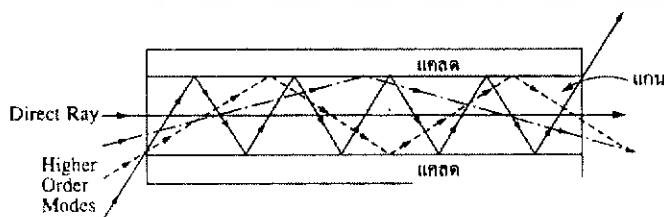
รูปที่ 2.11 แสดงสเปกตรัมของการลดทอน

- การเดินทางของแสงในใยแก้วนำแสง

แสงสามารถแพร่กระจายเข้าไปในใยแก้วได้โดยการสะท้อนหรือการหักเหแสง กล่าวคือ แสงจะแพร่กระจายอย่างไรนั้นขึ้นกับโหมดของการแพร่กระจายและรูปแบบของดัชนีหักเห โหมดของการแพร่กระจายหรือโหมด หมายถึง ทางเดิน(Path) ของแสงนั่นเองถ้าทางเดินของแสงมีเพียงทางเดียวที่ทำให้แสงแพร่กระจายเข้าไปในใยแก้วนำแสงได้เรียกโหมดเดียว (Single Mode) แต่ถ้าทางเดินของแสงหลายๆทาง เรียกว่า มัลติโหมด (Multimode) หรือหลายโหมด ดังแสดงในรูป 2.12 แสดงการกระจายของแสงเข้าไปในใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดียวและแบบหลายโหมด



(ก) โหมดเดียว



(ข) หลายโหมด

รูปที่ 2.12 แสดงการกระจายของแสงเข้าไปในใยแก้วนำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

1. นิวเมอริคัลเอปอร์เจอร์

รูปที่ 2.13 แสดงรูปตัดขวางของใยแก้วนำแสงชนิดดัชนีหักเหแบบชั้นบันไดที่ใช้ในการหา นิวเมอริคัลเอปอร์เจอร์ (NA) จะเห็นว่ารูปกรวยของรังสีของแสงที่รับโดยใยแก้วนำแสงจะหาได้จากความแตกต่างของดัชนีหักเหของแกนและแคลด ส่วนของความแตกต่างของดัชนีหักเหนี้นิยามโดย

$$\Delta = (n_{core} - n_{cl}) / n_{core} \quad (2.12)$$

จากนิยามของมุมวิกฤตนั้นสามารถจะหาขนาดของรูปกรวยของแสงที่จะรับโดยใยแก้วนำแสง ดูรูปที่ 2.13 รังสีตกกระทบที่รอยต่อของแกนและแคลดที่มุมวิกฤต ถ้ามุมของกรวยเป็น θ_c จากกฎของ Snell จะได้

$$\begin{aligned} n_i \sin \theta_i &= n_{core} \sin \theta_i = n_{core} \sin(90^\circ - \theta_c) \\ &= n_{core} \cos \theta_c = n_{core} (1 - \sin^2 \theta_c)^{1/2} \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\sin \theta_c = n_{cl} / n_{core}$$

ดังนั้น $n_i \sin \theta_i = \sqrt{n_{core}^2 - n_{cl}^2}$ นิวเมอริคัลเอปอร์เจอร์ คือ การวัดว่าระบบของแสงว่าจะรับแสงได้มากน้อยเพียงใด ระบบของแสงอาจจะเป็นใยแก้วนำแสงหรือออปติคัลไฟเบอร์ โดยสรุปได้ว่า NA คือ ผลคูณของค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่แสงตกกระทบกับค่า \sin ของมุม θ_i ที่มากที่สุดคือ

$$NA = n_i \sin \theta_{max} \quad (2.14)$$

ส่วนมากแสงที่ตกกระทบจะมาจากอากาศดังนั้น $n_i=1$ ในกรณีนี้ นิวเมอริคัลเอปอร์เจอร์ของใยแก้วนำแสงชนิดสเตปอินเด็กซ์ คือ

$$NA = \sqrt{n_{core}^2 - n_{cl}^2} \quad (2.15)$$

เมื่อ $\Delta \ll 1$

$$\begin{aligned} NA &= \sqrt{(n_{core} - n_{cl})(n_{core} + n_{cl})} \\ &= \sqrt{(2n_{core}\Delta)(n_{core})} \\ &= n_{core} \sqrt{2\Delta} \end{aligned} \quad (2.16)$$

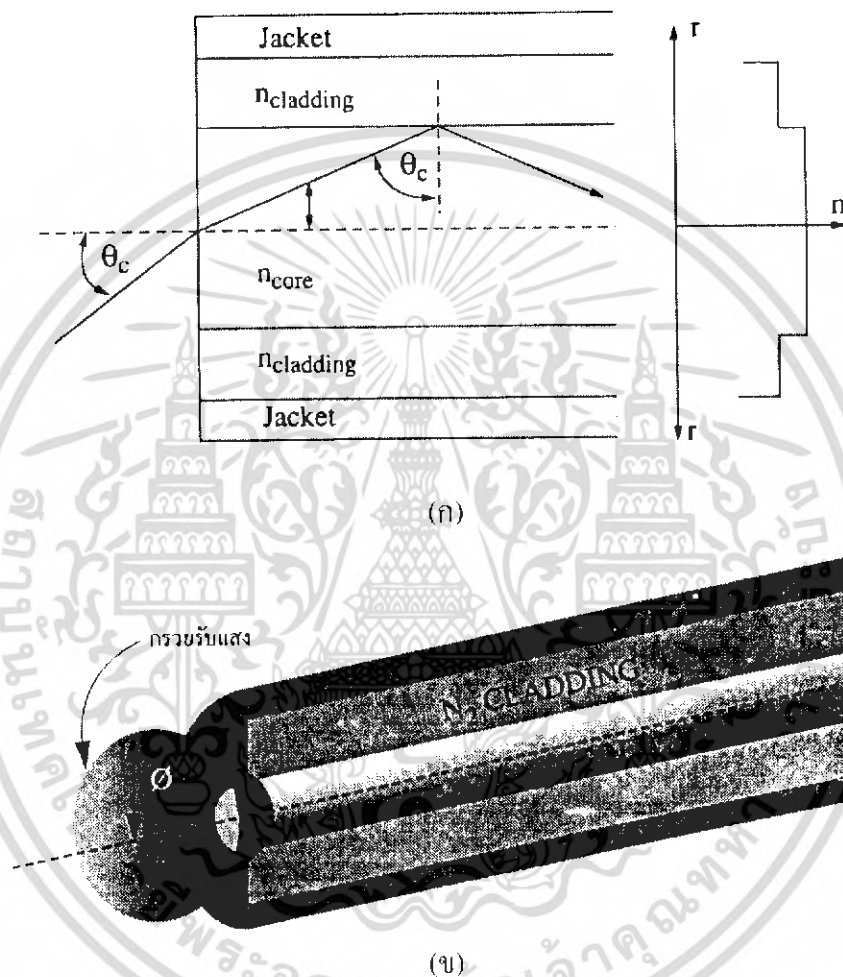
เงื่อนไขที่ $\Delta \ll 1$ เรียกว่า วิคิลีไกด์ (Weakly-guide)

2. ค่าผลต่างดัชนีหักเหจำเพาะ (Δ)

สำหรับค่าผลต่างดัชนีหักเหจำเพาะนั้นเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงขนาดของความแตกต่างของดัชนีหักเหแสงในส่วนแกน และแคลด โดยกำหนดค่าผลต่างดัชนีหักเหจำเพาะดังสมการ

$$\Delta = \frac{(n_{core} - n_{cl})}{n_{core}} \quad (2.17)$$

โดยทั่วไปค่าผลต่างดัชนีหักเหจำเพาะจะมีค่าน้อยกว่า 1 มาก จึงมักจะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์โดยค่าผลต่างดัชนีหักเหถ้าหากมีค่ามากจะทำให้ง่ายต่อการป้อนแสงเข้าไปในแกน

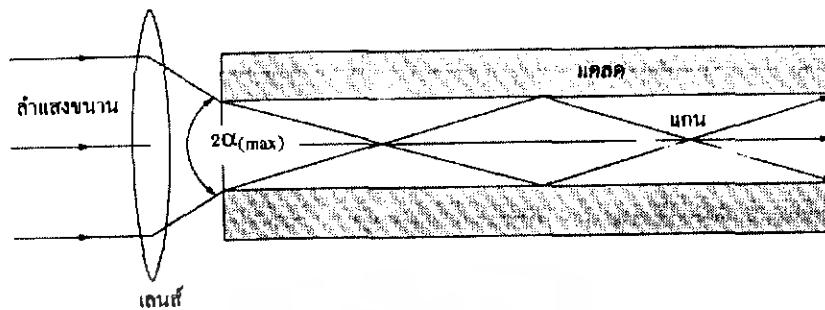


รูปที่ 2.13 โคโระแกรมของการหา NA ของใยแก้วชนิดดัชนีหักเหชั้นบันได

3. มุมรับแสง

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าการที่แสงสามารถเดินทางเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงได้นั้น มุมตกกระทบที่ปลายของเส้นใยแก้วนำแสงจะต้องมีค่าน้อยกว่า α_{max} พิจารณารูปที่ 2.14 ดังนั้น มุมรับแสงที่เหมาะสมจึงหมายถึงมุมที่มีค่าเป็น 2 เท่าของ α_{max}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยแก้วนำแสง

นั่นหมายถึงความสัมพันธ์ของผลต่างดัชนีหักเหจำเพาะ นิวเมอริคัลแอปเจอร์เจอร์ และมุมรับแสงอธิบายจากตัวอย่างของเส้นใยแก้วนำแสงดังนี้คือ

$$\begin{aligned} n_{\text{core}} &= 1.53, & n_{\text{cl}} &= 1.50, & n_0 &= 1 \\ \theta_c &= \sin^{-1}(1.50/1.53) & &= 78.6^\circ \\ \Delta &= (1.53-1.50)/1.53 & &= 0.0196 = 1.96\% \\ \text{NA} &= 1.53(2 \times 0.0196)^{1/2} & &= 0.303 \\ \alpha_{(\text{max})} &= \sin^{-1} 0.303/1 & &= 17.6^\circ \end{aligned}$$

2.1.2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดแสง

หลักการต่างๆ ไปของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงอาศัยกลไก 2 แบบ คือ เอกซ์เทอร์นัลโฟโตอิเล็คทริกเอฟเฟ็คท์ (External Photoelectric Effect) ซึ่งเป็นกลไกที่เกิดขึ้นเนื่องจากอิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยแสงจากผิวของโลหะนั้น ตัวอย่างของอุปกรณ์ชนิดนี้คือ โฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier) ส่วนกลไกอีกแบบคือ อินเทอร์นัลโฟโตอิเล็คทริกเอฟเฟ็คท์ (Internal Photoelectric Effect) เป็นกลไกซึ่งเกิดขึ้นที่ในรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Junction) โดยโฟตอนที่ถูกดูดกลืนที่บริเวณรอยต่อดังกล่าวทำให้เกิดอิเล็กตรอนและโฮลขึ้น ตัวอย่างอุปกรณ์รับแสงชนิดนี้ก็คือ P-N Junction Photo Diode, PIN Photodiode ซึ่งอุปกรณ์ตรวจวัดทางแสงทั้งหลายนี้ต้องพิจารณาถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญบางตัวของอุปกรณ์รับแสงโดยทั่วไปก่อนดังนี้

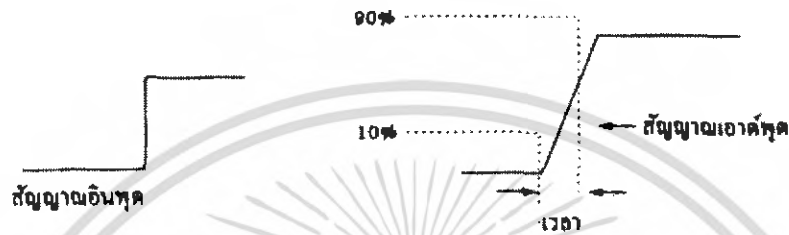
$$\text{Responsivity}(\rho) = \frac{I_o}{I_i} \quad (2.18)$$

เมื่อ ρ คือค่าการตอบสนองที่หน่วยเป็นแอมป์ต่อวัตต์ I_i และ I_o คือกำลังแสงอินพุต และเอาต์พุต ตามลำดับ โดยที่ค่า Spectral Response หมายถึงช่วงความถี่ที่อุปกรณ์รับแสงสามารถตอบสนองแสงที่มาตกกระทบ และไรส์ไทม์ (Rise Time, t_r) หมายถึงช่วงเวลาที่เอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงจาก 10% ไปเป็น 90% ของค่าสุดท้ายของการเปลี่ยนแปลง กรณีที่กำลังทางด้านอินพุตเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีลักษณะเป็นพัลส์นั้นจะมีค่าไรซ์ไทม์ของอุปกรณ์รับแสงจะมีความสัมพันธ์กับ 3 dB แบนด์วิดท์ตามสมการ

$$f_{3-dB} = 0.35/t_r \quad (2.19)$$

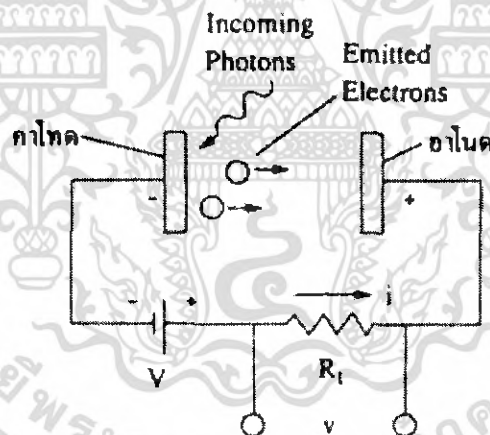
เมื่อ f_{3-dB} คือแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์รับแสง



รูปที่ 2.15 แสดงไรซ์ไทม์ของอุปกรณ์รับแสง

โดยหลักการทำงาน โดยย่อของอุปกรณ์ตรวจวัดแสง มีดังต่อไปนี้

- แวกคัมโฟโตไดโอด Vacuum Photodiode



รูปที่ 2.16 แสดงโครงสร้างของแวกคัมโฟโตไดโอด

จากรูป 2.16 กระแสที่เกิดขึ้นหลังจากมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจาก คาโทด ไปยังอานอด หลังจากมีแสงตกกระทบบไปยังคาโทดสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$i = \frac{\eta e \lambda P}{hc} = \frac{\eta e P}{hf} \quad (2.20)$$

โดยที่ η คือประสิทธิภาพควอนตัม (Quantum Efficiency) เมื่อ hf คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมา หรือจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบบ e คือ ประจุของอิเล็กตรอน λ คือความยาวของคลื่นแสงที่ตกกระทบบ f คือ ความถี่ของแสงที่ตกกระทบบ P คือกำลังของแสงที่ตกกระทบบ h คือ ค่าคงที่

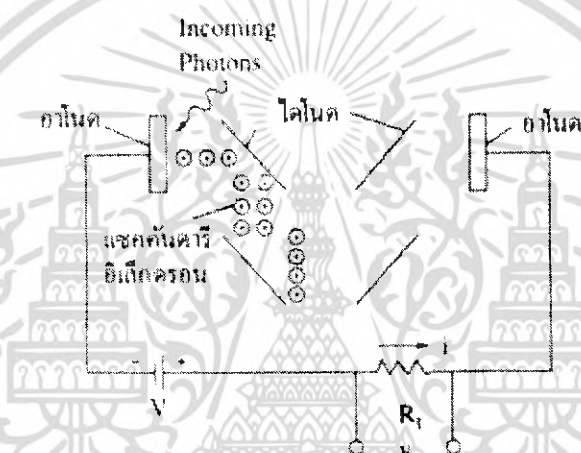
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของพลังค์(Planck's Constant) และ c คือ ความเร็วของแสงสำหรับแรงดันเอาต์พุต(V) สามารถเขียนได้เป็น

$$V = \rho PR_L \quad (2.21)$$

โดยที่ R_L คือความต้านทานของโหลด (Load Resistance)

สังเกตได้ว่าเอาต์พุตแปรผันตรงกับค่ากำลังของแสงที่ตกกระทบบุปกรณัมรับแสงสมการที่ 2.20 และ สมการที่ 2.21 สามารถใช้ได้กับอุปกรณ์ที่มีกลไกทั้งแบบ internal และ external ซึ่งได้มีการพัฒนาให้มีค่าการตอบสนองสูงขึ้นเรียกว่า โฟโตมัลติพลายเออร์ โดยมีโครงสร้างดังรูป 2.17 ซึ่งมีวิธีการเพิ่มขั้วไดโนด (Dynode) ทำให้เกิดเซกคันดารีอิเล็กตรอน (Secondary Electron)



รูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างของโฟโตมัลติพลายเออร์

- โฟโตไดโอดสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Photodiode)

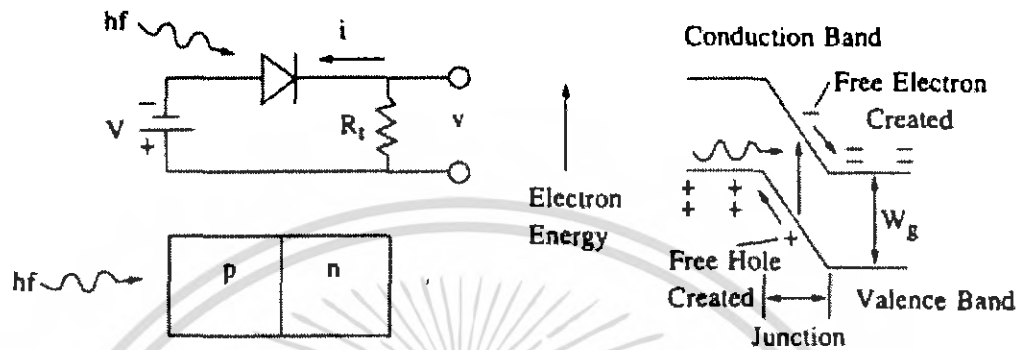
โฟโตไดโอดสารกึ่งตัวนำนั้นมีขนาดเล็ก มีความไวสูง มีโรซัทม์สั้นและอาศัยไฟเลี้ยงแรงดันต่ำอุปกรณ์รับแสงชนิดนี้ จึงเป็นที่นิยมในงานทางด้านการสื่อสารผ่านทางเส้นใยแก้วนำแสง โดยมีตัวอย่างอุปกรณ์ดังนี้

- พีเอิน โฟโตไดโอด

หลักการทํางานของโฟโตไดโอดสารกึ่งตัวนำ มีดังนี้ โฟโตไดโอดได้รับการไบอัสย้อนกลับ (Reverse Bias) เกิดจํงชั้นบริเวณรอยต่อระหว่าง p กับ n ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่มีอนุภาคตัวนำอิสระอยู่ที่บริเวณดังกล่าว เรียกว่า บริเวณดีพลีทชัน (Depletion Region) (3) อิเล็กตรอนลงมาบนบริเวณดีพลีทชันทำให้เกิดอนุภาคตัวนำอิสระอิเล็กตรอนและโฮล (Electron and Hole) ขึ้น เกิดเป็นกระแสไหลในวงจรรภายนอก โดยทั่วไปพีเอินโฟโตไดโอดมีโรซัทม์อยู่ช่วง μs ซึ่งไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งานทางด้านการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงที่มีอัตราการส่งข้อมูลที่สูง และนอกจากนี้อุปกรณ์รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

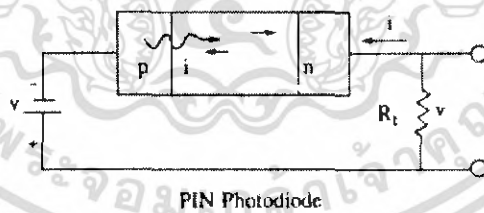
แสงชนิดนี้ยังมีการตอบสนองต่ำ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาอุปกรณ์รับแสงอีกชนิดหนึ่งขึ้นมาคือ ฟินโฟโตไดโอด



รูปที่ 2.18 แสดงพีเอ็นโฟโตไดโอด

- ฟินโฟโตไดโอด

เป็นอุปกรณ์ที่นิยมอย่างมากในการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง หลักการทำงานจะคล้ายคลึงกับพีเอ็นโฟโตไดโอด แต่ฟินโฟโตไดโอดได้รับการปรับปรุงให้มีชั้นอินทรีนสิก (ส่วนที่ไม่มีอนุภาคอยู่ภายใน) ที่กว้าง จึงเท่ากับเพิ่มโอกาสให้เกิดอนุภาคตัวนำ (Electron and Hole) หรือกระแสไหลในวงจรภายนอกได้มากขึ้นนั่นเอง ซึ่งนอกจากจะทำให้การตอบสนองสูงขึ้นแล้ว ยังทำให้โรซีทึมสั้นลงอีกด้วย



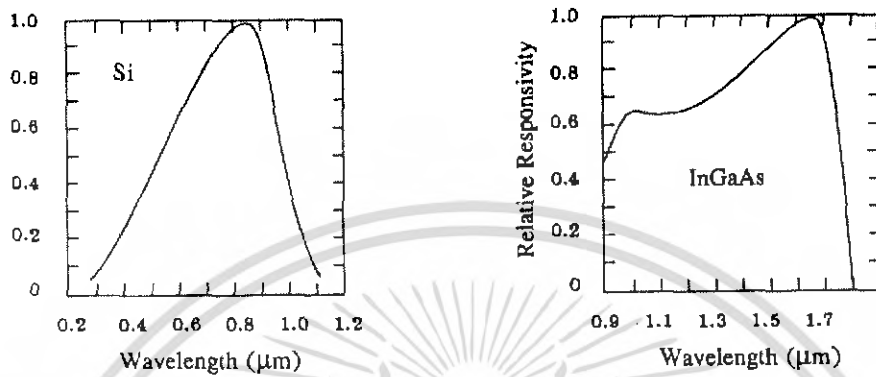
รูปที่ 2.19 แสดงโครงสร้างของ ฟินโฟโตไดโอด

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าต่างๆของฟินโฟโตไดโอด

Material	Wavelength Range (μm)	Wavelength of Peak Response (μm)	Peak Responsivity (A/W)
Silicon	0.3-1.1	0.8	0.5
Germanium	0.5-1.8	1.55	0.7
InGaAs	1.0-1.7	1.7	1.1

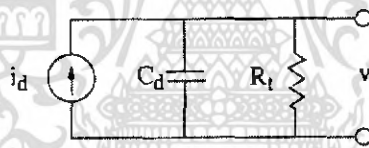
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางแสดงสารชนิดต่างๆที่ใช้ในการทำงานพินโฟโตไดโอด โดยสารแต่ละชนิดจะเหมาะกับการรับสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงสเปกตรัมresponsivityของพินโฟโตไดโอด ซึ่งทำมาจาก Si และ InGaAs

เนื่องจากโครงสร้างของพินโฟโตไดโอดสามารถเขียนแทนได้ด้วยวงจรสมมูล (Equivalent Circuit) ดังรูปที่ 2.21 ดังนั้นค่าไรซ์ไทม์ของพินโฟโตไดโอดอาจเขียนได้เป็น



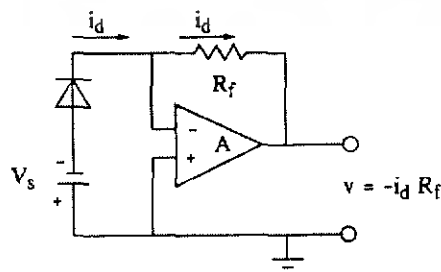
รูปที่ 2.21 แสดงวงจรสมมูลจากโครงสร้างของพินโฟโตไดโอด

$$t_r = 2.99 R_L C_d \quad (2.22)$$

ซึ่งสัมพันธ์กับแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์รับแสงดังนี้

$$f_{3-dB} = 1/(2\pi R_L C_d)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าความต้านทาน R_L และค่าความจุ C_d มีส่วนในการกำหนดค่าแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์รับแสง (ดูรูปที่ 2.22 ประกอบ)



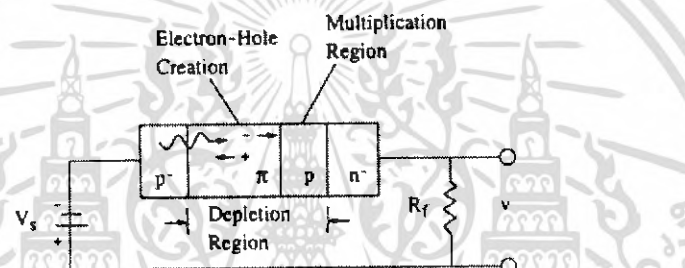
รูปที่ 2.22 แสดงวงจรขยายของพินโฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทํางานคือ เมื่อพินโฟโตไดโอดถูกไบแอสแล้ว หลังจากนั้นเมื่อได้รับแสงก็จะทำให้เกิดกระแส I_d ไหลในวงจรโดยที่กระแสนี้จะถูกขยายโดยใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Op-amp) ที่สัมพันธ์กับค่าความต้านทานป้อนกับ R_f

- อวาลานซ์โฟโตไดโอด (APD)

รูปที่ 2.23 แสดงอุปกรณ์ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อให้มีความไวที่สูงกว่าพินโฟโตไดโอด เนื่องจากโครงสร้างของ APD เอื้ออำนวยให้เกิดอัตราการขยายกระแสได้จากภายนอก กรณีของพินโฟโตไดโอดซึ่งการใช้วงจรขยายภายนอกนี้มีโอกาสทำให้คุณภาพของสัญญาณด้อยลงมาเนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกิดจากวงจรที่ต่อเพิ่มเติมเข้าไปนั่นเอง



รูปที่ 2.23 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์และหลักการทํางานอวาลานซ์โฟโตไดโอด (APD)

เนื่องจาก APD มีอัตราการขยายกระแสสูงกว่าพินโฟโตไดโอด ดังนั้น APD จึงได้ถูกนำมาใช้กับระบบสื่อสารทางแสงที่กำลังของแสงจะมีโอกาสลดต่ำลงมากๆ เช่น การสื่อสารระยะไกลสำหรับระบบสื่อสารทางแสงที่มีความเหมาะสมจะใช้ APD ที่กำลังของแสงควรมีอยู่ในช่วงของ nW แต่ถ้ากำลังของแสงมีค่าสูงว่านั้นเช่นอยู่ในช่วงของ mW แล้วพินโฟโตไดโอดมีความเหมาะสมและสะดวกกว่า เนื่องมาจากการทํางานของ APD ต้องใช้การไบแอสย้อนกลับหลายร้อยโวลต์ และอัตราการขยายของ APD ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอีกด้วย สำหรับในงานด้านการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง อุปกรณ์รับแสงที่นิยมใช้กันมีอยู่ 2 ชนิดคือ PIN และ APD ซึ่งการเลือกใช้อุปกรณ์รับแสงชนิดใดนั้นก็ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของระบบการสื่อสารเป็นสำคัญ เช่น เงื่อนไขเรื่องกำลังของแสง ไรซ์ไทม์ ราคา หรือแม้แต่การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ซึ่งตารางที่ 2.3 จะแสดงถึงคุณลักษณะของ PIN และ APD ที่น่าสนใจ

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง

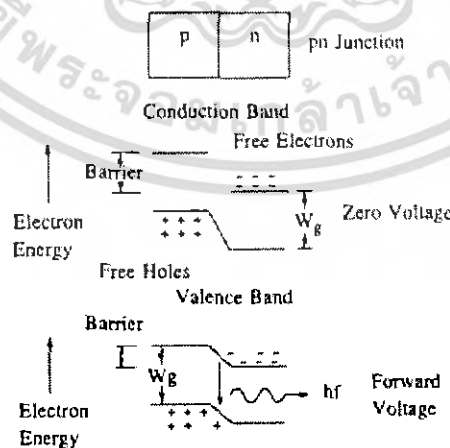
Material	Structure	Rise Time (ns)	Wavelength (nm)	Responsivity (A/W)	Dark Current (nA)	Gain
Silicon	PIN	0.5	300-1100	0.5	1	1
Germanium	PIN	0.1	500-1800	0.7	200	1
InGaAs	PIN	0.3	1000-1700	0.6	10	1
Silicon	APD	0.5	400-1000	77	15	150
Germanium	APD	1.0	1000-1600	30	700	50

2.1.2.4 แหล่งกำเนิดแสง

แหล่งกำเนิดแสงที่นิยมใช้กันมากในระบบแสงและเส้นใยแก้วนำแสงได้แก่ แหล่งกำเนิดแสงสารกึ่งตัวนำเช่น ไดโอดเลเซอร์ (Laser Diode) และ ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode, LED) ด้วยคุณสมบัติทางแสงและขนาดที่เหมาะสมกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กของเส้นใยแก้วนำแสงที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าต่ำ

- ไดโอดเปล่งแสง

LED เป็นสารกึ่งตัวนำแบบรอยต่อพีเอ็นดังรูปที่ 2.24 แสดงถึงรอยต่อสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าและแถบพลังงานที่เกี่ยวข้องกับ ไดโอด แถบพลังงานด้านบนจะเรียกว่า แถบนำ (Conduction Band) ในระดับของพลังงานด้านล่างเรียกว่า แถบวาเลนซ์ (Valence Band)



รูปที่ 2.24 แสดงรอยต่อสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าและแถบพลังงานที่เกี่ยวข้องกับ ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาผลต่างของระดับพลังงานทั้งสองมีค่าเท่ากับ W_g ซึ่งก็คือช่องว่างแถบพลังงาน (Bandgap Energy) กล่าวคือ โสลมีประจุบวกซึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนที่เป็นกลางปล่อยให้อะตอมประจุบวกอิเล็กตรอนอิสระจะสามารถรวมตัวกับโสลแล้วกลับเป็นอะตอมที่มีสภาวะเป็นกลางอีกครั้ง ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้จะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมา จากสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอน (W_g) กับความถี่ ($h\nu$) ของประจุคือ

$$W_g = h\nu \quad (2.23)$$

โดยจะให้ความยาวคลื่นของแสงที่ส่องสว่างคือ

$$\lambda = hc/W_g \quad (2.24)$$

ซึ่งช่องว่างแถบพลังงาน มีหน่วยเป็นจูล (Joules) และความยาวมีหน่วยเป็นเมตร ถ้าเขียนพลังงานช่องว่างในรูปของอิเล็กตรอนโวลต์ (Electron Volts, eV) และความยาวคลื่นในหน่วยไมครอน จะได้ว่าสมการ 2.24 เขียนได้เป็น

$$\lambda = 124/W_g \quad (2.25)$$

ด้วยเหตุที่วัสดุและส่วนผสมที่ต่างกันย่อมทำให้ได้ช่องว่างแถบพลังงานที่แตกต่างกันด้วย วัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์ส่ง (Emitter) โดยมีความยาวคลื่นและช่องว่างแถบพลังงานแสดงดังตารางที่ 2.4 ช่วงความยาวที่คลื่นสามารถใช้งานได้สามารถเลือกโดยการแปรเปลี่ยนอัตราส่วนองค์ประกอบของอะตอมใน AlGaAs, InGaAs และ InGaAsP การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้ช่องว่างแถบพลังงานและความยาวคลื่นเกิดการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 2.4 แสดงลักษณะและคุณสมบัติของ LED

Material	Wavelength Range (μm)	Bandgap Energy (eV)
GaAs	0.9	1.4
AlGaAs	0.8	1.4-1.55
InGaAs	1.0-1.3	0.95-1.24
InGaAs	0.9-1.7	0.73-1.35

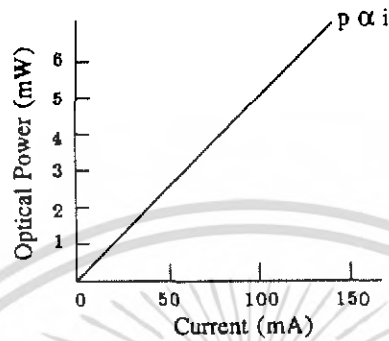
กำลังของแสงจาก LED นั้นจะเป็นอัตราส่วนเชิงเส้นกับกระแสดังรูปที่ 2.25 ซึ่งความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างกำลังและกระแสไฟฟ้าอธิบายได้ดังนี้คือ กระแสซึ่งมีจำนวนประจุต่อวินาทีเป็น $N = i/e$ คือขนาดของประจุบนอิเล็กตรอนแต่ละตัว ถ้า η คือประสิทธิภาพควอนตัม หรือคืออัตราส่วนของประจุเหล่านี้ที่มีการรวมตัวและให้โฟตอนออกมาแล้วกำลังของแสงจะเป็น

$$P = \eta N W_g = \eta W_g (i/e) \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของแสงกับค่ากระแสเป็นเชิงเส้น ถ้าเขียนให้อยู่ในรูปอิล็กตรอน โวลต์จะได้สมการที่เข้าใจได้ง่ายขึ้น คือ

$$P = \eta i W_g \quad (2.27)$$

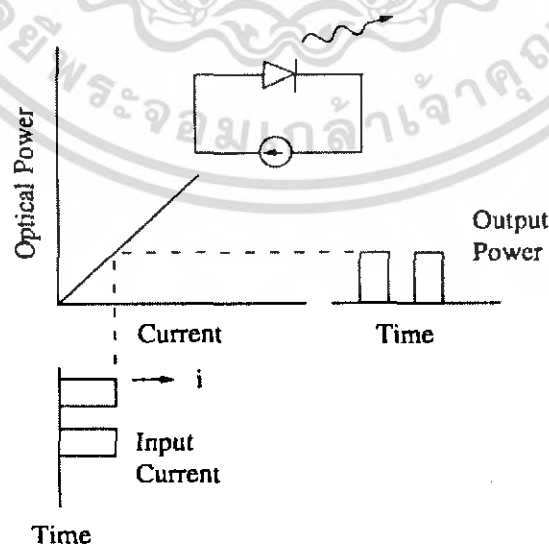


รูปที่ 2.25 แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างกำลังของแสงจาก LED กับกระแสไฟฟ้า

ค่ากราฟของกำลังดังแสดงในรูปนั้นจะไม่ปรากฏจริงภายในเส้นใยแก้วนำแสง อันเนื่องจากขีดจำกัดทางด้าน NA ของเส้นใยแก้วนำแสงจะเป็นตัวลดทอนค่ากำลังที่ส่งเข้าไป การทำงานปกติจะไปแอสให้กระแสไหลผ่าน LED อยู่ในช่วง 50-100 mA และต้องการแรงดันประมาณ 1.2-1.8 โวลต์

- การมอดูเลชัน

ดิจิตอลมอดูเลชัน (Digital Modulation) แสดงดังรูปที่ 2.26 ได้โดยถูกมอดูเลตที่แหล่งกำเนิดกระแสซึ่งทำให้ LED ติดหรือดับที่มีลักษณะเป็นรหัสของวิธีการมอดูเลตแบบดิจิตอล



รูปที่ 2.26 แสดงการทำงานของดิจิตอลมอดูเลชัน (Digital Modulation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอนะล็อกมอดูเลชัน (Analog Modulation) จากรูปที่ 2.27 จะเป็นว่าถ้าต้องการแรงดันไฟกระแสตรงเพื่อให้เกิดกระแสไหลไปข้างหน้า (Forward Direction) ตลอดเวลา ถ้าปราศจากกระแสตรงการแกว่งของสัญญาณในช่วงลบจะเป็นการไบแอสย้อนกลับไดโอดซึ่งทำให้ดับ โดยมีกระแสรวม (I) ทั้งหมดได้เป็น

$$I = I_{dc} + I_{sp} \sin \omega t \quad (2.28)$$

และสอดคล้องกับกำลังของแสงคือ

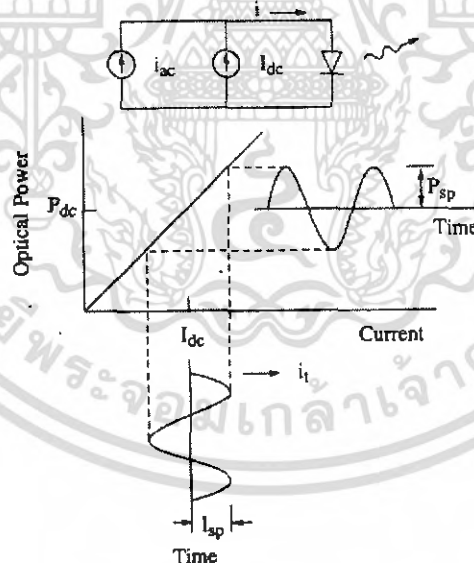
$$P = P_{dc} + P_{sp} \sin \omega t \quad (2.29)$$

I_{dc} และ I_{sp} คือไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ

P_{sp} คือ Peak Signal Power เรียกว่ากำลังกระแสสลับ (AC Power) จะสังเกตเห็นว่ารูปร่างของกระแสอินพุตจะเหมือนกับกำลังของแสงเอาต์พุตอันเนื่องมาจากคุณสมบัติความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นระหว่างกำลังกับกระแส แต่การเบี่ยงเบนความเป็นเชิงเส้นทำให้เกิดการเพี้ยน (Distortion) ของสัญญาณ ค่าไรซ์ไทม์และ 3-dB แบนด์วิดท์ที่มีความสัมพันธ์กันตามสมการ

$$f_{3-dB} = 0.35 / t_r \quad (2.30)$$

ซึ่งค่าปกติไรซ์ไทม์ของ LED จะอยู่ในช่วง 2.3 ns จนถึง 250 ns



รูปที่ 2.27 แสดงการทำงานของแอนะล็อกมอดูเลชัน (Analog Modulation)

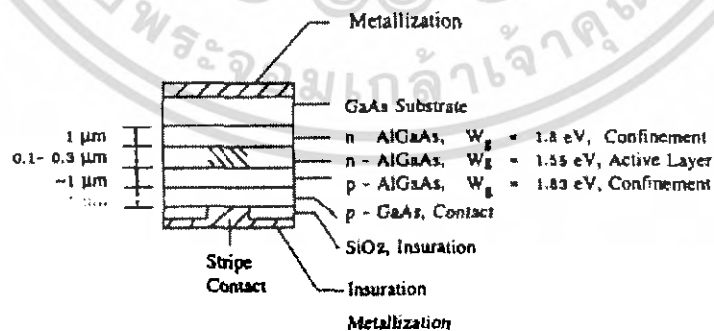
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เลเซอร์

เลเซอร์กึ่งตัวนำ (Semiconductor Laser) นับว่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการสื่อสารโดยใยแก้วนำแสง อย่างไรก็ตามยังมีเลเซอร์อีก 2 ชนิดได้แก่ แก๊สเลเซอร์ (Gas Laser) ที่ทำงานในสเปกตรัมที่เห็นได้ (Visible Spectrum) และ Nd:YAG (Neodymium Yttrium - aluminium Garnet Laser) ที่ปลดปล่อยแสงในช่วงความยาวคลื่น 1.06 μm

- ไดโอดเลเซอร์

LD และ LED มีรูปทรงคล้ายคลึงกับ โครงสร้างของไดโอดเลเซอร์ชนิด AlGaAs แสดงดังรูปที่ 2.28 เมื่อเราทำการไบแอสไปข้างหน้า ประจุจะถูกปล่อยเข้าไปในชั้นแอคทีฟ (Active Layer) ที่ซึ่งเกิดการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้มีการปลดปล่อยโฟตอนออกมาทันที ประจุบางส่วนถูกกระตุ้นให้ปล่อยโฟตอน โดยโฟตอนตัวอื่น ถ้าความหนาแน่นของกระแสมีค่าสูงพอประจุจำนวนมากที่ปล่อยเข้าไปทำให้มีการกระตุ้นและทำให้เกิดการรวมตัวแล้ว อัตราการขยายทางด้านแสงจะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการขยายมากเพียงพอที่จะหักล้างการสูญเสียใน ไดโอดได้ก็จะทำให้เกิดกระแสขีดเริ่ม (Threshold Current) ถึงจุดนี้ก็ต้องรักษาระดับของกระแสขีดเริ่มเปลี่ยนให้น้อยเข้าไว้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจุดเริ่มเปลี่ยนที่มีค่าต่ำนั้นจะช่วยจำกัดการปล่อยประจุและคลื่นแสงเข้าไปในชั้นแอคทีฟ โดยเฮเทอโรจังก์ชัน (Heterojunction) โดยการจำกัดขอบเขตของประจุในทิศทางแนวดิ่ง ส่วนการจำกัดขอบเขตในทิศทางที่ขนานกับรอยต่อทำโดยปล่อยประจุทั่วความกว้างเล็กๆของสตริป (Stripe) ประมาณ 10-20 μm และขณะที่เคลื่อนที่เข้าไปในชั้นของการรวมตัว ความยาวคลื่นเอาต์พุตคำนวณได้จากช่องว่างพลังงานคือ 1.55 eV ของบริเวณแอคทีฟมีค่าเท่ากับ 0.8 μm สำหรับ LD แสดงได้ดังรูปที่ 2.28



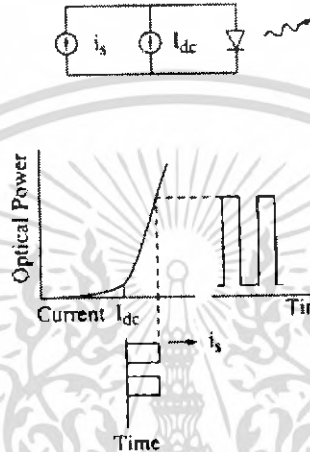
รูปที่ 2.28 แสดงไดโอดเลเซอร์ชนิด AlGaAs

โดยทั่วไปกำลังเอาต์พุตของเลเซอร์ที่ทำงานอย่างต่อเนื่องมีค่าปกติในช่วง 1-10 mW พัลส์เลเซอร์ทำงานที่คิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ต่ำนั้นสามารถให้ค่ายอดของกำลังที่สูงกว่าเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

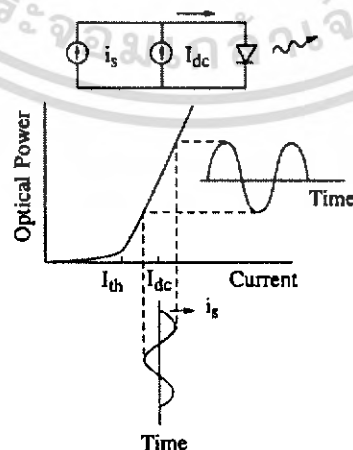
ต่อเนื่อง (CW) ที่สามารถเปิด - ปิดในอัตราสูงจะมีประโยชน์อย่างมากสำหรับระบบการใช้งาน ช่วงกระแสทำงาน โดยปกติอยู่สูงกว่ากระแสขีดเริ่มเปลี่ยนประมาณ 20-40 mA การทำงานที่กระแสสูงกว่าที่กำหนดจะทำให้ไดโอดมีช่วงอายุการใช้งาน (Life Time) ที่สั้น

ดิจิทัลมอดูเลชันของไดโอดเลเซอร์แสดงดังรูปที่ 2.29 ซึ่งแตกต่างจากของ LED ที่กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 2.29 แสดงการมอดูเลตแบบดิจิทัลอนันต์มี I_{dc} เป็นกระแสขีดเริ่มเปลี่ยนเมื่อกระแส i_s เป็นศูนย์ สำหรับแอนะล็อกมอดูเลชัน

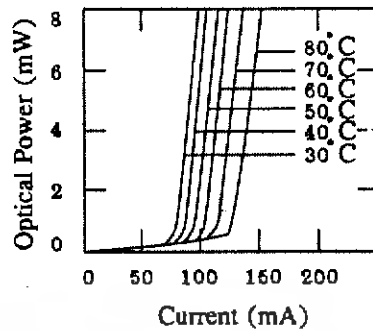
ในรูปที่ 2.30 พบว่ากระแสไบแอสอยู่สูงกว่ากระแสขีดเริ่มเปลี่ยนที่บริเวณเชิงเส้นของความสัมพันธ์กำลังและกระแสไบแอส ไดโอดเลเซอร์มีความไวต่ออุณหภูมิมากกว่า LED ดังแสดงในรูปที่ 2.31 ขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่ากระแสขีดเริ่มก็มากขึ้นด้วย (เพิ่มขึ้นประมาณ $1.5\%/^{\circ}\text{C}$) ดังนั้นที่กระแสคงที่ กำลังเอาต์พุตจะลดลง ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 2.30 แสดงการมอดูเลตแบบแอนะล็อกอนันต์มี I_{dc} เป็นกระแสขีดเริ่มเปลี่ยน

เมื่อกระแส i_s เป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.31 ความสัมพันธ์กำลังและกระแสไบแอสในไดโอดเลเซอร์

ในกรณีการเปลี่ยนแปลงกำลังอาจยอมรับไม่ได้ เพราะทำให้การรับข้อมูลผิดพลาดมากขึ้น ถ้ากำลังลดลงมากอาจรับสัญญาณไม่ได้ ซึ่งการแก้ปัญหาเหล่านี้มีอยู่ 2 วิธี คือ ควบคุมอุณหภูมิของไดโอดให้คงที่และเปลี่ยนกระแสไบแอสเพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงกระแสขีดเริ่มเปลี่ยน โดยวิธีการควบคุมอุณหภูมิจะใช้รอยต่อของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งการเปลี่ยนอุณหภูมิขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสที่ไหลผ่านไดโอดเลเซอร์ เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor) เป็นส่วนหนึ่งของวงจรควบคุมที่ใช้เปลี่ยนกระแสที่ไหลผ่านสารกึ่งตัวนำเพื่อให้อุณหภูมิของไดโอดเสถียร อีกวิธีการหนึ่งเพื่อให้กำลังเสถียรคือ อุปกรณ์รับสัญญาณย้อนกลับมายังเลเซอร์แล้วทำการเปลี่ยนค่ากระแสตรงสู่ค่ากำลังที่ต้องการ

นอกจากแหล่งกำเนิดแสงไดโอดเลเซอร์ข้างต้นแล้ว ยังมีไดโอดเลเซอร์อีกบางประเภทที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน แต่สามารถเพิ่มกำลังของแหล่งกำเนิดแสงได้ โดยปรับโครงสร้างของไดโอดเลเซอร์ให้มีชั้นอินทรินสิก (Intrinsic) ที่เจือปนสารกึ่งตัวนำ โดยเรียกว่าไดโอดเลเซอร์ประเภทขั้วไอแอลดี (Injection Laser Diode, ILD) ซึ่งจะมีกำลังเอาต์พุตมากขึ้น อีกกรณีนั้นทำให้ลำแสงเอาต์พุตของไดโอดเลเซอร์นั้นออสซิลเลตอยู่ในแควิตี้ฟาบรี-เพอร์โรต์ เพื่อทำการกรองสัญญาณที่มีความยาวคลื่นหรือความถี่เปลี่ยนไป

ตารางที่ 2.5 แสดงคุณลักษณะของแหล่งกำเนิดแสงแบบสารกึ่งตัวนำ

Property	LED	Multimode Laser Diode	Single-Mode Laser Diode
Spectral Width (nm)	20-100	1-5	<0.2
Rise Time (ns)	2-2.5	0.1-1.0	0.05-1.0
Modulation Bandwidth (MHz)	<300	2000	6000
Coupling Efficiency	Very Low	Moderate	High
Compatible Fiber	Multimode Si Multimode GRIN	Multimode GRIN Single-mode	Single-mode
Temperature Sensitivity	Low	High	High
Circuit Complexity	Simple	Complex	Complex
Life Time (Hours)	10^5	10^4 - 10^5	10^4 - 10^5
Costs	Low	High	Highest
Primary Use	Moderate Paths Moderate Data Rates	Long Path High Data Rates	Very Long Path Very High Rates

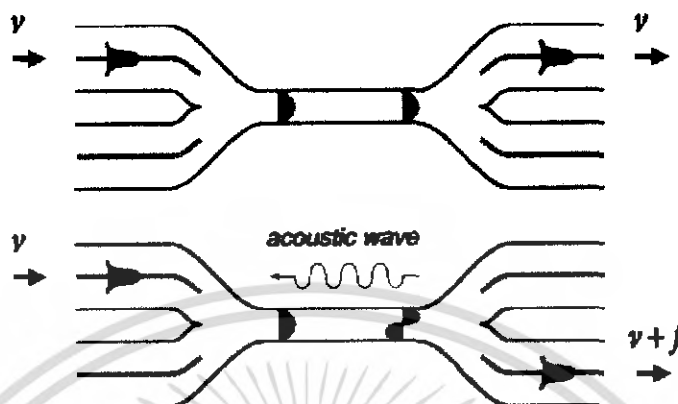
2.1.2.5 อุปกรณ์พาสซีฟทางแสง

2.1.2.5.1 คู่ควบ

คัปเปิลเลอร์ทางแสง (Coupler) หรือคู่ควบ เป็นอุปกรณ์ใยแก้วนำแสง ซึ่งทำหน้าที่ในการแยกหรือรวมลำแสงเข้าด้วยกัน ทั้งยังเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมในระบบสวิตชิงและมัลติเพลกซ์ได้ด้วย โครงสร้างทางกายภาพของคัปเปิลเลอร์แสดงดังรูปที่ 2.32

วิธีการทำคัปเปิลเลอร์โดยเริ่มจากการนำใยแก้วสองเส้นมาให้ความร้อนจนกระทั่งได้เป็นคัปเปิลเลอร์สำหรับการใช้งาน พิจารณาตัวอย่างเช่น ถ้ามีแสงถูกส่งเข้าไปในพอร์ตที่ 1 เอาต์พุตจะออกมาทางพอร์ตที่ 2 และ 3 เป็นต้น โดยไม่มีเอาต์พุตออกมาทางพอร์ตที่ 4 เลย ซึ่งกลไกนี้สำหรับการส่งสัญญาณในทางตรงกันข้ามก็คล้ายคลึงกับคัปเปิลเลอร์ใยแก้วนำแสงมีให้เลือกหลายแบบ ดังตัวอย่างในรูปเป็นแบบ 2x2 (มี 4 พอร์ต) ซึ่งมีอัตราส่วนของการแยกแอมพลิจูดของแสงขึ้นอยู่กับระยะสัมผัสของแกนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสอง (Coupling Length , L) คัปเปิลเลอร์เป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นชนิดหนึ่งในงานด้านเครือข่ายใยแก้วนำแสงสำหรับการแยกรวมลำแสงเข้าด้วยกัน ซึ่งมีผลดีก็เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือทำให้ระบบเครือข่ายมีขนาดที่เล็กลง และอำนวยความสะดวกในการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง หลากหลายจุดเข้าด้วยกัน



รูปที่ 2.32 แสดงโครงสร้างทางกายภาพของคัปเปลอร์

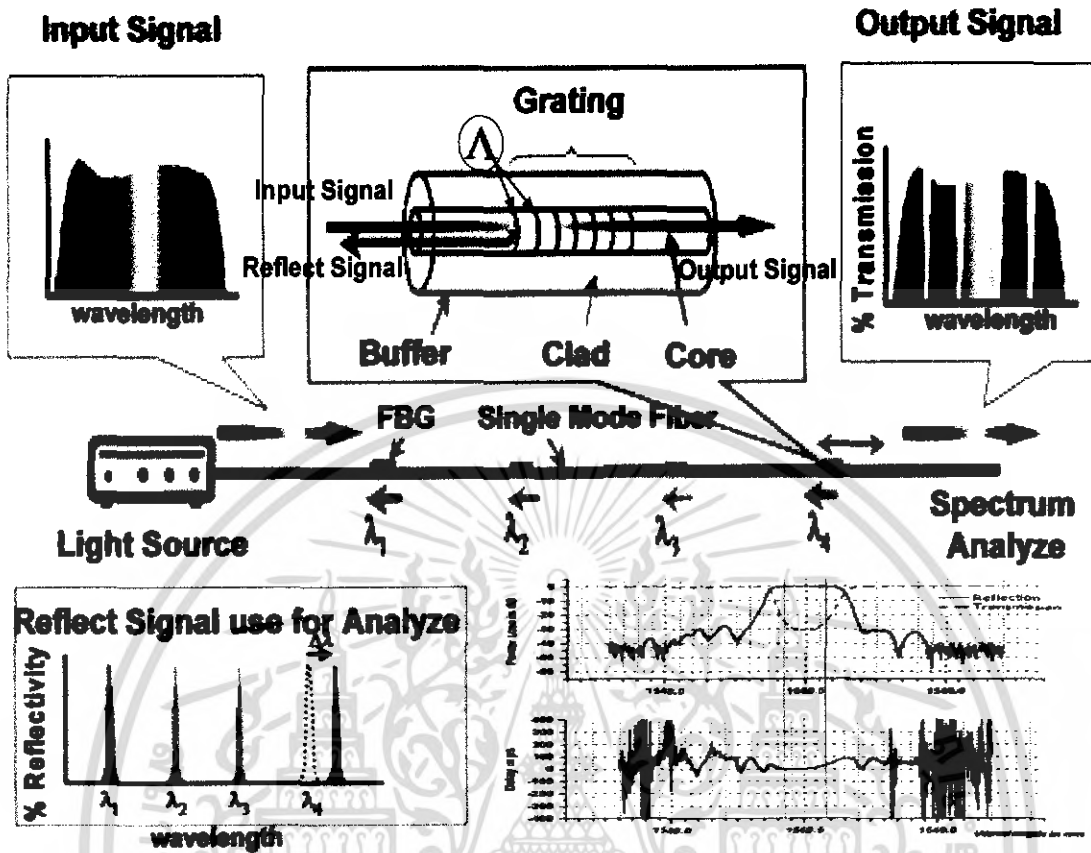
2.1.2.5.2 แบริกเกรตติง

การพัฒนาทางด้านอุปกรณ์ในใยแก้วนำแสงอื่นๆเช่น ได้มีการทำอุปกรณ์ใยแก้วแบบ แบริกเกรตติง (Bragg Grating) มาใช้ร่วมในระบบสื่อสารใยแก้วด้วย ทั้งนี้ก็เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ของการประมวลสัญญาณซึ่งสามารถนำไปใช้ได้ทั้งทางด้านการสื่อสารและการตรวจวัดใยแก้ว นำแสง แบริกเกรตติงเป็นอุปกรณ์แถบความถี่แคบที่ใช้ในการเปลี่ยนความยาวคลื่นของแบรค (Bragg Wavelength) หรือทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์กรองสัญญาณ (Filter) ได้ ซึ่งความยาวคลื่นที่ ต้องการที่สัมพันธ์กับช่องระหว่างเกรตติงหรือที่เรียกว่าพิชเชอร์ (Pitch: L) ซึ่งสามารถควบคุมได้ และสามารถหาได้จากสมการ

$$\lambda_B = 2m n_c L \quad (2.31)$$

เมื่อ λ_B คือ ความยาวคลื่นของแบรค $m = 1, 2, 3, \dots, \infty$ ซึ่งก็คืออันดับของเกรตติงที่เกิด การสะท้อนกลับของความยาวคลื่น n_c คือ ดัชนีหักเหของแกนใยแก้วนำแสง การสร้างเกรตติงบน ใยแก้วนำแสงนี้สามารถสร้างได้โดยการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) ซึ่งมีวิธีสร้าง 3 วิธีด้วยกันคือ วิธีการแทรกสอดแสง วิธีการทำคั้นแถบที่เป็นเฟรม และวิธีการเขียน

แบรคเซนเซอร์เป็นอุปกรณ์ในการตรวจวัดซึ่งอาศัยความยาวคลื่นแสงในการตรวจวัด โดยสามารถให้ความละเอียดสูงหรือความไวที่สเปกตรัมทางแสง ซึ่งสิ่งเหล่านี้มีข้อจำกัดในการ ใช้ขงมและมีการสูง คอ้มระบบการตรวจวัดดังกล่าว ได้มีการพัฒนาหันต่างๆ เช่น โครงสร้างของ ระบบตรวจวัด รวมทั้งวิธีการคิมอลูเดชันซึ่งทำให้มีระดับความสามารถในการวัดสูงขึ้น และ ความคลาดเคลื่อนมีน้อยลง รูปที่ 2.33 เป็นตัวอย่างของแบรคเกรตติงที่สามารถนำไปใช้งานได้ทั้ง งานด้านสื่อสารและการตรวจวัดเพียงแต่เชื่อมต่อกับใยแก้วเท่านั้น



รูปที่ 2.33 แสดงลักษณะการทำงาน และ โครงสร้างของแบรกรรตติง

จากหลักการทำงานในรูปที่ 2.33 จะสนใจพิจารณาผลจากค่าความยาวคลื่นสะท้อนที่เปลี่ยนแปลงไปจากหลักการคลื่นสะท้อนของแบรกรรตติง เมื่อพิจารณาให้ส่วนแกน (Core) ของแบรกรรตติงมีค่าดัชนีหักเหเฉลี่ย (n_0) ดังนั้นค่าดัชนีหักเหสามารถเขียนได้ดังนี้

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \quad (2.32)$$

เมื่อ Δn คือ ขนาดช่วงกว้างคลื่นของดัชนีหักเหเหนือขึ้นมา z คือ ทิศทางในแนวแกนขนานตามยาวของเส้นใยแก้วแบรกรรตติง โดยใช้ทฤษฎีโทมคัปเปิล ของ Lam และ Garside เพื่อใช้ในการช่วยพิจารณาลักษณะคุณสมบัติการสะท้อนของช่วงแบรกรรตติง โดยค่าดัชนีหักเหของกรรตติงกับค่าคงที่ขนาดของการมอดูเลชันและความเป็นไปดังสมการนี้

$$R = \frac{\Omega^2 \sinh^2(sl)}{\Delta k^2 \sinh^2(sl) + s^2 \cosh^2(sl)} \quad (2.33)$$

เมื่อ R คือ คุณสมบัติการสะท้อนคลื่นที่ความยาว (l) และความยาวคลื่น(λ) Ω คือสัมประสิทธิ์การคัปปลิง Δk คือ ค่ามอดูเลชันที่เปลี่ยนแปลงไป และ s^2 คือ ผลต่างระหว่าง

กำลังสองของสัมประสิทธิ์การคับปลิงกับค่ากำลังสองของค่าเวกเตอร์คลื่นที่เปลี่ยนแปลงไป ($s^2 = (k^2 - \Delta k^2)$) โดยที่

$$\Omega = \frac{\pi \Delta n}{\lambda} M_p \quad (2.34)$$

เมื่อ M_p คือส่วนของกำลังในแกนของโหนดใยแก้วนำแสงโดยสามารถประมาณค่าให้ M_p เท่ากับ $1/v^2$ เมื่อ v คือความถี่ของโหมดใยแก้วนำแสง และ

$$\Delta k = k - \frac{\pi}{\lambda} \quad (2.35)$$

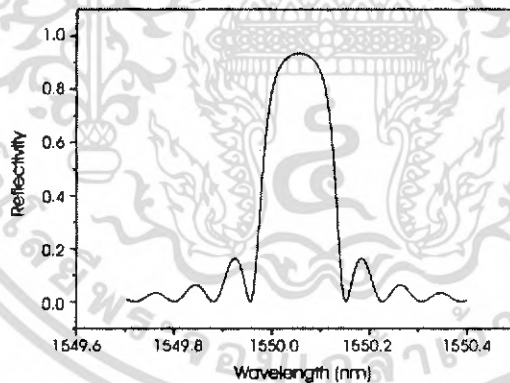
เมื่อ

$$k = \frac{2\pi n_0}{\lambda} \quad (2.36)$$

ได้ว่า k คือ ค่าคงที่การแพร่

ขณะที่ Δk เป็นศูนย์ หรือค่าเวกเตอร์คลื่นไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง จะได้ค่าการสะท้อนคลื่นสูงสุด (R_{\max}) ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ (2.34) ได้ใหม่ดังนี้

$$R_{\max} = \tanh^2(\Omega l) \quad (2.37)$$



รูปที่ 2.34 แสดงลักษณะความยาวคลื่นที่แบรคเกรตติงสะท้อนกลับ

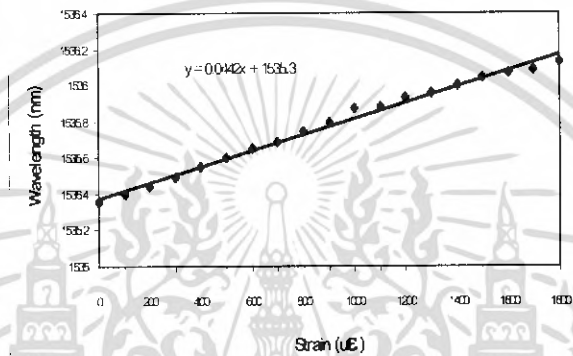
จากสมการที่ (2.38) ได้ว่าเมื่อค่าดัชนีการสะท้อนของคลื่น (R) เพิ่มมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การคับปลิงก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และ ความยาว (l) ของเกรตติงมีผลต่อค่าการสะท้อนคลื่นด้วยเช่นกันเมื่อนำมาพิจารณาสเปกตรัมที่สะท้อนกลับที่ความยาวคลื่นสะท้อนมีลักษณะเป็นดังแสดงในรูปที่ 2.34 พบว่ามีลอนของการกำทอนเนื่องด้วยจากการสะท้อนกลับของคลื่นหนึ่งที่มีความกว้างคลื่นสูงสุด (FWHM หรือ -3 dB) ที่ความยาวคลื่นต่างๆ และจากปลายช่วงทั้งสองของบริเวณเกรตติง

โดยสเปกตรัมรูปไซน์เพิ่มขึ้น ในรูปแบบอนุกรมฟูเรียร์ซึ่งทำให้เกิดลักษณะของสัญญาณฮาร์มอนิก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้เผยแพร่บนเว็บไซต์โดยไม่ผ่านการคัดลอก ไม่ว่าการมีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

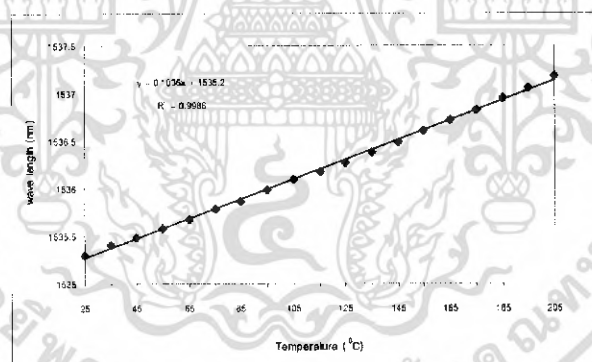
โดยทั่วไปแล้วจะสามารถประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงครึ่งหนึ่งที่มีความกว้างคลื่นสูงสุด(FWHM หรือ -3 dB)ที่แบนด์วิดจ์ของเกรตติงได้จาก

$$\Delta\lambda = \lambda_B S \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2} \quad (2.38)$$

เมื่อ N คือ จำนวนของแถบเกรตติงและ S มีค่าประมาณ 1 สำหรับเกรตติงที่มีความสมบูรณ์ (สะท้อนกลับเกือบ100%) มีค่า 0.5 สำหรับเกรตติงที่มีความสมบูรณ์น้อย



รูปที่ 2.35a ผลการตอบสนองที่เกิดจากความเค้น



รูปที่ 2.35b ผลการตอบสนองที่เกิดจากอุณหภูมิ

รูปที่ 2.35 การตอบสนองที่เกิดจากความเค้นและอุณหภูมิของแบรคเกรตติง

2.1.2.5.3 ความไวในการตอบสนองที่เกิดจากความเค้นและอุณหภูมิของแบรคเกรตติง

การกำหนดที่เกิดขึ้นเป็นช่วงกึ่งกลางของความยาวคลื่นสะท้อนกลับจากแบรคเกรตติงขึ้นอยู่กับค่าดัชนีหักเหภายในแกน (Core) และระยะคาบของเกรตติง โดยค่าดัชนีหักเหสะท้อนกลับนี้เกิดขึ้นจากช่องว่างระหว่างคาบของแถบเกรตติงซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงด้วยความเค้นและอุณหภูมิเมื่อพิจารณารูปที่ 2.35 พบว่าการเปลี่ยนแปลงกึ่งกลางของความยาวคลื่นของแบรคเกรตติงขึ้นกับความเค้นและอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l}\right)\Delta l + 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right)\Delta T \quad (2.39)$$

ในเทอมแรกของสมการที่ (2.39) นี้แสดงผลเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับความเค้นในใยแก้วนำแสง ซึ่งเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงระยะช่วงของเกรตติงเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหในเทอมของผลกระทบที่เกิดจากความเค้นนี้แสดงดังนี้

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\epsilon_z \quad (2.40)$$

เมื่อ p_e เป็นค่าคงที่ของผลกระทบที่เกิดจากความเค้นต่อใยแก้วนำแสง

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2}[p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (2.41)$$

เมื่อ p_{11} และ p_{12} เป็นองค์ประกอบของความเค้นจากความเค้นในใยแก้วนำแสง และ ν คืออัตราส่วน Poisson (Poisson's Ratio) โดยสำหรับใยนำแสงแบบ Germanosilicate $p_{11} = 0.113$ $p_{12} = 0.252$ $\nu = 0.16$ และ $n_{eff} = 1.482$ เมื่อนำพารามิเตอร์เหล่านี้ในสมการที่ (2.41) และให้การตอบสนองกลับของเกรตติงที่ความยาวคลื่นประมาณ 1550 nm พบว่า 1.2 pm จะเปลี่ยน 1 μE ของแบรคเกรตติงโดยผลการทดลองแสดงถึงการเลื่อนของกึ่งกลางของความยาวคลื่นสะท้อนกลับจากค่ากึ่งกลางความยาวคลื่นที่ 1548.2 nm ดังแสดงในรูปที่ (2.35a)

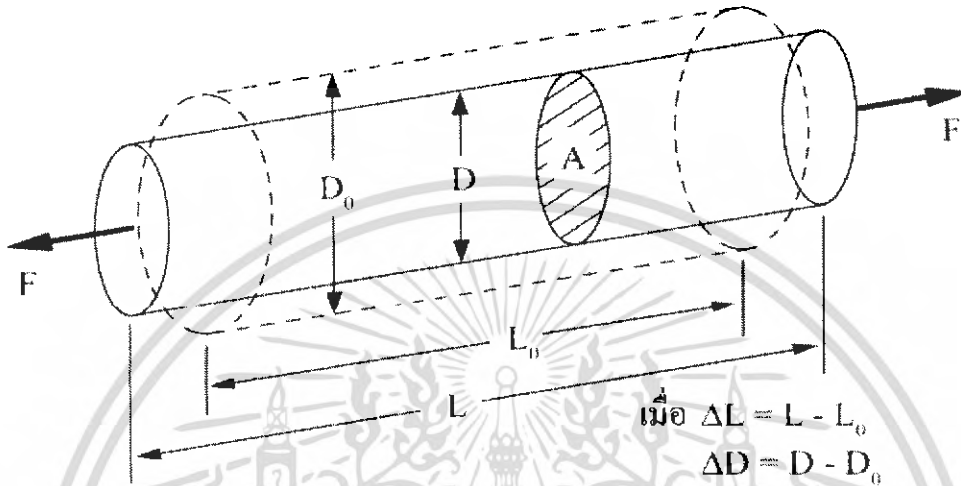
ส่วนในเทอมที่สองของสมการที่ (2.39) แสดงถึงผลกระทบของอุณหภูมิต่อใยแก้วนำแสงเมื่อความยาวคลื่นตอบสนองของแบรคเกรตติงเกิดการเปลี่ยนแปลงตามการขยายตัวของอุณหภูมิซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้มีผลต่อดัชนีหักเหในบริเวณเกรตติง โดยสามารถพิจารณาความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT) ดังนี้

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T \quad (2.42)$$

เมื่อ α_Λ คือสัมประสิทธิ์การขยายตัวของอุณหภูมิในใยแก้วนำแสง (ในซิลิกา มีค่าประมาณ 0.55×10^{-6}) และปริมาณ α_n สัมประสิทธิ์การขยายตัวของแก้วต่ออุณหภูมิมีค่าประมาณ 8.6×10^{-6} ในแกนใยแก้วนำแสงที่เจือด้วย Germanium ดัชนีที่เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนนี้เป็นผลกระทบที่สำคัญจากสมการที่ (2.42) โดยให้ค่าความยาวคลื่นที่ตอบสนองที่ 1550 nm มีค่าเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิประมาณ 13.7 pm/ $^{\circ}\text{C}$ ดังรูปที่ 2.35b แสดงผลการทดลองการเลื่อนกึ่งกลางของความยาวคลื่นสะท้อนกลับจากแบรคเกรตติงตามผลของอุณหภูมิ

ผลกระทบจากความเค้นและอุณหภูมิแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงต่อเกรตติงโดยผลกระทบจากตัวแปรภายนอกอย่างไรก็ดี ในการประยุกต์ใช้แบรคเกรตติงในระบบตรวจวัดที่มุ่งเน้นต่อผลกระทบอย่างใดอย่างหนึ่งจำเป็นต้องให้ความสำคัญต่อผลกระทบทั้งสองนี้ด้วย

ดังนั้นพิจารณาภายใต้ขอบเขตการยืดหยุ่น (Elastic Limit) “ปริมาณความเครียด (Strain) ของวัตถุเป็นปฏิภาคโดยตรงกับปริมาณความเค้น (Stress) ที่กระทำบนวัตถุ” เป็นคำกล่าวของฮุกส์ หรือที่เรียกว่า กฎของฮุกส์



รูปที่ 2.36 แสดงลักษณะวัตถุทรงกระบอกถูกแรง (F) มีขนาดเท่ากันกระทำในทิศตรงข้ามกัน

จากรูปวัตถุทรงกระบอกมีความยาวเริ่มต้น และมีเส้นผ่าศูนย์กลางเริ่มต้นเมื่อมีแรง F_0 มากระทำกับวัตถุตามรูปจะทำให้วัตถุมีความยาวเปลี่ยนไป ΔL และมีเส้นผ่าศูนย์กลางเปลี่ยนไป ΔD ความเค้นตามยาว (Longitudinal Stress) คือ แรงดึงหรือแรงอัดตามยาวต่อหน่วยพื้นที่ เขียนสัญลักษณ์เป็น σ

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.43)$$

ความเครียดตามยาว (Longitudinal Strain) คือ อัตราส่วนของความยาวที่เปลี่ยนไปกับความยาวเดิม เขียนสัญลักษณ์เป็น ϵ_{long}

$$\epsilon_{long} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.44)$$

เมื่อออกแรงดึง (F) ไปตามความยาวของวัตถุ และมีทิศตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง (A) ก็จะทำให้เกิดความเค้นและความเครียดบนวัตถุนั้นอันเนื่องจากวัตถุนั้นเปลี่ยนแปลงความยาว ซึ่งในวัตถุหนึ่ง อัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียดจะมีค่าคงที่เสมอ เรียกว่า ยังโมดูลัส

(Young's Modulus) เขียนสัญลักษณ์เป็น Y จะได้ว่า

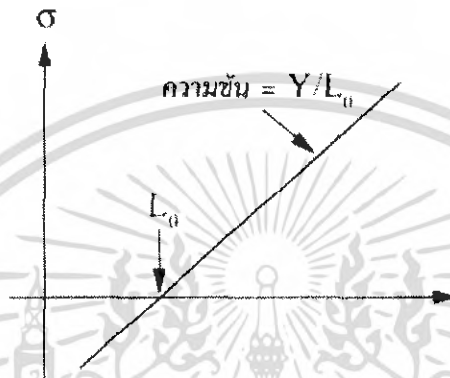
$$Y = \frac{\sigma}{\epsilon_{long}} \quad (2.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma = \frac{Y}{L_0} L - Y \quad (2.46)$$

ดังนั้นเมื่อเขียนกราฟระหว่างความเค้น (σ) กับความยาว (L) ความชันของกราฟคือ $\frac{Y_0}{L}$

ดังแสดงในรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (σ) กับความยาว (L)

ความเครียดตามยาว (Lateral Strain) คืออัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางที่เปลี่ยนไปกับเส้นผ่าศูนย์กลางเดิม เขียนสัญลักษณ์เป็น ϵ_{lat}

$$\epsilon_{lat} = \frac{\Delta D}{D_0} \quad (2.47)$$

อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) คืออัตราส่วนของความเครียดตามขวางกับความเครียดตามยาว เขียนสัญลักษณ์เป็น μ

$$\mu = -\frac{\epsilon_{lat}}{\epsilon_{long}} \quad (2.48)$$

เครื่องหมายลบจะทำให้อัตราส่วนของปัวซองมีค่าเป็นบวกเสมอ เนื่องจาก ϵ_{lat} และ ϵ_{long} จะมีเครื่องหมายตรงข้ามกัน

$$D = -\mu \frac{D_0}{L_0} L + D_0 (1 + \mu) \quad (2.49)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีโฟโตอีลาสติกซิติสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการหักเหของแสงที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาลักษณะของคลื่นแสง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยรูปแบบสมการฮาร์โมนิก (Harmonic waveform) ดังนี้

$$E = a \cos \frac{2\pi}{\lambda} (\phi - \omega t) \quad (2.50)$$

โดย λ คือ แอมพลิจูดของคลื่น

ϕ คือ มุมเฟสของคลื่น E

ω คือ ความถี่เชิงมุม

t คือ เวลา

เมื่อคลื่นแสงเคลื่อนที่ผ่านแผ่นคลื่น (wave plate) ซึ่งทำหน้าที่กรองคลื่นแสงต่างๆ ไปที่มีทิศทางไม่แน่นอนให้ผ่านออกจากแผ่นคลื่นอย่างมีระเบียบ มีรูปแบบและทิศทางที่ชัดเจน สำหรับแผ่นคลื่นที่ใช้ทดลองมีสมบัติหักเหแตกต่างกัน 2 แนวแกน (birefringent) จะทำให้เกิดการหน่วงช้า (retardation) เป็นผลให้คลื่นแสงที่ผ่าน ไปทั้ง 2 แนวแกนที่ตั้งฉากกันเกิดการเลื่อนมุมเฟสแบบเชิงเส้นสัมพันธ์ δ ดังนี้

$$\delta = \delta_2 - \delta_1 = h(n_2 - n_1) \quad (2.51)$$

โดย δ_1, δ_2 คือ มุมเฟสของคลื่นแสงที่ผ่านแกน 1 และ 2

n_1, n_2 คือ ดัชนีหักเหเมื่อคลื่นแสงผ่านแกน 1 และ 2

h คือ ความหนาของแผ่นคลื่น

และมีการเลื่อนมุมเฟสแบบเชิงมุมสัมพันธ์ ดังนี้

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi h}{\lambda} (n_2 - n_1) \quad (2.52)$$

ถ้าแผ่นคลื่นถูกออกแบบให้ $\Delta = \frac{\pi}{2}$ จะเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า แผ่นคลื่นหนึ่งในสี่ส่วน

(quarter-wave plate)

ซึ่งเป็นแบบที่ใช้ แต่ถ้า $\Delta = \pi$ และ 2π จะเรียกว่า แผ่นคลื่นแบบครึ่งและเต็มคลื่น

(half-and full-wave plates) ตามลำดับ

เมื่อวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นเกิดความเค้นขึ้นจะมีผลทำให้ค่าดัชนีการหักเหที่แต่เดิมมีค่าคงที่ และเท่ากันตลอดทั้งชิ้นงาน เปลี่ยนแปลงค่าไปตามขนาดของความเค้นที่เกิดขึ้นตามความสัมพันธ์ ดังนี้

$$n_2 - n_1 = c(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.53)$$

สมการที่ (2.53) ถูกเรียกว่า กฎของความเค้นและแสง (stress-optic law) โดย c คือสัมประสิทธิ์ความเค้นและแสงแบบสัมพัทธ์ (relative stress-optic coefficient) ส่วน σ_1 และ σ_2 คือความเค้นหลักที่เกิดขึ้น

เมื่อแทนสมการที่ (2.53) ลงในสมการ (2.52) จะได้ว่า

$$\Delta = \frac{2\pi hc}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.54)$$

หรือเขียนใหม่ในรูปแบบดังนี้

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{Nf_\sigma}{h} \quad (2.55)$$

โดย

$$N = \frac{\Delta}{2\pi} = \frac{\delta}{\lambda} \quad \text{และ} \quad f_\sigma = \frac{\lambda}{c} \quad (2.56)$$

ค่า N คือ จำนวนรอบของการหน่วงช้าและนับด้วยอันดับของแถบแสง (fringe order)

f คือ ค่าคงที่เห็นแถบแสงของวัสดุ (material fringe value)

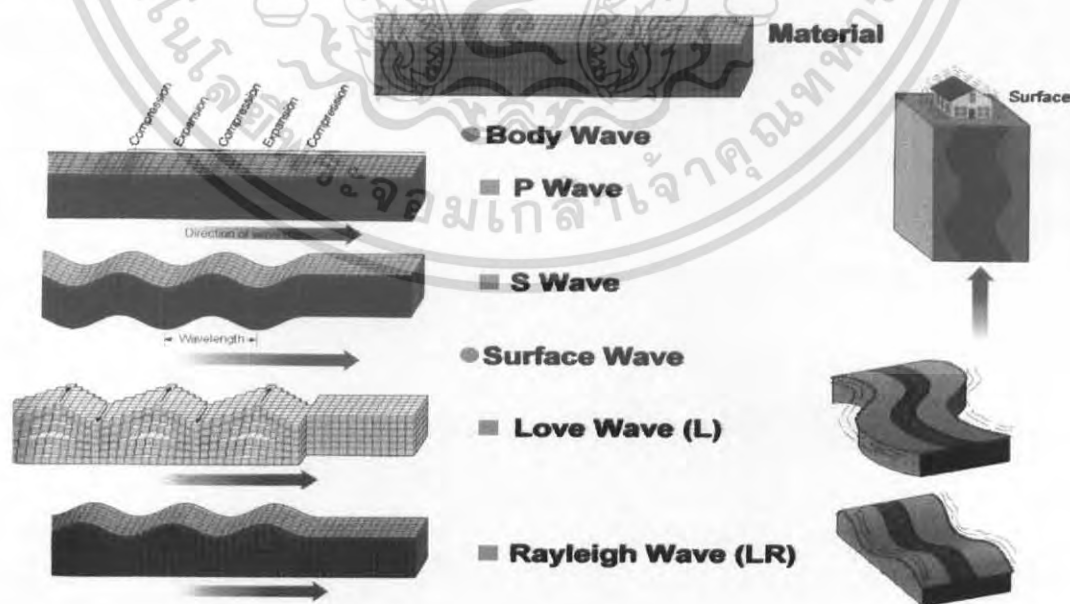
การหมุนแผ่นคลื่นได้อย่างเหมาะสมจะทำให้การมองเห็นแถบแสงมีความชัดเจนมาก และเรียกรูปแบบของแถบแสงแสดงความแตกต่างของความเค้นหลักนี้ว่า แถบไอโซโครมาติก (Isocromatic fringe pattern)

2.2 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเครื่องมือจำลองและตรวจวัดแรงสั่นสะเทือน

ขั้นแรกในการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านธรณีวิทยาเพื่อวัดแผ่นดินไหวนั้น จึงต้องทำการศึกษาค้นคว้าพื้นฐานเกี่ยวกับแผ่นดินไหวและหน่วยวัดแผ่นดินไหวริคเตอร์ (Richter) ดังมีหัวข้อต่อไปนี้

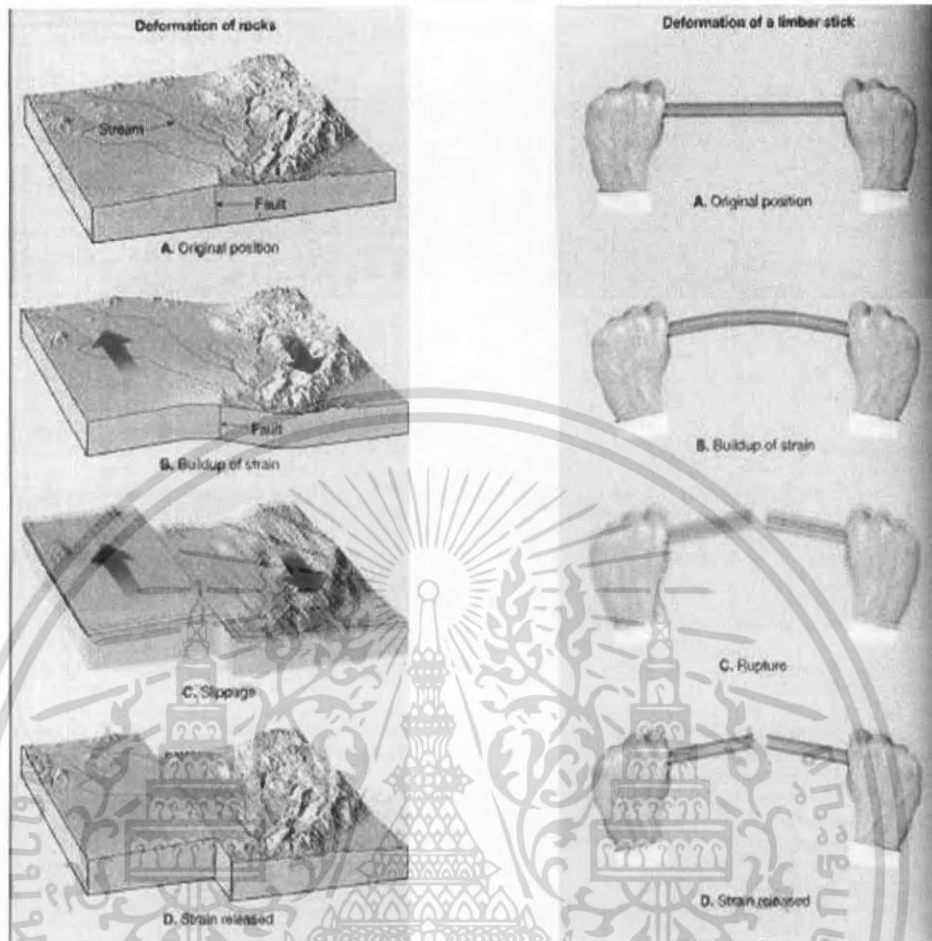
2.2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแผ่นดินไหวและหน่วยมาตราริคเตอร์

แผ่นดินไหว (Earthquakes) เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของชั้นเปลือกโลก ส่วนใหญ่แผ่นดินไหวมักเกิดตรงบริเวณขอบของแผ่นเปลือกโลก ซึ่งการเคลื่อนตัวดังกล่าว เกิดขึ้นเนื่องจากชั้นหินหลอมละลายที่อยู่ภายใต้เปลือกโลก ได้รับพลังงานความร้อนจากแกนโลก และลอยตัวผลักดันเปลือกโลกตอนบนอยู่ตลอดเวลา ทำให้เปลือกโลกแต่ละชั้นมีการเคลื่อนที่ในทิศทางต่าง ๆ กัน พร้อมกับเก็บสะสมพลังงานไว้ภายใน ดังนั้น บริเวณขอบของชั้นเปลือกโลกจึงเป็นส่วนที่ชนกัน เกิดคดงอ หรือแยกจากกัน หากบริเวณของขอบชั้นเปลือกโลกใด ๆ ไม่ผ่านหรืออยู่ใกล้กับประเทศใดประเทศหนึ่ง ประเทศนั้นก็จะมีความเสี่ยงภัยต่อแผ่นดินไหวสูง เช่น ประเทศญี่ปุ่น ประเทศฟิลิปปินส์ ประเทศอินโดนีเซีย และประเทศนิวซีแลนด์ เป็นต้น นอกจากนี้ อาจเกิดจากพลังงานที่สะสมในเปลือกโลก ถูกส่งผ่านไปยังเปลือกโลกพื้นของทวีปตรงบริเวณรอยร้าวของหินใต้พื้นโลกที่เรียกกันว่า "รอยเลื่อน" ทำให้รอยที่ประกบกันอยู่ได้รับแรงอัดมาก ๆ รอยเลื่อนจึงมีการเคลื่อนตัวอย่างฉับพลัน จนเกิดเป็นแผ่นดินไหวได้เช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.38 แสดงลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

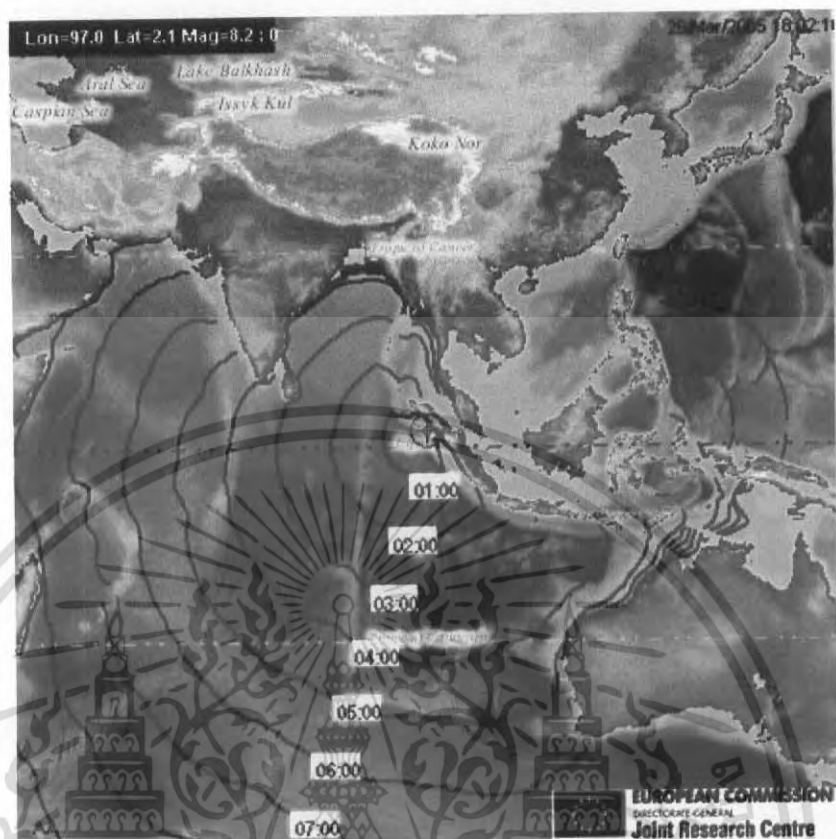


รูปที่ 2.39 แสดงลักษณะของการเกิดรอยเลื่อนแผ่นดินไหวและลักษณะของแรงที่เกิดขึ้น

แรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว จะส่งผลกระทบไปได้ไกล ไม่เฉพาะบริเวณประเทศที่เกิดเท่านั้น บางครั้งหากมีความรุนแรงมาก คลื่นแผ่นดินไหวจะสามารถส่งผ่านไปได้บนผิวโลกหลายพันกิโลเมตรกินอาณาเขตไปหลายประเทศ ทุกวันนี้เราจึงมีวิธีการตรวจวัดความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นได้ด้วยกัน 2 วิธี คือ

- วัดขนาด (Magnitude) ของพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมา ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการติดตามลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหว โดยเครื่องวัดแผ่นดินไหว (Seismograph) มาตรฐานแบบนี้เรียกว่า “ริคเตอร์” (Richter Scale) ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 1.0 (รุนแรงน้อย) ถึง 9.0 (รุนแรงมาก)
- วัดความรุนแรง (Intensity) ในการสั่น ณ ที่ใดที่หนึ่ง ซึ่งจะออกมาในลักษณะความรุนแรงของการสั่นที่มนุษย์รู้สึก ได้ว่ามากน้อยแค่ไหน หรือความเสียหายของสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ มีมากเพียงใด มาตรฐานแบบนี้เรียกว่า “เมอร์แคลลี” (Mercalli Scale) ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 1 (อ่อนมาก) ถึง 12 (ทำลายหมดทุกอย่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

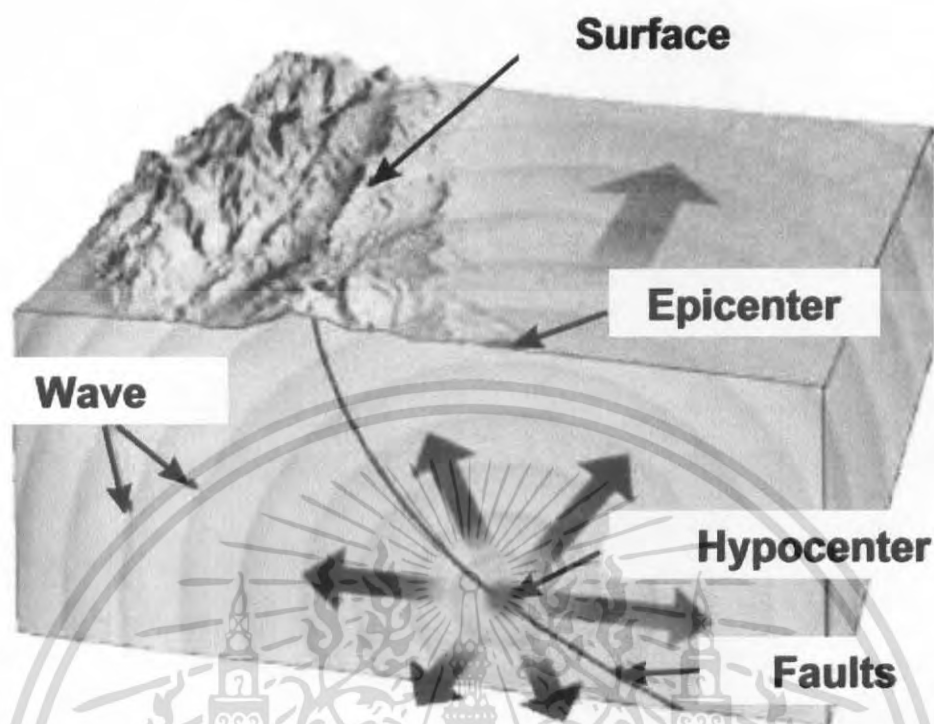


รูปที่ 2.40 แสดงบริเวณเกิดแผ่นดินไหวเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม 2547

โดยก่อนหน้านั้นเคยมีเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ร้ายแรงที่สุดในรอบสองทศวรรษ เกิดขึ้นที่เมืองแทงชาน ประเทศจีน ในตอนดึกของวันที่ 28 กรกฎาคม พ.ศ. 2519 เหตุการณ์ครั้งนั้นทำให้มีผู้เสียชีวิตกว่า 250,000 คน และบาดเจ็บร่วม 800,000 คน ความหายนะนี้ทำให้จีนต้องใช้เวลาานกว่า 10 ปี จึงจะสามารถชุบชีวิตเมืองแทงชานให้กลับมามีชีวิตชีวาได้อีกครั้งหนึ่ง

ความร้ายแรงอันเนื่องมาจากแผ่นดินไหวสามารถบอกได้ในรูปของความรุนแรง (Intensity) และขนาด (Magnitude) ของแผ่นดินไหว อย่างไรก็ตามสองค่านี้ค่อนข้างแตกต่างกัน และมักจะใช้กันค่อนข้างสับสนความรุนแรงของแผ่นดินไหว (Intensity) ขึ้นอยู่กับผลกระทบของแผ่นดินไหวที่มีต่อความรู้สึกของคน ต่อความเสียหายของอาคารและสิ่งก่อสร้าง และต่อสิ่งของธรรมชาติต่างๆ ความรุนแรงจะมากน้อยแตกต่างกันไปในแต่ละแห่งที่ถูกรบกวนทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของผู้สังเกตว่าอยู่ห่างไกลจากตำแหน่งศูนย์กลางแผ่นดินไหว (Epicenter) มากน้อยเพียงใดขนาดของแผ่นดินไหว (Magnitude) เกี่ยวข้องกับปริมาณของพลังงานซึ่งถูกปล่อยออกมา ณ ตำแหน่งจุดกำเนิดแผ่นดินไหว (Hypocenter) ค่าขนาดแผ่นดินไหวนี้ขึ้นอยู่กับความสูงของคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.41 แสดงการขยับตัวของแผ่นดินไหวจากจุดกึ่งกลางการเกิด

(Amplitude) ที่บันทึกได้ด้วยเครื่องวัดแผ่นดินไหว (Seismograph) ดังนั้นขนาดแผ่นดินไหวแต่ละครั้งจึงมีได้เฉพาะค่าเดียวซึ่งได้จากการตรวจจับด้วยเครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหวเท่านั้น

แต่ความร้ายแรงของแผ่นดินไหวอาจจะไม่จบลงเพียงการสั่นสะเทือนแค่ครั้งเดียวเท่านั้น อนุภาพของมันยังสามารถก่อให้เกิดสิ่งที่น่าสะพรึงกลัวตามมาได้อีก เพราะหลายต่อหลายครั้งการเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่มักจะเกิดแผ่นดินไหวขนาดเล็กตามมาซ้ำอีกหลายระลอกเรียกกันว่าแผ่นดินไหวระลอกหลัง (After Chock) ซึ่งน่าจะเกิดจากการปลดปล่อยพลังงานที่ยังคงค้างอยู่ในมวลหิน และยังเกิดในบริเวณรอยเลื่อนเดียวกันกับที่เกิดแผ่นดินไหวครั้งแรกอีกด้วย

ส่วนอีกกรณีที่มีอันตรายร้ายแรงไม่ยิ่งหย่อนไปกว่ากัน เป็นผลสืบเนื่องมาจากแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นได้สมุทร ซึ่งอาจทำให้เกิด คลื่นซึนามิ คลื่นยักษ์ที่สามารถเดินทางข้ามมหาสมุทรด้วยความเร็วสูงถึง 1,000 กม./ชม. และที่น่าหวาดหวั่นก็คือ คลื่นนี้อาจรวมพลังกันจนกลายเป็นกำแพงน้ำหิม่าที่มีความสูงถึง 60 ม. ในขณะที่เข้าฟาดทำลายชายฝั่งอย่างรุนแรง ก่อให้เกิดความเสียหายและคร่าชีวิตผู้คน ไปแบบไม่ทันตั้งตัว

ปัจจุบันภัยจากแผ่นดินไหวยังคงเป็นภัยธรรมชาติที่ไม่มีใครสามารถพยากรณ์ได้อย่างแม่นยำว่าจะอุบัติขึ้นเมื่อใด ที่ไหน มีขนาดและความรุนแรงเท่าใด แต่ถึงกระนั้น ก็ยังมีความพยายามกันอยู่ในการที่จะศึกษาถึงวิเคราะห์ถึงคุณลักษณะต่าง ๆ ของบริเวณแหล่งกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นดินไหว เพื่อให้การพยากรณ์มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินจะ
ได้ลดน้อยลงไปด้วย

2.2.1.1 ขนาดของแผ่นดินไหวตามมาตราริกเตอร์ (Richter)

คลื่นแผ่นดินไหว (Seismic wave) หรือคลื่นที่ทำให้เกิดอาการสั่นสะเทือนจาก
แผ่นดินไหวที่ส่งผ่านมายังผิวโลกและสามารถบันทึกไว้ได้ด้วยเครื่องวัดแผ่นดินไหว
(Seismograph) ในรูปของกราฟแผ่นดินไหว (Seismogram) กราฟแผ่นดินไหวเป็นเส้นขึ้นลง
สลับกันแสดงถึงอาการสั่นสะเทือนของพื้นดินได้ เครื่องวัดแผ่นดินไวนั้น เครื่องมือวัด
แผ่นดินไหวที่มีความไวสูง สามารถรับคลื่นที่เกิดจากแผ่นดินไหวที่รุนแรงได้ทุกแห่งในโลก
เครื่องวัดแผ่นดินไหว สามารถคำนวณหาเวลา ตำแหน่ง และขนาดของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้น ณ
สถานีวัดแผ่นดินไหวแห่งใดแห่งหนึ่งได้

มาตราวัดขนาดแผ่นดินไหวของริคเตอร์ (The Richter Magnitude Scale) ได้รับการ
พัฒนาขึ้นมาเมื่อปี ค.ศ. 1935 (พ.ศ. 2478) โดย Charles F. Richter แห่งสถาบันเทคโนโลยี
แคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา เราจึงนิยมใช้หน่วยของขนาดแผ่นดินไหวว่า “ริคเตอร์” (Richter) เป็น
ตัวเลขที่ทำให้สามารถเปรียบเทียบขนาดของแผ่นดินไหวต่าง ๆ กันได้ เป็นมาตราที่วัดขนาดของ
แผ่นดินไหว ซึ่งบันทึกได้จากเครื่องวัดแผ่นดินไหว (Seismograph) มิได้เป็นหน่วยวัดเพื่อแสดงผล
ของความเสียหายที่เกิดขึ้น วัดได้จากความสูงของคลื่น (amplitude) แผ่นดินไหวที่ปรากฏใน
เครื่องวัดแผ่นดินไหว และคำนวณได้จากสูตรทางคณิตศาสตร์เป็น logarithm ของความสูงของคลื่น
แผ่นดินไหวที่บันทึกได้ ขนาด (Magnitude) ของแผ่นดินไหวเป็นตัวเลขทางคณิตศาสตร์ที่บ่งชี้
ความร้ายแรงของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นที่ระดับเป็นศูนย์
โดยกำหนดให้แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นที่ระดับเป็นศูนย์มีค่าความสูงของคลื่น 0.001 มม. ที่ระยะทาง 100
กิโลเมตร จากศูนย์กลางแผ่นดินไหว (Epicenter)
สูตรที่ใช้คำนวณคือ

$$M = \log A - \log A_0 \quad (2.57)$$

เมื่อ M เป็นขนาดแผ่นดินไหว

A เป็นความสูงของคลื่นสูงสุด

A₀ เป็นความสูงของคลื่นที่ระดับศูนย์

เช่น หากคลื่นแผ่นดินไหวสูงสุดมีค่าเป็น 10 มิลลิเมตร ที่วัดได้จากสถานีวัดแผ่นดินไหว
ที่อยู่ห่างจากศูนย์กลางแผ่นดินไหว 100 กิโลเมตร จะหาขนาดแผ่นดินไหวได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 M &= \log 10 - \log 0.001 & (2.58) \\
 &= 1 - (-3) \\
 &= 4 \text{ หน่วยตามมาตราริกเตอร์}
 \end{aligned}$$

ในการทำงานเดียวกันขนาดของแผ่นดินไหวมีความสูงของคลื่นที่สูงที่สุด 100 มิลลิเมตร ที่ระยะทาง 100 กิโลเมตรจากศูนย์กลางแผ่นดินไหว จะมีขนาด 5 หน่วย ตามมาตราริกเตอร์ ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 M &= \log 100 - \log 0.001 & (2.59) \\
 &= 2 - (-3) \\
 &= 5
 \end{aligned}$$

ค่า M วัดจากเครื่องมือซึ่งระยะทางมักจะไม่ใช่ 100 กิโลเมตรจากศูนย์กลางแผ่นดินไหว ดังนั้นค่าความสูงคลื่นแผ่นดินไหวจะมีค่าอย่างหนึ่ง แต่นักธรณีวิทยาจะแปรเปลี่ยนค่ามาเป็นระยะที่ 100 กิโลเมตร แล้วจะได้ค่าความสูงคลื่นแผ่นดินไหวอีกค่าหนึ่ง ทำให้หาค่า M ได้จะเห็นได้ว่า ค่าขนาดของแผ่นดินไหวจากขนาด 4 ริคเตอร์ ไปเป็น 5 ริคเตอร์ ขนาดต่างกันเพียง 1 ระดับ แต่ขนาดความสูงคลื่นจะต่างกัน 10 เท่า ดังนั้นหากขนาดต่างกัน 3 ระดับ ความสูงคลื่นจะต่างกันถึง 1000 เท่า ถ้าคิด เป็นพลังงาน (มีหน่วยเป็นเอิร์ก (Erg)) จะเห็นว่าพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาในแต่ละระดับ ริคเตอร์ จะเป็น 30 เท่า ซึ่งกันและกัน ดังนั้นถ้าต่างกัน 2 ระดับ พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจะต่างกันถึง 900 เท่า และถ้าต่างกัน 3 ระดับ พลังงานจะมากกว่ากันถึง 2,700 เท่าขนาดของแผ่นดินไหวตาม มาตราริกเตอร์นี้จะบอกได้เป็นตัวเลข จำนวนเต็มและจุดทศนิยม ขนาดของแผ่นดินไหว ประมาณ 2.0 หรือ น้อยกว่า มักจะเรียกว่า แผ่นดินไหวขนาดเล็กมาก (Micro earthquake) โดยมากจะไม่มีใครรู้สึกได้ แต่จะวัดได้โดยเครื่องวัดแผ่นดินไหวประจำท้องถิ่นขนาดของแผ่นดินไหว ประมาณ 4.5 หรือใหญ่กว่าเล็กน้อยถึง 5.3 จะเรียกว่าแผ่นดินไหวขนาดปานกลาง (Moderate earthquake) ขนาดแผ่นดินไหวประมาณ 6.3 ขึ้นไป มักจะเรียกว่า แผ่นดินไหวรุนแรง (Strong earthquake) อย่างไรก็ตามแม้ว่าขนาดแผ่นดินไหวตามมาตราริกเตอร์จะไม่มีค่าสูงสุดหรือต่ำสุดแต่แผ่นดินไหวเท่าที่เขยทรายว่ามีขนาดใหญ่ที่สุด คือขนาดระหว่าง 8.8 ถึง 8.9

2.2.1.2 ความรุนแรงของแผ่นดินไหวตามมาตรามอคัลลีที่ปรับปรุงแล้ว (Modified Mercalli)

ผลกระทบหรือความเสียหายจากแผ่นดินไหวที่เกิดบนผิวโลก เราเรียกว่าความรุนแรงของแผ่นดินไหว (Intensity) มาตรารวัดความรุนแรงของแผ่นดินไหวนั้นกำหนดได้จากความรู้สึก

ของอาการตอบสนองของผู้คน การเคลื่อนที่ของเครื่องเรือน เครื่องใช้ในบ้าน ความเสียหายของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปล่องไฟเป็นต้น จนถึงขั้นที่ทุกสิ่งทุกอย่างพังพินาศ มาตรฐานวัดความรุนแรงของแผ่นดินไหว มีการพัฒนาขึ้นมาใช้กันหลายมาตรา และเป็นเวลาหลายร้อยปีแล้ว แต่ที่นิยมใช้กันที่สุดในสหรัฐอเมริกา ในปัจจุบันนี้ได้แก่ มาตรฐานเมอร์คัลลีที่ปรับปรุงแล้ว (Modified Mercalli (MM) Intensity Scale) ผู้พัฒนามาตราวัดความรุนแรงของแผ่นดินไหวดังกล่าวได้แก่ Harry Wood และ Frank Neumann ซึ่งเป็นนักวิชาการแผ่นดินไหวชาวอเมริกันทั้งคู่ และเขาได้ปรับปรุงขึ้นใช้ในปี ค.ศ. 1931 (พ.ศ. 2474) ความรุนแรงของแผ่นดินไหวตามมาตราวัดความรุนแรงของแผ่นดินไหวของเมอร์คัลลีที่ปรับปรุงแล้วมี 12 ระดับ จากระดับความรุนแรงที่น้อยมากจนไม่สามารถรู้สึกได้ซึ่งต้องตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือวัดแผ่นดินไหวเท่านั้น จนถึงขั้นรุนแรงที่สุดจนทุกสิ่งทุกอย่างพังพินาศ และใช้หน่วยระดับเป็นตัวเลขโรมัน ดังนี้

มาตราวัดความรุนแรงแผ่นดินไหวของเมอร์คัลลีที่ปรับปรุงแล้ว (The Modified Mercalli Scale)

- I เป็นอันดับที่อ่อนมาก ตรวจวัดได้โดยเครื่องมือตรวจแผ่นดินไหวเท่านั้น คนไม่สามารถรู้สึกได้
- II รู้สึกได้เฉพาะบางคนที่อยู่นิ่ง ๆ โดยเฉพาะผู้ที่อยู่ในอาคารชั้นบน สิ่งของที่บอบบางประณีต กระชามกระชิมที่แขวนไว้อาจแกว่งไกวได้
- III ผู้ที่อยู่ในอาคารจะรู้สึกค่อนข้างชัดว่ามีแผ่นดินไหว โดยเฉพาะผู้ที่อยู่ชั้นบน ๆ แต่คนส่วนใหญ่จะยังไม่ทราบว่าแผ่นดินไหวเกิดขึ้น รถยนต์ที่จอดอยู่อาจขยับเขยื้อนได้บ้างเล็กน้อย การสั่นสะเทือนคล้าย ๆ กับเมื่อมีรถยนต์บรรทุกแล่นผ่านสามารถกำหนดระยะเวลาของการสั่นไหวได้
- IV ถ้าเกินในเวลากลางวันผู้ที่อยู่ในบ้านจะรู้สึกได้ แต่ผู้ที่อยู่นอกบ้านมีผู้รู้สึกว่าเกิดแผ่นดินไหวน้อยคน ถ้าเป็นคอนกรีตผู้ที่นั่งนอนหลับอยู่จะตกใจตื่น ด้วยขามจะขยับ หน้าต่างประตู จะสั่น ฝาผนังจะมีเสียงถัน มีความรู้สึกคล้าย ๆ กับรถยนต์บรรทุกของหนักชนอาคาร รถยนต์ที่จอดอยู่สั่นไหวสังเกตได้ชัดเจน
- V เกือบทุกคนรู้สึกว่าแผ่นดินไหวเกิดขึ้น หลาย ๆ คนตื่นตระหนก ด้วยขามตกแตก หน้าต่างพัง สิ่งของที่ตั้งไม่มั่นคง ล้มคว่ำ นาฬิกาที่ใช้ลูกตุ้มอาจหยุดเดิน
- VI รู้สึกว่าเกิดแผ่นดินไหวกันได้ทุกคน หลาย ๆ คนตกใจวิ่งออกจากบ้าน เครื่องประดับบ้านหนัก ๆ บางชิ้นเคลื่อนได้ กรณีน้อยมากที่ปูนฉาบผนังจะล่วงหล่นลงมาความเสียหายยังจัดว่าเล็กน้อย
- VII ในอาคารที่ออกแบบและก่อสร้างไว้ดีจะเสียหายเล็กน้อยมาก ส่วนอาคารก่อสร้างไว้ดีตามปกติจะเสียหายเล็กน้อยถึงปานกลาง อาคารที่ก่อสร้างและออกแบบไว้ไม่ดีจะเสียหายค่อนข้างมาก ปล่องไฟบางปล่องแตกหัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VIII สิ่งก่อสร้างที่ออกแบบไว้ดีเป็นพิเศษจะเสียหายเล็กน้อย อาคารที่สร้างอย่างมั่นคงตามปกติ จะเสียหายค่อนข้างมาก และบางส่วนอาจพังทลายลงมาด้วย สำหรับสิ่งก่อสร้างที่สร้างอย่างไม่ สมบูรณ์ จะเสียหายใหญ่หลวง ปล่องไฟ บ้าน โรงงาน เสาหิน อนุสาวรีย์ และกำแพงจะหักล้มพังลง มา

IX สิ่งก่อสร้างที่ออกแบบดีเป็นพิเศษ เสียหายมาก โครงของสิ่งก่อสร้างที่ออกแบบไว้ดี เสียศูนย์หมด อาคารที่มั่นคงเสียหายมากซึ่งบางส่วนพังทลายลงมาด้วย ตัวอาคารต่าง ๆ ขยับเคลื่อน ออกจากฐานรากเดิม

X อาคารไม้ที่ก่อสร้างไว้ดีอย่างดีบางหลังถูกทำลาย สิ่งก่อสร้างที่ก่อด้วยปูน และมีโครง พังทลายพร้อมกับฐานรากด้วย รางรถไฟบิดงอไป

XI สิ่งก่อสร้างที่ก่อด้วยปูนถ้ามีจะยังคงเหลือตั้งอยู่ได้น้อยมาก สะพานถูกทำลาย ทางรถไฟบิด งอมาก

XII เสียหายหมดทุกสิ่งทุกอย่าง แนวและระดับต่าง ๆ บิดเบี้ยวหมด วัตถุทุกอย่างกระดอน กระเด็นปริว่อนขึ้นไปในอากาศ

2.2.1.3 ความแตกต่างระหว่างขนาดแผ่นดินไหวและความรุนแรงแผ่นดินไหว

ขนาดแผ่นดินไหว ไม่มีค่าสูงสุดหรือต่ำสุด อาจเทียบได้กับอุณหภูมิ ขนาดแผ่นดินไหว แต่ละครั้งมีขนาดเดียว ซึ่งหาได้โดยการคำนวณจากสูตรทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ความสูงของคลื่น แผ่นดินไหวที่ตรวจได้จากเครื่องมือตรวจแผ่นดินไหว มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 9 ตามมาตราริกเตอร์ความ รุนแรงแผ่นดินไหว คือผลกระทบหรือความเสียหายที่เกิดจากแผ่นดินไหว กำหนดได้ โดย ความรู้สึกของอาการตอบสนองของผู้คน ของความเสียหายของอาคารสิ่งก่อสร้าง ฯลฯ ถ้ากล่าวว่ แผ่นดินไหวเกิดขึ้น ณ ที่ใดที่หนึ่งซึ่งวัดความรุนแรงได้ V ตามมาตราเมอร์คัลลี หมายความว่าผู้คน ในที่นั้นรู้สึกว่ามีแผ่นดินไหว หลาย ๆ คนตื่นตระหนก ถ้วยชามตกแตก หน้าต่างพัง เป็นต้น และค่า ความรุนแรงในแต่ละแห่งจะมากหรือน้อยต่างกันตามระยะทางใกล้หรือไกลจากศูนย์กลาง แผ่นดินไหว

2.2.2 การสร้างเครื่องมือจำลองและตรวจวัดแรงสั่นสะเทือน

เมื่อพิจารณาลักษณะของแผ่นดินไหวเป็นลักษณะคลื่นที่มีทั้งความถี่และแอมพลิจูด ซึ่งเกิดการสั่นแกว่งที่เกิดจากการใช้แรงสั่นสะเทือนภายนอกไปกระทำต่ออนุภาคแล้วเป็นผลให้เกิดแรงยึดหยุ่นขึ้นซึ่งคล้ายกับลักษณะการสั่นในสปริงซึ่งถูกแรงภายนอกมากระทำ

สำหรับการสั่นของระบบ Single Degree of Freedom Force Vibration จะมีรูปแบบสมการการเคลื่อนไหวเป็น

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \cos \omega t \quad (2.60)$$

เมื่อ m คือมวลของระบบที่มี Stiffness k และ Damping c ตกอยู่ภายใต้แรงกระทำแบบฮาร์มอนิก F_0 ซึ่งความถี่ ω และ x เป็นการขจัดที่เกิดขึ้นกับมวลนี้ซึ่งสมการนี้จะมีคำตอบของ x เป็น

$$x = Ae^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \theta) + A_0 \cos(\omega t - \phi) \quad (2.61)$$

โดย

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

คือ ความถี่เชิงมุมอิสระ

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$$

คือ Damping Ratio

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

คือ ความถี่เชิงมุมที่หน่วงไว้

ซึ่งส่วนแรกของสมการจะเป็นการสั่นชั่วคราวและจะหายไปเมื่อเวลาผ่านไปเนื่องจากพลังงานของอนุภาคที่ลดลง สำหรับส่วนหลังจะเป็นลักษณะการสั่นอย่างคงตัวซึ่งขนาดของการสั่น A_0 เป็นสิ่งหนึ่งที่เราน่าสนใจเพราะจะเป็นเครื่องบ่งชี้ว่าระบบมีการสั่นมากน้อยเพียงใด ซึ่งสามารถพิจารณาได้ว่า

$$A_0 = \frac{f_0}{\omega_n^2 \sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.62)$$

และมุมเฟสจะเท่ากับ

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2\zeta r}{1-r^2} \quad (2.63)$$

ซึ่งการวิเคราะห์ผลการตอบสนองของแรงกระทำที่มีต่อระบบนิยามเขียนในรูปของขนาดที่ไม่มีมิติคือเขียนขนาดนอร์มัลไลซ์ และมุมเฟส เทียบต่ออัตราส่วนความถี่เมื่อใช้ Damping Ratio หลายๆค่า เพื่อให้หาผลการตอบสนองต่อแรงกระทำและมวลที่เหมาะสมในระบบ

บทที่ 3

วิธีขั้นตอนดำเนินงานและวิจัย

จากการศึกษาในบทที่ 2 ที่กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับระบบตรวจวัดด้วยใยแก้วนำแสง ดังได้กล่าวไว้ข้างต้น เป็นส่วนช่วยในการตัดสินใจถึงวิธีขั้นตอนดำเนินงานและวิจัย รวมถึงอุปกรณ์ที่จะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

ในส่วนของวิธีขั้นตอนดำเนินงานและวิจัย ในการศึกษาได้แบ่งเป็น 3 ส่วน ในส่วนที่หนึ่งกล่าวถึงจุดประสงค์ในการดำเนินงานและวิจัย ในส่วนที่สองกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานและวิจัย และส่วนที่สามกล่าวถึงขั้นตอนดำเนินงานและวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 จุดประสงค์ในการดำเนินงานและวิจัย

1. เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจระบบตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนด้วยไฟเบอร์ออปติกเซนเซอร์
2. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำหลักการของระบบตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนด้วยไฟเบอร์ออปติกเซนเซอร์ข้างต้น ไปประยุกต์ใช้ในงานด้านธรณีวิทยา
3. เพื่อจำลองและศึกษาลักษณะของความยาวคลื่นสะท้อนกลับในสภาวะต่างๆ
4. เพื่อพัฒนาตัวแบบอุปกรณ์ระบบตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนด้วยไฟเบอร์ออปติกเซนเซอร์ เพื่อตรวจวัดแผ่นดินไหว

3.2 อุปกรณ์

1. LED High Luminesense GAAS INFRARED EMITTING DIODE	1	หน่วย
2. Spectrum Analyzer	1	หน่วย
3. Fiber Optics Single Mode	1	ชุด
4. Coupler 2x2	1	หน่วย
5. Fiber Bragg Grating Sensor infrared	1	หน่วย
6. Monochromater	1	หน่วย
7. ชุดการทดลองการจำลองการสั่น	1	ชุด
8. ลำโพงพร้อม Function Generator	1	ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

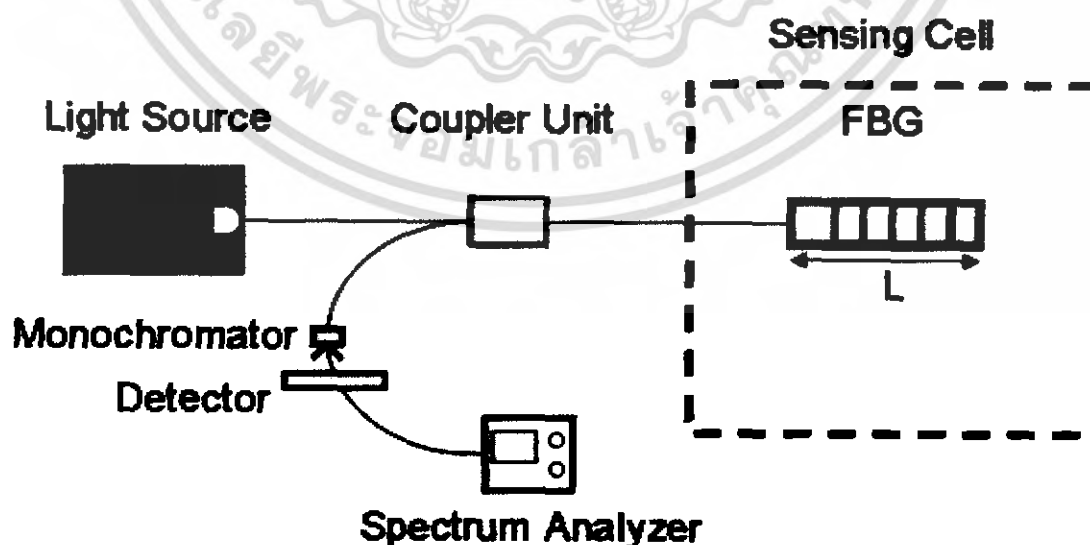
3.3 ขั้นตอนค่าพารามิเตอร์งานและวิธี

เพื่อจำลองและศึกษาลักษณะของความยาวคลื่นสะท้อนกลับในสภาวะต่างๆ จึงใช้ MATLAB ในการจำลองรูปแบบและจะกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองทั้งหมดไว้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ในการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB

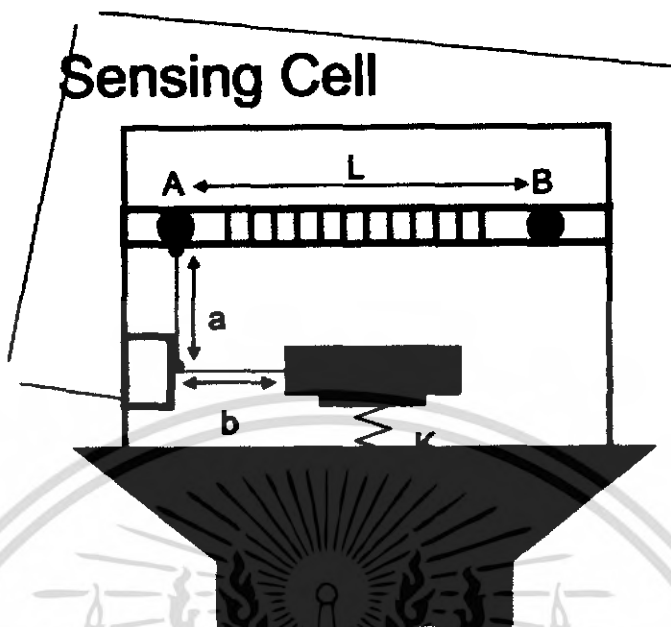
ประเภทข้อมูล	พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
ดัชนีหักเหของแกน(Core)	n1	1.461
ดัชนีหักเหของเคลด(Cladding)	n2	1.457
รัศมีของแกน	a	4 μm
ความยาวของเกรตติง	L	1 cm
ระยะคาบเกรตติง	P	334.17 nm
ความยาวคลื่นสะท้อนเกรตติง	lamdaB	977.30 nm
ค่า Young's Modulus ของ Si	E	$2.967 \times 10^9 \text{ N/m}^2$

โดยการจำลองเพื่อศึกษาลักษณะของความยาวคลื่นสะท้อนกลับในสภาวะต่างๆ โดยการจำลองนี้ให้สมมติสภาวะเพื่อการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นสะท้อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ รัศมี ครรชนหักเห คาบของเกรตติง การดึงจากผลกระทบของความเครียดต่อคาบเกรตติงและ ผลกระทบของความเครียดและความถี่และแสงต่อคาบเกรตติง

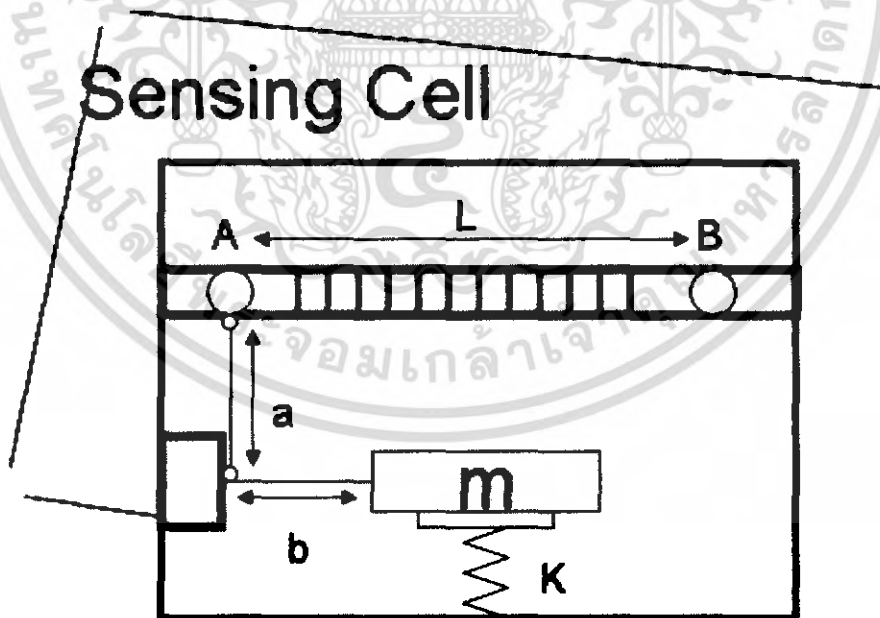


รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังการจัดอุปกรณ์เพื่อเป็นรูปแบบในการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงแผนผังอุปกรณ์ในการจำลองการตรวจวัดทั่วทั้งระบบ



รูปที่ 3.3 แสดงแผนผังอุปกรณ์ในการจำลองการตรวจวัดเฉพาะอุปกรณ์กำหนดแรงสั่นสะเทือน
เหมือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีขึ้นคอนคำนิมงาน

1. ในการจำลองเพื่อศึกษาลักษณะของความยาวคลื่นสะท้อนกลับในสภาวะต่างๆ โดยการจำลองนี้ ได้สมมติสภาวะเพื่อการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นสะท้อนเนื่องจากผลการเปลี่ยน แปลงค่าของสิ่งเหล่านี้

1-1 รัศมีของแกน

1-2 ครรชนีหักเหของแกน

1-3 ระยะคาบของเกรตติง

1-4 เพิ่มผลกระทบของความเครียดต่อระยะคาบเกรตติง

1-5 เพิ่มผลกระทบของความเครียดและความถี่และแสงต่อระยะคาบเกรตติง

2. หลังจากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อหา คุณสมบัติที่ฮิสทรีแกรมเพื่อการอ้างอิงในการทดลองในอนาคตต่อไป



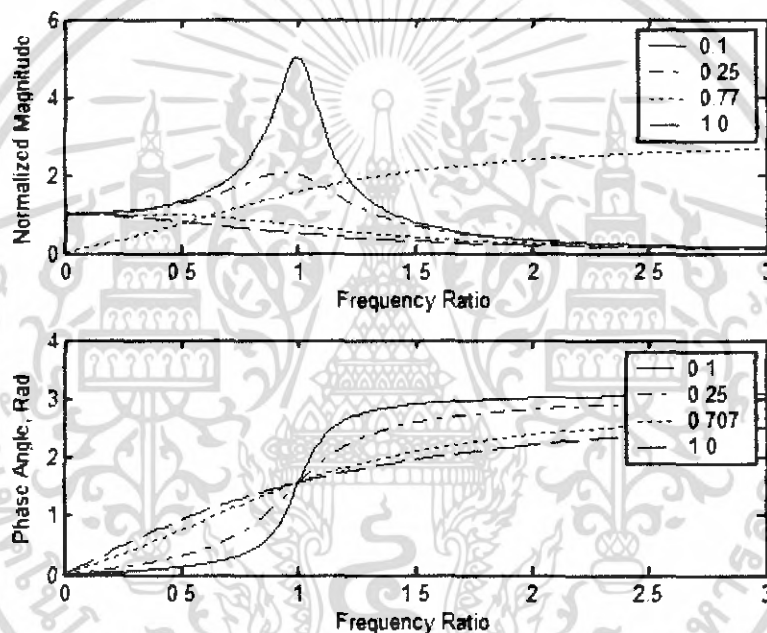
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการจำลองและวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมประยุกต์

4.1 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB

เมื่อพิจารณาแบบตรวจวัดจำลองดังรูปที่ 3.2 และพิจารณาแรงสั่นสะเทือนที่กระทำต่ออุปกรณ์กำเนิดแรงสั่นสะเทือนเสมือน ดังสมการที่ (2.60) และ (2.62) โดยลักษณะของ Single Degree of Freedom Force Vibration ที่เกิดขึ้นกับระบบเป็นดังผลการจำลองนี้



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของ Single Degree of Freedom Force Vibration ที่เกิดขึ้นกับระบบ

ในการจำลองเพื่อศึกษาลักษณะของความยาวคลื่นสะท้อนกลับในสถานะต่างๆ โดยการจำลองนี้ได้สมมติสถานะเพื่อการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นสะท้อนเนื่องจากผลการเปลี่ยนแปลงของสิ่งเหล่านี้

4.1-1 รัศมีของแกน

4.1-2 ครรชนีหักเหของแกน

4.1-3 ระยะคาบของเกรตติง

4.1-4 เพิ่มผลกระทบของความเครียดต่อระยะคาบเกรตติง

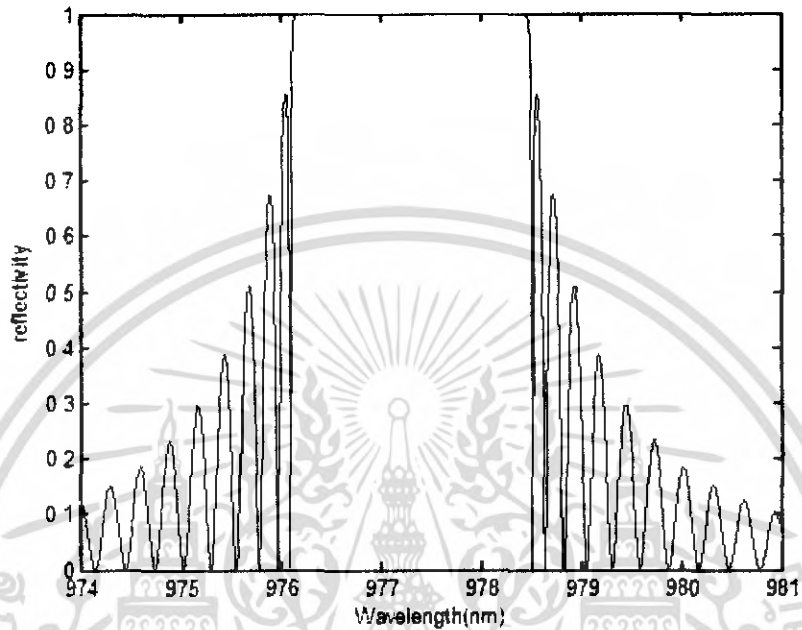
4.1-5 เพิ่มผลกระทบของความเครียดและความเค้นและแสงต่อระยะคาบเกรตติง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1-1 สมบัติฐานเรื่อรัศมีของแกน

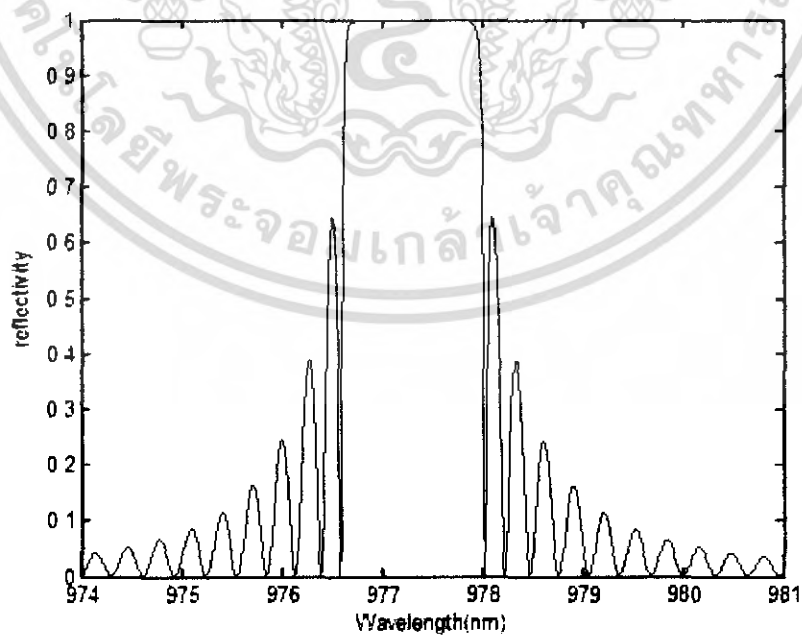
เมื่อนำสมการที่(2.33) พิจารณาโดยความยาวคลื่นสะท้อนกลับ 977.30 nm

โดยที่ $n_1=1.461, n_2=1.457$ และ $a=4 \mu\text{m}$



รูปที่ 4.2 แสดงความยาวคลื่นสะท้อนกลับเมื่อพิจารณาสมบัตินุกรนครั้งที่ 1

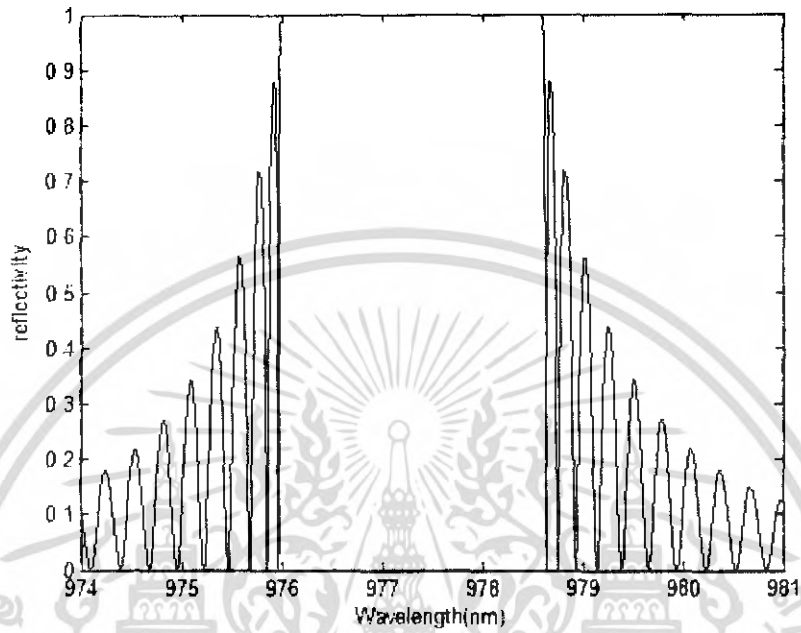
โดยที่ $n_1=1.461, n_2=1.457$ และ $a=2 \mu\text{m}$



รูปที่ 4.3 แสดงความยาวคลื่นสะท้อนกลับเมื่อพิจารณาสมบัตินุกรนครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $n_1=1.461, n_2=1.457, a=8 \mu\text{m}$



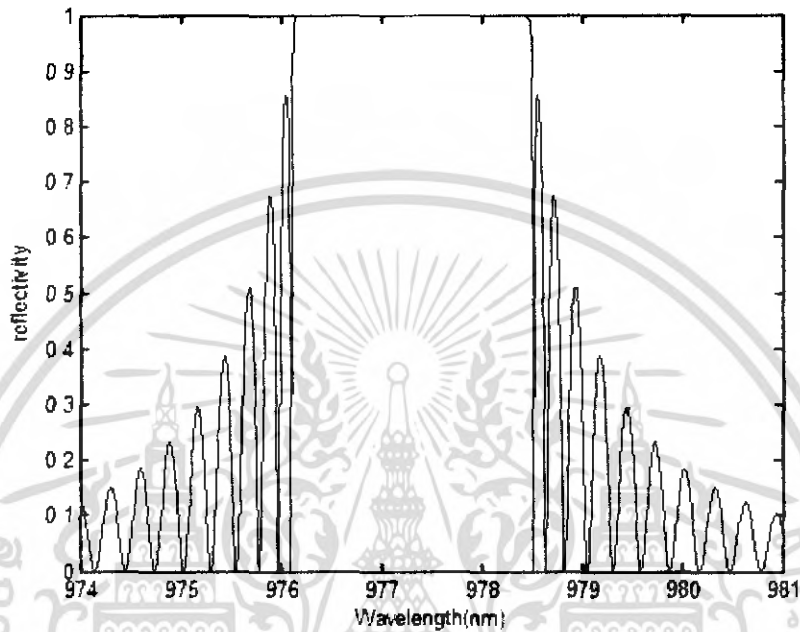
รูปที่ 4.4 แสดงความยาวคลื่นสะท้อนกดับคอร์ดรีสม์เมื่อพิจารณาสมมติฐานครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1-2 สมบัติงานเร่องครรชนั้หักททของมณ

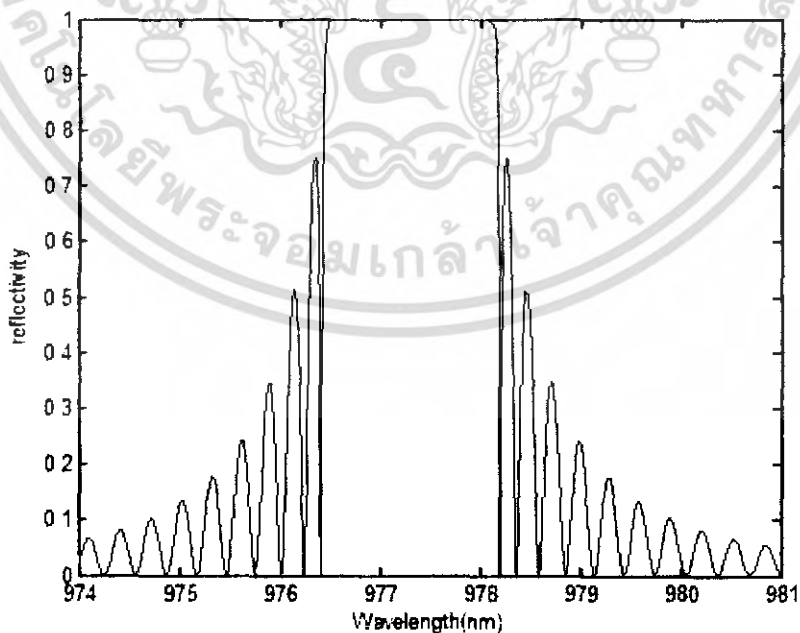
เมื่อนำสมการที่(2.33) พิจรณโดยควมขวคล้นสะท้อนกลับ 977.30 nm

โดยที่ $n_1=1.461, n_2=1.457$ และ $a=4 \mu\text{m}$



รูปที่ 4.5 แสดงความขวคล้นสะท้อนกลับต่อค่านั้หักททเมื่อพิจรณสมบุดิฐนครั้งที่ 1

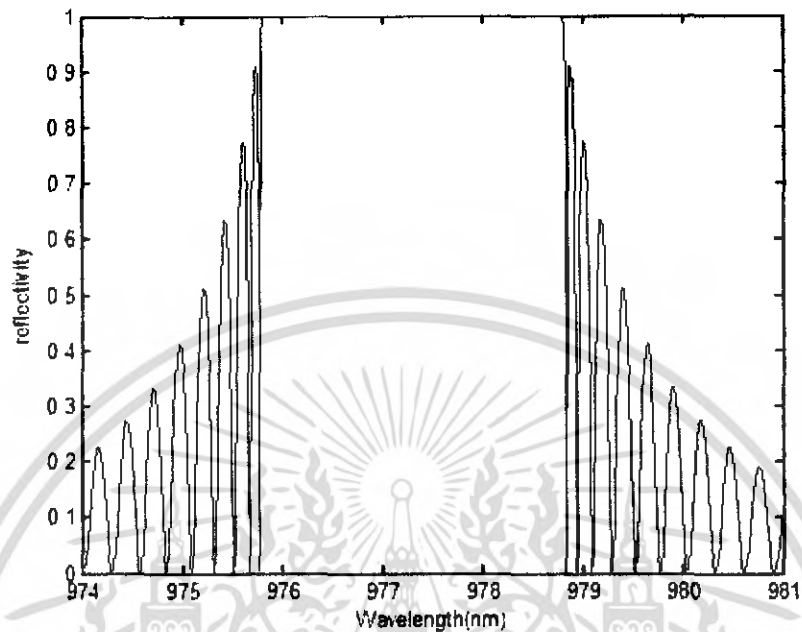
โดยที่ $n_1=1.460, n_2=1.457$ และ $a=4 \mu\text{m}$



รูปที่ 4.6 แสดงความขวคล้นสะท้อนกลับต่อค่านั้หักททเมื่อพิจรณสมบุดิฐนครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $n_1=1.462, n_2=1.457$ และ $a=4 \mu\text{m}$

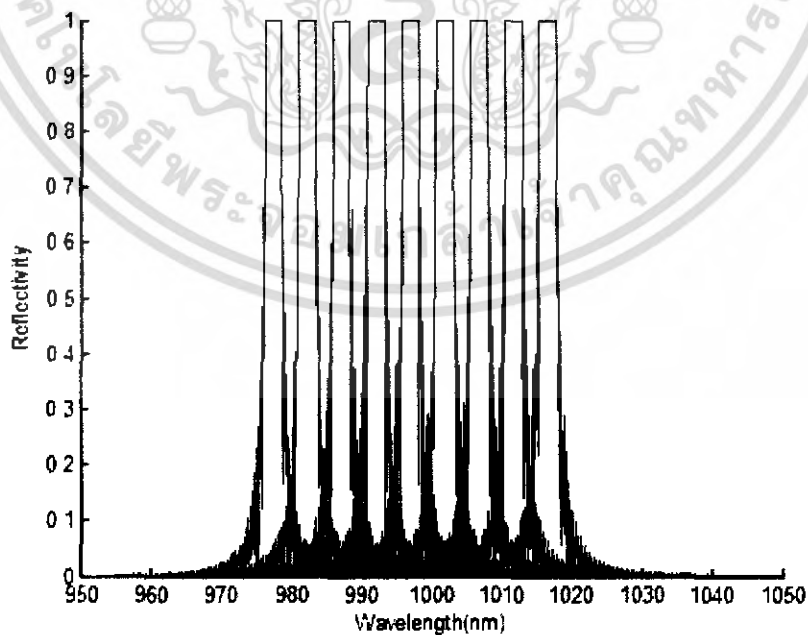


รูปที่ 4.7 แสดงความยาวคลื่นสะท้อนกลับต่อครีนิหักเหเมื่อพิจารณาสมมุติฐานครั้งที่ 3

4.1-3 สมมุติฐานการเปลี่ยนแปลงระยะคาบของเกรตติง

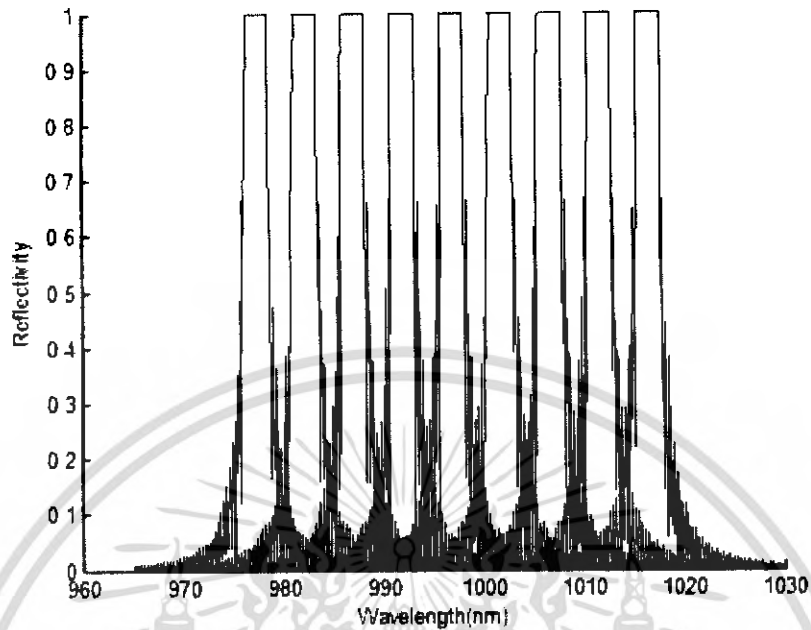
เมื่อนำสมการที่(2.33) พิจารณาโดยความยาวคลื่นสะท้อนกลับ 977.30 nm โดยให้แสดงผล

การเปลี่ยนแปลง 8 ระยะ โดยที่ $n_1=1.461, n_2=1.457$ และ $a=4 \mu\text{m}$



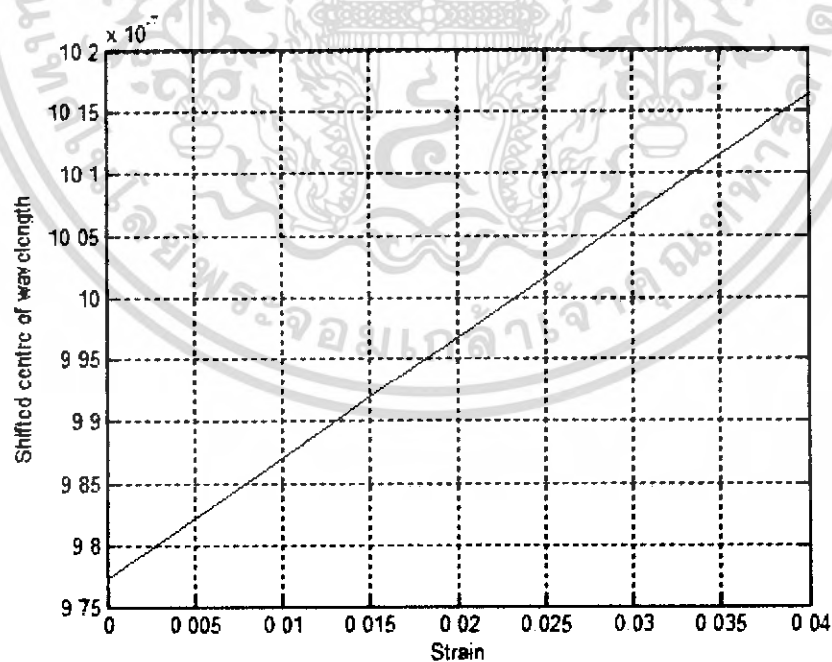
รูปที่ 4.8 แสดงความยาวคลื่นสะท้อนกลับต่อระยะคาบของเกรตติงเมื่อพิจารณาสมมุติฐานครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงความยาวคลื่นสะท้อนกลับต่อระยะคาบของกริดคิงเมื่อพิจารณาสมมุติฐานครั้งที่ 2

เมื่อพิจารณาผลความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นสะท้อนกลับ

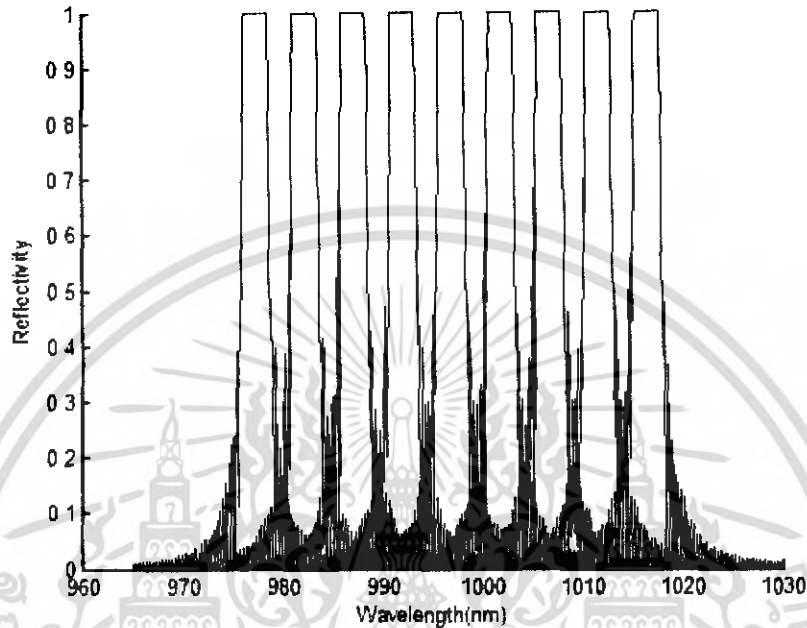


รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นสะท้อนกลับแบบเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

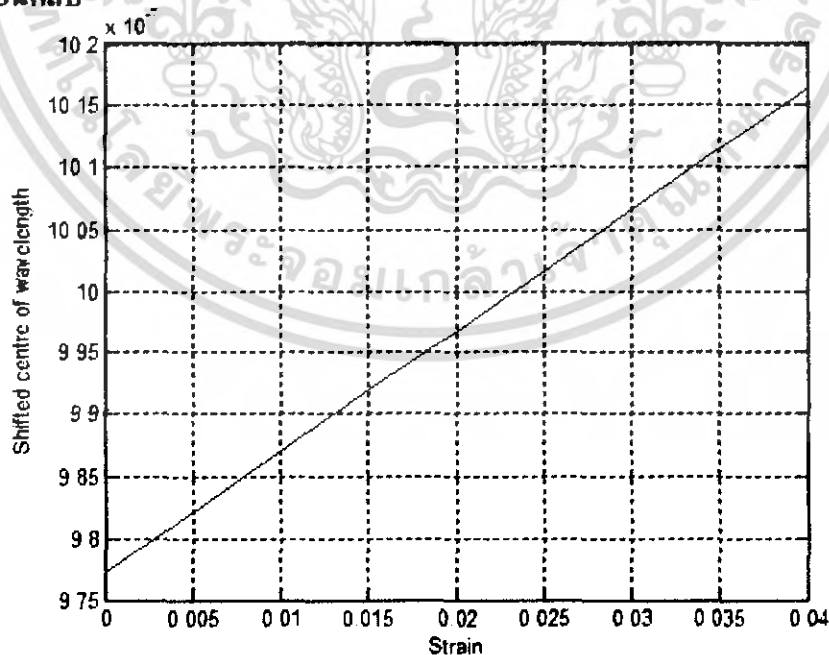
4.1-4 สมบัติฐานผลกระทบของความเครียดต่อระยะความถี่การคิง

เมื่อนำสมการที่(2.33) และเทอมแรกของ(2.39) พิจารณาโดยความยาวคลื่นสะท้อนกลับ 977.30 nm โดยให้แสดงผลการเปลี่ยนแปลง 8 ระยะ โดยที่ $n_1=1.461, n_2=1.457$ และ $a=4 \mu\text{m}$



รูปที่ 4.11 แสดงความยาวคลื่นสะท้อนกลับต่อผลกระทบที่เกิดจากความเครียดที่ต่างกัน 8 ช่วง

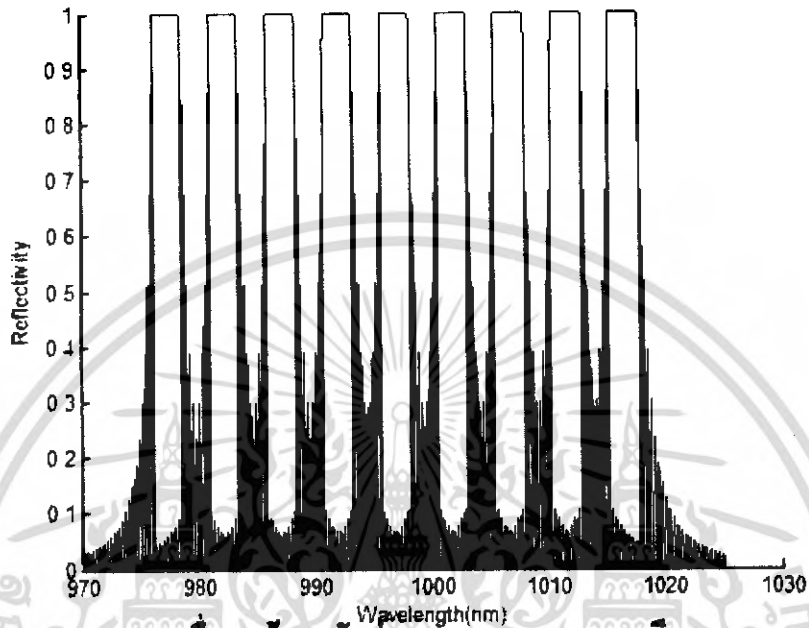
เมื่อพิจารณาผลความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นสะท้อนกลับ



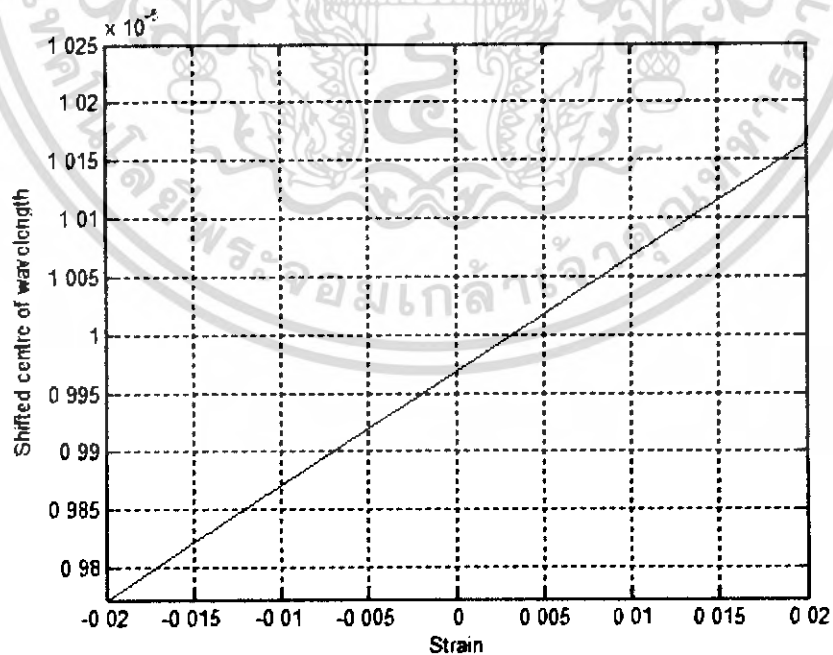
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นสะท้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1-5 สมบัติการหน่วงของความเร็วและความถี่แสงที่ระยะความถี่
 เมื่อนำสมการที่(2.33) และ สมการที่ (2.39) พิจารณาโดยความยาวคลื่นสะท้อนกลับ
 977.30 nm โดยให้แสดงผลการเปลี่ยนแปลง 8 ระยะ โดยที่ $n_1=1.461, n_2=1.457$ และ $a=4 \mu\text{m}$



รูปที่ 4.13 แสดงความยาวคลื่นสะท้อนกลับต่อผลกระทบของความถี่และความถี่และความถี่
 เมื่อพิจารณาผลความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความถี่และความถี่และความถี่กับการ
 เปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นสะท้อนกลับ

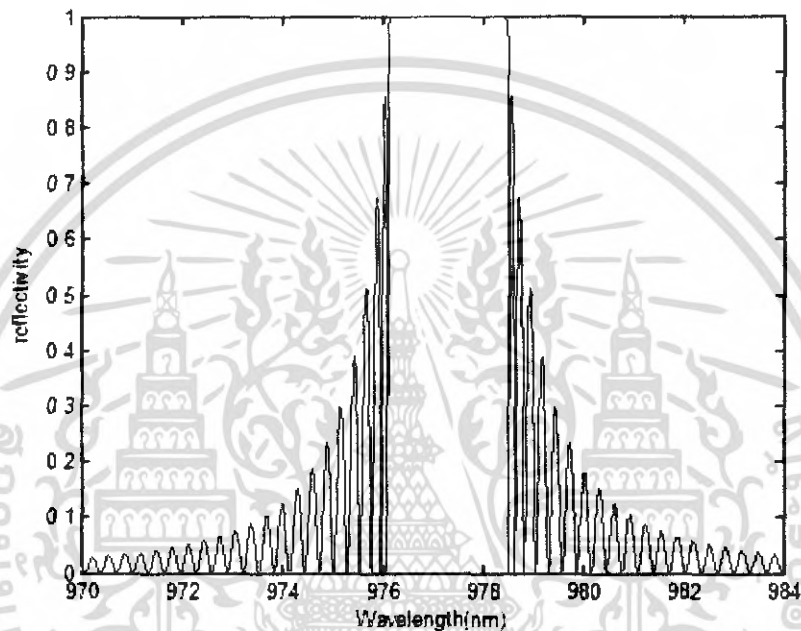


รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความถี่และความถี่และความถี่กับการ
 เปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นสะท้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 วิเคราะห์ผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรม MATLAB

จากผลการจำลองแบบเรคตติงที่มีความยาวคลื่นสะท้อนกลับกึ่งกลางเท่ากับ 977.30 nm โดยเมื่อแสงเดินทางผ่านเรคตติงเมื่อถึงความยาวคลื่นสะท้อนกลับกึ่งกลางของเรคตติงแสงจะเกิดการสะท้อนกลับทำให้ความยาวคลื่นช่วงนี้ผ่านเรคตติงไปไม่ได้ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกรองความยาวคลื่นและความถี่ได้



รูปที่ 4.15 แสดงความยาวคลื่นสะท้อนกลับที่กึ่งกลางเท่ากับ 977.30 nm

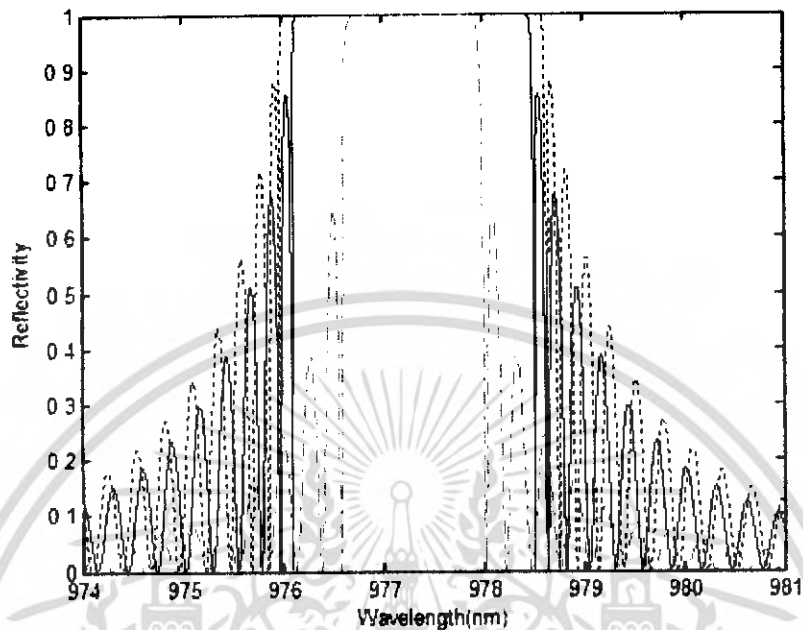
โดยจะแบ่งตามหัวข้อดังต่อไปนี้

- 4.2-1 การวิเคราะห์สมมติฐานเรื่องรัศมีของแกน
- 4.2-2 การวิเคราะห์สมมติฐานเรื่องครรชนหักเหของแกน
- 4.2-3 การวิเคราะห์สมมติฐานเรื่องระยะคาบของเรคตติง
- 4.2-4 การวิเคราะห์สมมติฐานเรื่องผลกระทบของความเคียดต่อระยะคาบเรคตติง
- 4.2-5 การวิเคราะห์สมมติฐานเรื่องผลกระทบของความเคียดและความเค้นและแสงต่อ

ระยะคาบเรคตติง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2-1 การวิเคราะห์สมมุติฐานเรื่องรัศมีของแกน

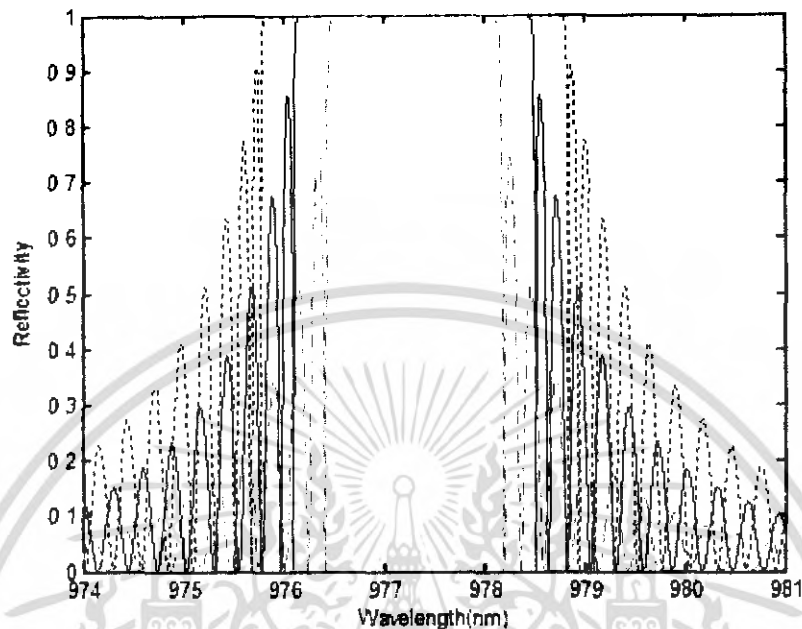


รูปที่ 4.16 การวิเคราะห์สมมุติฐานเรื่องรัศมีของแกน

โดยที่ เส้นสีเขียว แทนด้วยผลการจำลอง เมื่อ $n_1=1.461, n_2=1.457$ และ $a=2e-6$
 เส้นสีน้ำเงิน แทนด้วยผลการจำลอง เมื่อ $n_1=1.461, n_2=1.457$ และ $a=4e-6$
 และ เส้นสีแดง แทนด้วยผลการจำลอง เมื่อ $n_1=1.461, n_2=1.457$ และ $a=8e-6$
 จากผลการจำลองข้างต้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง

เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับรัศมีของแกน โขมแก้วนำแสงจะก่อให้เกิดผลโดยตรงต่อความถี่ออร์บิทัล โลซ์ ซึ่งเป็น ไปดังสมการ (2.33) ซึ่งมีผลต่อสัดส่วนรูปแบบของกำลังงานโหมดภายในส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความกว้างของความยาวคลื่นสะท้อนกลับ

4.2-2 การวิเคราะห์สมบัติฐานเรขาคณิตของแกน

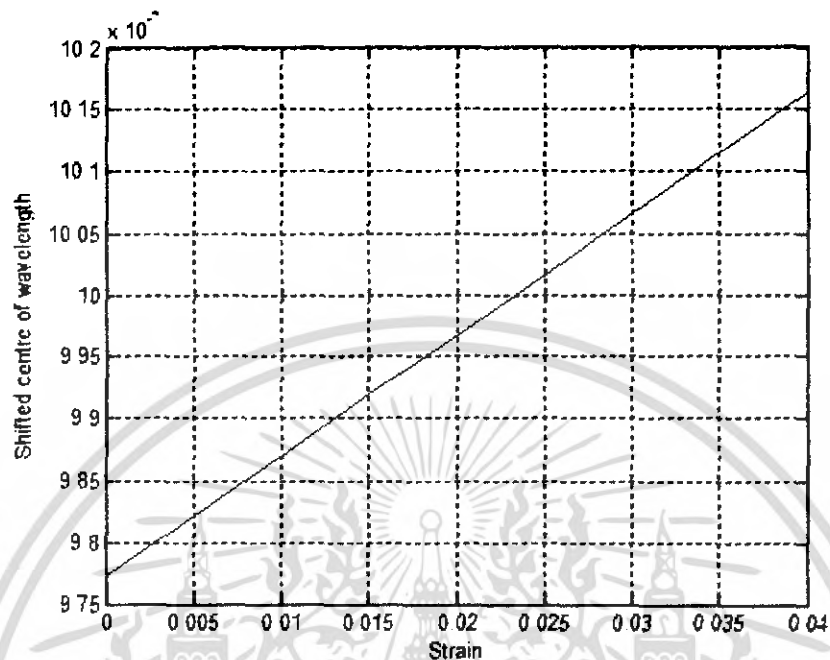


รูปที่ 4.17 การวิเคราะห์สมบัติฐานเรขาคณิตของแกน

โดยที่ แก๊สที่เขียว	แทนด้วยผลการจำลอง	เมื่อ $n_1=1.460, n_2=1.457$ และ $a=4e-6$
เส้นสีน้ำเงิน	แทนด้วยผลการจำลอง	เมื่อ $n_1=1.461, n_2=1.457$ และ $a=4e-6$
และ แก๊สสีแดง	แทนด้วยผลการจำลอง	เมื่อ $n_1=1.462, n_2=1.457$ และ $a=4e-6$

จากรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่า ค่าความยาวคลื่นกึ่งกลางการสะท้อนกลับของแบบเรขาคณิตขึ้นอยู่กับดัชนีหักเหภายในแกนตั้งสมการที่ (2.34) ซึ่งมีผลต่อสมการที่ (2.33) ดังรูป เปรียบเทียบผลการจำลองที่ 4.1-2 สังเกตได้ว่าเมื่อค่าดัชนีหักเหเกิดการเปลี่ยนแปลงจะ ไม่มีผลต่อค่าความยาวคลื่นสะท้อนกลับกึ่งกลางของเรขาคณิต แต่จะมีผลต่อความกว้างของความยาวคลื่นสะท้อนกลับเท่านั้น

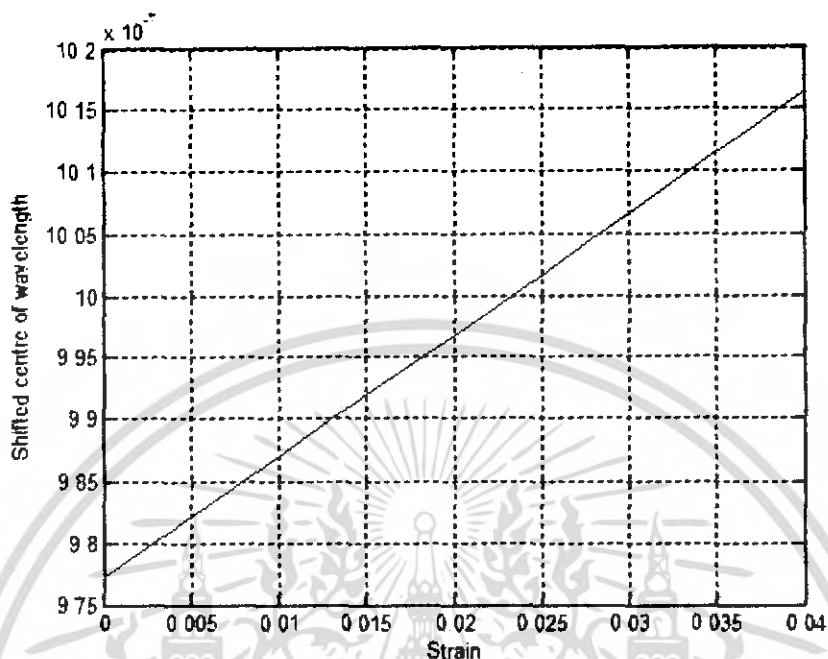
4.2-3 การวิเคราะห์สมมูลฐานเรื่องระยะคาบของเกรตติง



รูปที่ 4.18 การวิเคราะห์สมมูลฐานเรื่องระยะคาบของเกรตติง

เมื่อจำลองการเปลี่ยนแปลงระยะคาบของเกรตติง พบว่ามีผลโดยตรงต่อการทำให้ค่าความยาวคลื่นกึ่งกลางของการสะท้อนกลับเกิดการเปลี่ยนแปลงดังสมการที่ (2.38) ซึ่งระยะคาบของเกรตติงที่เปลี่ยนแปลงนี้เมื่อนำมาพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะที่เปลี่ยนแปลงไปคือความเครียด โดยกำหนดให้ความเครียดที่เพิ่มขึ้นนี้เพิ่มทีละ 0.005 ตามแนวแกน Z ในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ ทำให้ได้ผลของความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.17

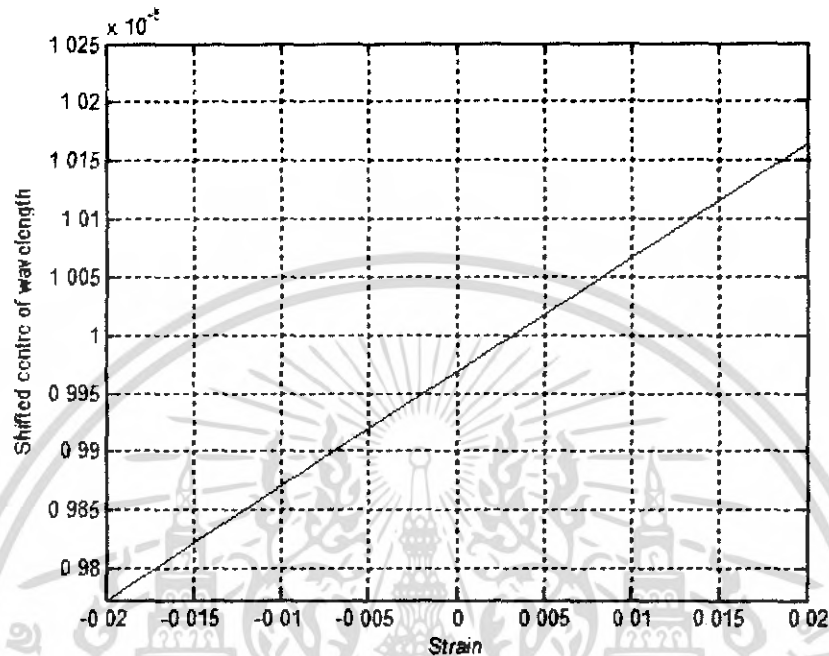
4.2-4 การวิเคราะห์สมมติฐานเรื่องผลกระทบของความเครียดต่อระยะคาบเกรตติง



รูปที่ 4.19 การวิเคราะห์สมมติฐานเรื่องผลกระทบของความเครียดต่อระยะคาบเกรตติง

เมื่อมีความเครียดกระทำต่อใยแก้ว ซึ่งเป็นผลให้ระยะของเส้นใยแก้วลดลง สอดคล้องกับกฎของ Poisson's Ratio ตามสมการที่ (2.48) ซึ่งเป็นผลของอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของแกนใยแก้ว นำแสงและแรงดึงที่เกิดขึ้นกับแกนของใยแก้ว จึงส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของความเกรตติง ดังสมการที่ (2.40)

4.2-5 การวิเคราะห์สมมูลฐานเรื่องผลกระทบของความเครียดและความเค้นและแสงต่อ ระยะคาบเกรตติง



รูปที่ 4.20 การวิเคราะห์สมมูลฐานเรื่องผลกระทบของความเครียดและความเค้นและแสงต่อระยะคาบเกรตติง

เมื่อมีความเครียดและความเค้นและแสงกระทำต่อใยแก้ว ซึ่งเป็นผลให้ระยะคาบของเกรตติงเพิ่มขึ้น และ คำนีหักเหภายในแกนเปลี่ยนแปลง ตามสมการที่ (2.39) โดยเมื่อนำไปใช้พิจารณาค่าความยาวคลื่นกลางสะท้อนกลับแล้วเป็นดังรูปที่ 4.19 นี้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะในโครงการ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำแบรคเกรตติงมาประยุกต์ใช้ในงานด้านธรณีฟิสิกส์เพื่อพัฒนาระบบตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนเพื่อใช้ในการตรวจสอบแผ่นดินไหว เริ่มจากการศึกษาระบบตรวจวัดแผ่นดินไหวเดิมเป็นลำดับแรก จากการศึกษาพบปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

- ระบบเดิมต้องทำการวัดขนาดของพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมา ซึ่งคำนวณได้จากการติดตามลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหว ทำให้เกิดปัญหาซึ่งยากต่อการวิเคราะห์ผล โดยต้องใช้ผู้ชำนาญเท่านั้น
- ระบบเดิมไม่สามารถวัดแรงสั่นสะเทือนเล็กๆหลายๆครั้ง ที่อาจก่อให้เกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ และแผ่นดินไหวระลอกหลัง (After Shock)
- ระบบเดิมไม่สามารถวัดแรงสั่นสะเทือนในขอบเขตที่จำกัด เพื่อศึกษาธรณีฟิสิกส์ได้
- ระบบเดิมไม่สามารถใช้ในการช่วยทดสอบการก่อสร้างอาคารให้มีความมั่นคงแข็งแรงในพื้นที่เสี่ยงภัย

เมื่อพิจารณาข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการของระบบตรวจวัด การศึกษานี้จึงเห็นควรให้มีการพัฒนาระบบใหม่เพื่อช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของการตรวจวัด เพื่อเกิดประโยชน์ในการปกป้องชีวิตและทรัพย์สินจากภัยแผ่นดินไหวมากที่สุด

เพื่อให้ระบบตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมกับการใช้งานและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงได้ทำการศึกษาและทบทวนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบตรวจวัดโดยใช้แบรคเกรตติง เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบที่จะพัฒนาขึ้น

จากการทบทวนแนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้องตลอดจนงานวิจัยที่ผ่านมา สามารถสรุปเพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาได้ว่า แบรคเกรตติงมีลักษณะการส่งผ่านสัญญาณและสะท้อนกลับสัญญาณได้ จึงมุ่งเน้นการศึกษาในส่วนของการสะท้อนความยาวคลื่นแสงกลับที่เปลี่ยนแปลงตามค่าตัวแปรแวดล้อมต่างๆที่มีผลต่อระยะคาบเกรตติง และนำค่าสะท้อนกลับในส่วนนี้มาวิเคราะห์เพื่อนำไปใช้ในระบบ

ดังนั้นระบบตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนที่พัฒนาขึ้นนี้จึงเป็นระบบที่มีความละเอียดในผลของ

การตรวจวัด โดยการทำงานของระบบตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนมุ่งเน้นพิจารณาความยาวคลื่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะท้อนกลับกลางที่เปลี่ยนแปลงต่อความเครียดและความเค้น ซึ่งสามารถแบ่งขั้นตอนการจำลองด้วยโปรแกรมประยุกต์ได้เป็น 5 ส่วน คือ การจำลองผลที่เกิดจากสมมติฐานเรื่องรัศมีของแกน สมมติฐานเรื่องดัชนีหักเหของแกน สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงระยะคาบของเกรตติง สมมติฐานผลกระทบของความเครียดต่อระยะคาบเกรตติง สมมติฐานผลกระทบของความเครียด ความเค้น และแสง(Optic stress) ตามลำดับ โดยคำนึงข้อจำกัดและเงื่อนไขที่เกี่ยวข้องซึ่งได้แก่ รัศมีของแกน ดัชนีหักเหของแกน ระยะคาบของเกรตติง ผลกระทบของความเครียดต่อระยะคาบเกรตติง ผลกระทบของความเครียด ความเค้นและแสงต่อระยะคาบเกรตติง โดยพิจารณาเรียงตามความสำคัญดังนี้

สมมติฐานเรื่องรัศมีของแกน
 เปลี่ยนแปลงรัศมีแกน โดยเพิ่มขึ้นทีละ 2 เท่า
 สมมติฐานเรื่องดัชนีหักเหของแกน
 เปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหของแกน เพิ่มทีละ 1 ไมโครเมตร
 สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงระยะคาบของเกรตติง
 เปลี่ยนแปลงความยาวช่วงเกรตติง
 สมมติฐานผลกระทบของความเครียดต่อระยะคาบเกรตติง
 เพิ่มปริมาณความเครียดที่กระทำต่อช่วงเกรตติง
 สมมติฐานผลกระทบของความเครียด ความเค้นและแสง(Optic stress)
 เพิ่มปริมาณความเครียด ความเค้นและแสงต่อช่วงเกรตติง

ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ คือ ความยาวคลื่นสะท้อนกลับมีผลเปลี่ยนแปลงตามรัศมี ดัชนีหักเห ความเครียด ที่กระทำกับช่วงเกรตติง ความเค้นและแสงที่กระทำกับช่วงเกรตติง เมื่อทำให้ระยะคาบของเกรตติงขยายตัวออกตามแนวแกนระบบพิกัดฉากที่พิจารณาทำให้ค่ารัศมีของเกรตติงน้อยลง ซึ่งค่าของความเครียด ความเค้นยิ่งมากยิ่งทำให้ค่าความยาวคลื่นสะท้อนกลับมากขึ้นเรื่อยๆ ผลที่ได้จากการจำลองมีกราฟความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นเชิงเส้นเมื่อพิจารณาค่าความเครียด ความเค้นต่อการเลื่อนของความยาวคลื่นกึ่งกลางสะท้อนกลับ

ซึ่งผลจากกระบวนการที่จำลองขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องมือตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนด้วยแบรกกเรตติงต่อไปได้

อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ในการจำลองยังมีข้อด้อยอยู่บ้าง เนื่องจากไม่คิดค่าการลดทอนของค่าการสะท้อนกลับแบรกกเรตติง และไม่คิดค่าการลดทอนของระบบ อย่างไรก็ตามการจำลองระบบนี้ยังสามารถแก้ไขข้อด้อยได้ โดยนำผลการลดทอนมาพิจารณาเพื่อให้ได้ค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ได้นั้นช่วยในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลจากเครื่องมือวัดแรงสั่นสะเทือนด้วย
แบรคเกอร์ตึงที่มีการพัฒนาในอนาคต และสามารถประยุกต์ให้ใช้งานได้กับระบบตรวจวัดอื่นที่
ขึ้นกับค่าความเครียดและความเค้น

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

จากการศึกษาและจำลองผลของระบบเครื่องมือตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนด้วยแบรคเกอร์ตึง
พบปัญหาและอุปสรรคดังนี้

- 1) ในการนำไปประยุกต์ใช้จริงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์วิเคราะห์สเปกตรัมทางแสงที่มีความ
ละเอียดและไวต่อการเปลี่ยนแปลง (Responsibility) สูง
- 2) อุปกรณ์ในการวิเคราะห์สเปกตรัมทางแสงมีราคาสูง
- 3) ค่าการลดทอนที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ในระบบอื่นๆ

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากผลการดำเนินงานวิจัยใน โครงการนี้ ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนาระบบตรวจวัด
แรงสั่นสะเทือน เพื่อพัฒนาต่อในอนาคตดังนี้

ผลของแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ตรวจวัดในความเป็นจริงควรมีลักษณะเป็น 3
มิติในระบบพิกัดฉาก แต่ในการจำลองนี้พิจารณาเพียง 1 มิติในระบบพิกัดฉาก

รายการอ้างอิง

ผศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน. เครื่องข่ายใยแก้วนำแสง. ส่วนตำราสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรมสมาคม
ส่งเสริมเทคโนโลยี. 1 9-106 (1998)

อภิรักษ์ มัชฌานนท์. การสื่อสารเส้นใยแสง. คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 10 7-139 (2002)

John Dakin ,Brian Culshaw. Optical Fiber Sensors Principles and components Volume One.
2 270-273 38-48. (1988)

John Dakin ,Brian Culshaw. Optical Fiber Sensors Principles and components Volume Two.
2 729-738. (1988)

Andreas Othonos and Kyriacos Kalli. Fiber Bragg Grating. Aztech House Inc
0890063443 (1999)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการจำลองผลที่เกิดจากสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมประยุกต์ MATLAB นั้นผู้เขียนใคร่ขอเปลี่ยนแปลงตัวแปรในสมการทางฟิสิกส์เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน โปรแกรมประยุกต์ดังต่อไปนี้

ตัวแปรทางฟิสิกส์	ตัวแปรที่ใช้ใน MATLAB	คือ
λ	lamda	ความยาวคลื่น
n_{core}	n1	ดัชนีหักเหภายในแกน
n_{clad}	n2	ดัชนีหักเหภายในเคลด
r	r	รัศมีของใยแก้วนำแสง
l	l	ความยาวช่วงเกรตติง
λ_B	lamdaB	ความยาวคลื่นสะท้อนกลับ
Λ	pitch	ช่องระหว่างเกรตติง “พิทช์”
NA	NA	นิวเมอริคัลแอปเจอร์เจอร์
Δn	deltan	ผลต่างของดัชนีหักเหในแกนและในเคลด
v	v	ค่าความถี่อมัลไลซ์ของใยแก้วนำแสง
Mp	Mp	สัดส่วนของกำลังในแกนของโหมดใยแก้วนำแสง
Ω	Omega	สัมประสิทธิ์การคัปปลิง
k	k	ค่าคงที่การแพร่
Δk	deltak	ค่าเวกเตอร์คลื่นที่เปลี่ยนแปลงไป
s	s	ผลต่างระหว่างสัมประสิทธิ์การคัปปลิงกับค่าเวกเตอร์คลื่นที่เปลี่ยนแปลงไป
R	R	คุณสมบัติการสะท้อนคลื่น
ϵ_{long}	LongS	อัตราส่วนของความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปกับความยาวเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ϵ_{lat}	LatS	อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางที่เปลี่ยนไปกับเส้นผ่านศูนย์กลางเดิม
μ	PoissonR	อัตราส่วนปัวซอง
σ_{long}	LongSt	ความเค้นในแนวแกนนอน
σ_{lat}	LatSt	ความเค้นในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง
$\Delta n_{stress-optic}$	deltanSO	ค่าความต่างของดัชนีหักเหระหว่างแกนและแคลด
$\Delta \sigma_{stress-optic}$	deltaSt	ค่าความต่างของความเค้นหลักที่เกิดขึ้นระหว่างแกนและแคลด
c	c	สัมประสิทธิ์ความเค้นและแสงแบบสัมพัทธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสข้อมูล(Source Code) ของผลการจำลองรูปที่ 4.1

```

r=linspace(0,3,200);
r=r';

s=0.1;
x=1./sqrt((1-r.^2).^2+(2*s*r).^2);
phi=atan2(2*s*r,1-r.*r);
subplot(2,1,1)
a(1)=plot(r,x);
hold on
subplot(2,1,2)
b(1)=plot(r,phi);
hold on
s=0.25;

x=1./sqrt((1-r.^2).^2+(2*s*r).^2);
phi=atan2(2*s*r,1-r.*r);
subplot(2,1,1)
a(2)=plot(r,x,'b-');
subplot(2,1,2)
b(2)=plot(r,phi,'b-');

s=0.707;
x=1./sqrt((1-r.^2).^2+(2*s*r).^2);
phi=atan2(2*s*r,1-r.*r);
subplot(2,1,1)
a(3)=plot(r,x,'b-');
subplot(2,1,2)
b(3)=plot(r,phi,'b-');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

s=1.0;
x=1./sqrt((1-r.^2).^2+(2*s*r).^2);
phi=atan2(2*s*r,1-r.*r);
subplot(2,1,1)
a(4)=plot(r,x,'b--');
xlabel('Frequency Ratio');
ylabel('Normalized Magnitude');
legend(a,'0.1','0.25','0.77','1.0')
subplot(2,1,2)
b(4)=plot(r,phi,'b--');
xlabel('Frequency Ratio');
ylabel('Phase Angle, Rad');
legend(b,'0.1','0.25','0.707','1.0')

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสข้อมูล(Source Code) ของผลการจำลองรูปที่ 4.2

```

clear;
clf;
lamda=[965:0.001:1080]*1e-9;
n1=1.461;
n2=1.457;
r=4e-6;
l=0.001;
lamdaB=977.3e-9;
Pitch=lamdaB/(2*n1); % (2.31)
NA=sqrt(n1^2-n2^2);
deltan=n1-n2;
v=2*pi*r*NA./lamda;
Mp=1-1./v.^2;
Omega=pi*deltan.*Mp/lamdaB; % (2.34)
k=2*pi*n1./lamda; % (2.36)
deltak=k-pi./Pitch; % (2.35)
s=sqrt(Omega.^2-deltak.^2);
R=(Omega.^2.*(sinh(1.*s)).^2)./(deltak.^2.*(sinh(1.*s)).^2+s.^2.*(cosh(1.*s)).^2); % (2.33)
figure;
plot(lamda*1e9,R);
axis([974 981 0 1])
xlabel('Wavelength(nm)')
ylabel('reflectivity')

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสซอร์สโค้ด(Source Code) ของผลการจำลองรูปที่ 4.3

```

clear;

clf;

lamda=[965:0.001:1080]*1e-9;

n1=1.461;
n2=1.457;
r=2e-6;
l=0.001;

lamdaB=977.3e-9;
Pitch=lamdaB/(2*n1); % (2.31)
NA=sqrt(n1^2-n2^2);
deltan=n1-n2;
v=2*pi*r*NA./lamda;
Mp=1-1./v.^2;
Omega=pi*deltan.*Mp/lamdaB; % (2.34)
k=2*pi*n1./lamda; % (2.36)
deltak=k-pi./Pitch; % (2.35)
s=sqrt(Omega.^2-deltak.^2);
R=(Omega.^2.*(sinh(l.*s)).^2)/(deltak.^2.*(sinh(l.*s)).^2+s.^2.*(cosh(l.*s)).^2); % (2.33)
figure;
plot(lamda*1e9,R);
axis([974 981 0 1])
xlabel('Wavelength(nm)')
ylabel('reflectivity')

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสข้อมูล(Source Code) ของผลการจำลองรูปที่ 4.4

```

clear;
clf;
lamda=[965:0.001:1080]*1e-9;
n1=1.461;
n2=1.457;
r=8e-6;
l=0.001;
lamdaB=977.3e-9;
Pitch=lamdaB/(2*n1); % (2.31)
NA=sqrt(n1^2-n2^2);
deltan=n1-n2;
v=2*pi*r*NA./lamda;
Mp=1-1./v.^2;
Omega=pi*deltan.*Mp./lamdaB; % (2.34)
k=2*pi*n1./lamda; % (2.36)
deltak=k-pi./Pitch; % (2.35)
s=sqrt(Omega.^2-deltak.^2);
R=(Omega.^2.*(sinh(l.*s)).^2)./(deltak.^2.*(sinh(l.*s)).^2+s.^2.*(cosh(l.*s)).^2); % (2.33)
figure;
plot(lamda*1e9,R);
axis([974 981 0 1])
xlabel('Wavelength(nm)')
ylabel('reflectivity')

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสข้อมูล(Source Code) ของผลการจำลองรูปที่ 4.5

```

clear;
clf;
lamda=[965:0.001:1080]*1e-9;
n1=1.461;
n2=1.457;
r=4e-6;
l=0.001;
lamdaB=977.3e-9;
Pitch=lamdaB/(2*n1); % (2.31)
NA=sqrt(n1^2-n2^2);
deltan=n1-n2;
v=2*pi*r*NA./lamda;
Mp=1-1./v.^2;
Omega=pi*deltan.*Mp./lamdaB; % (2.34)
k=2*pi*n1./lamda; % (2.36)
deltak=k-pi./Pitch; % (2.35)
s=sqrt(Omega.^2-deltak.^2);
R=(Omega.^2.*(sinh(l.*s)).^2)./(deltak.^2.*(sinh(l.*s)).^2+s.^2.*(cosh(l.*s)).^2); % (2.33)
figure;
plot(lamda*1e9,R);
axis([974 981 0 1])
xlabel('Wavelength(nm)')
ylabel('reflectivity')

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสข้อมูล(Source Code) ของผลการจำลองรูปที่ 4.6

```

clear;
clf;
lamda=[965:0.001:1080]*1e-9;
n1=1.460;
n2=1.457;
r=4e-6;
l=0.001;
lamdaB=977.3e-9;
Pitch=lamdaB/(2*n1); % (2.31)
NA=sqrt(n1^2-n2^2);
deltan=n1-n2;
v=2*pi*r*NA./lamda;
Mp=1-1./v.^2;
Omega=pi*deltan.*Mp/lamdaB; % (2.34)
k=2*pi*n1./lamda; % (2.36)
deltak=k-pi./Pitch; % (2.35)
s=sqrt(Omega.^2-deltak.^2);
R=(Omega.^2.*(sinh(1.*s)).^2)./(deltak.^2.*(sinh(1.*s)).^2+s.^2.*(cosh(1.*s)).^2); % (2.33)
figure;
plot(lamda*1e9,R);
axis([974 981 0 1])
xlabel('Wavelength(nm)')
ylabel('reflectivity')

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสข้อมูล(Source Code) ของผลการจำลองรูปที่ 4.7

```

clear;
clf;
lamda=[965:0.001:1080]*1e-9;
n1=1.462;
n2=1.457;
r=4e-6;
l=0.001;
lamdaB=977.3e-9;
Pitch=lamdaB/(2*n1); % (2.31)
NA=sqrt(n1^2-n2^2);
deltan=n1-n2;
v=2*pi*r*NA./lamda;
Mp=1-1./v.^2;
Omega=pi*deltan.*Mp/lamdaB; % (2.34)
k=2*pi*n1./lamda; % (2.36)
deltak=k-pi./Pitch; % (2.35)
s=sqrt(Omega.^2-deltak.^2);
R=(Omega.^2.*(sinh(l.*s)).^2)/(deltak.^2.*(sinh(l.*s)).^2+s.^2.*(cosh(l.*s)).^2); % (2.33)
figure;
plot(lamda*1e9,R);
axis([974 981 0 1])
xlabel('Wavelength(nm)')
ylabel('reflectivity')

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสซอร์ส (Source Code) ของผลการจำลองรูปที่ 4.8 4.9 และ 4.10

```

clf;
clear;
lamda=[965:0.1:1030]*1e-9;
n1=1.461;
n2=1.457;
r=4e-6;
l=0.001;
PoissonR=0.34;
lamdaB=977.30e-9;
Pitch=lamdaB/(2*n1); % (2.31)
NA=sqrt(n1^2-n2^2);
deltan=n1-n2;
k=2*pi*n1./lamda; % (2.36)
LongS=0.005;
LatS=0;
Pitch1=Pitch;
rr=r;
index=0;
figure;
hold on;
for n=0:8
    index=index+1;
    Pitch=Pitch1+Pitch1*(n*LongS);
    LatS=(-1)*PoissonR*(LongS*n);
    r=rr+r*(LatS);
    v=2*pi*r*NA./lamda;
    Mp=1-1./v.^2;
    Omega=pi*deltan.*Mp/lamdaB; % (2.34)
    deltak=k-pi./Pitch; % (2.35)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

s=sqrt(Omega.^2-deltak.^2);
R=(Omega.^2.*(sinh(l.*s)).^2)./(deltak.^2.*(sinh(l.*s)).^2+s.^2.*(cosh(l.*s)).^2);%(2.33)
[max_R,y]=max(R);
z(index)=lamda(y);
plot(lamda*1c9,R);
xlabel('Wavelength(nm)')
ylabel('Reflectivity')
end
Z=z;
strain=[0:0.005:0.04];
figure;
plot(strain,Z)
xlabel('Strain')
ylabel('Shifted centre of wavelength')

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสซอร์สโค้ด(Source Code) ของผลการจำลองรูปที่ 4.11 และ 4.12

```

clf;
clear;
lamda=[965:0.1:1030]*1e-9;
n1=1.461;
n2=1.457;
r=4e-6;
l=0.001;
PoissonR=0.34;
lamdaB=977.30e-9;
Pitch=lamdaB/(2*n1); % (2.31)
NA=sqrt(n1^2-n2^2);
deltan=n1-n2;
k=2*pi*n1./lamda; % (2.36)
LongS=0.005;
LatS=0;
Pitch1=Pitch;
rr=r;
index=0;
figure;
hold on;
for n=0:8
    index=index+1;
    Pitch=Pitch1+Pitch1*(n*LongS);
    LatS=(-1)*PoissonR*(LongS*n);
    r=rr+r*(20*LatS);
    v=2*pi*r*NA./lamda;
    Mp=1-1./v.^2;
    Omega=pi*deltan.*Mp./lamdaB; % (2.34)
    deltak=k-pi./Pitch; % (2.35)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

s=sqrt(Omega.^2-deltak.^2);
R=(Omega.^2.*(sinh(l.*s)).^2)/(deltak.^2.*(sinh(l.*s)).^2+s.^2.*(cosh(l.*s)).^2);%(2.33)
[max_R,y]=max(R);
z(index)=lamda(y);
plot(lamda*1e9,R);
xlabel('Wavelength(nm)')
ylabel('Reflectivity')

end

Z=z;
strain=[0:0.005:0.04];
figure;
plot(strain,Z)
xlabel('Strain')
ylabel('Shifted centre of wavelength')

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสข้อมูล(Source Code) ของผลการจำลองรูปที่ 4.13 และ 4.14

```

clear;
clf;
lamda=[970:0.001:1025]*1e-9;
n1=1.461;
n2=1.457;
r=4e-6;
l=0.001;
lamdaB=977.3e-9;
Pitch=lamdaB/(2*n1);
k=2*pi*n1./lamda;
E=2.967e9;
PoissonR=0.34;
c=[0.3 0.28;0.28 0.3]*1e-10;
LongS=[0.005];
LatS=0;
nn1=n1;
Pitch1=Pitch;
rr=r;
index=0;
figure;
hold on;

for n=0:8
    index=index+1;
    Pitch=Pitch1+Pitch1*(n*LongS);
    LongSt=E.*(LongS*n);
    LatS=(-1)*PoissonR*(LongS*n);
    LatSt=E.*(LatS);
    T=[LatSt;LongSt];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

rindex=c*T;
nn=rindex(2,1);
n1=nn1+nn1*(nn*LongS);
deltan=(n1-n2);
NA=sqrt(n1^2-n2^2);
v=2*pi*r*NA./lamdaB;
Mp=1-1./v.^2;
Omega=pi*deltan.*Mp/lamdaB;
deltak=k-pi./Pitch;
s=sqrt(Omega.^2-deltak.^2);
R=(Omega.^2.*(sinh(1.*s)).^2)./(deltak.^2.*(sinh(1.*s)).^2+s.^2.*(cosh(1.*s)).^2);
[max_R,y]=max(R);
z(index)=lamda(y);
plot(lamda*1e9,R);
xlabel('Wavelength(nm)')
ylabel('Reflectivity')
end

Z=z;
strain=[-0.02:0.005:0.02];
figure;
plot(strain,Z);
axis([-0.02 0.02 9.773*1e-7 10.25*1e-7])
xlabel('Strain')
ylabel('Shifted centre of wavelength')

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสข้อมูล(Source Code) ของผลการจำลองรูปที่ 4.16

```

clear;
clf;
lamda=[965:0.001:1080]*1e-9;
n1=1.461;
n2=1.457;
r=4e-6;
l=0.001;
PoissonR=0.34;
lamdaB=977.3e-9;
Pitch=lamdaB/(2*n1); % (2.31)
NA=sqrt(n1^2-n2^2);
deltan=n1-n2;
v=2*pi*r*NA./lamda;
Mp=1-1./v.^2;
Omega=pi*deltan.*Mp/lamdaB; % (2.34)
k=2*pi*n1./lamda; % (2.36)
deltak=k-pi./Pitch; % (2.35)
s=sqrt(Omega.^2-deltak.^2);
R=(Omega.^2.*(sinh(l.*s)).^2)/(deltak.^2.*(sinh(l.*s)).^2+s.^2.*(cosh(l.*s)).^2); % (2.33)
subplot(1,1,1)
a(1)=plot(lamda*1e9,R,'b-');
hold on
axis([974 981 0 1])
xlabel('Wavelength(nm)')
ylabel('reflectivity')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
lamda=[965:0.001:1080]*1e-9;
n1=1.461;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

n2=1.457;
r=2e-6;
l=0.001;
PoissonR=0.34;
lamdaB=977.3e-9;
Pitch=lamdaB/(2*n1); % (2.31)
NA=sqrt(n1^2-n2^2);
deltan=n1-n2;
v=2*pi*r*NA./lamda;
Mp=1-1./v.^2;
Omega=pi*deltan.*Mp/lamdaB; % (2.34)
k=2*pi*n1./lamda; % (2.36)
deltak=k-pi./Pitch; % (2.35)
s=sqrt(Omega.^2-deltak.^2);
R=(Omega.^2.*(sinh(l.*s)).^2)/(deltak.^2.*(sinh(l.*s)).^2+s.^2.*(cosh(l.*s)).^2); % (2.33)
subplot(1,1,1)
a(2)=plot(lamda*1e9,R,'g--');
hold on
axis([974 981 0 1])
xlabel('Wavelength(nm)')
ylabel('reflectivity')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
lamda=[965:0.001:1080]*1e-9;
n1=1.461;
n2=1.457;
r=8e-6;
l=0.001;
PoissonR=0.34;
lamdaB=977.3e-9;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Pitch=lamdaB/(2*n1); % (2.31)
```

```
NA=sqrt(n1^2-n2^2);
```

```
deltan=n1-n2;
```

```
v=2*pi*r*NA./lamda;
```

```
Mp=1-1./v.^2;
```

```
Omega=pi*deltan.*Mp/lamdaB; % (2.34)
```

```
k=2*pi*n1./lamda; % (2.36)
```

```
deltak=k-pi./Pitch; % (2.35)
```

```
s=sqrt(Omega.^2-deltak.^2);
```

```
R=(Omega.^2.*(sinh(1.*s)).^2)./(deltak.^2.*(sinh(1.*s)).^2+s.^2.*(cosh(1.*s)).^2); % (2.33)
```

```
subplot(1,1,1)
```

```
a(3)=plot(lamda*1e9,R,'r-');
```

```
axis([974 981 0 1])
```

```
xlabel('Wavelength(nm)')
```

```
ylabel('reflectivity')
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสข้อมูล(Source Code) ของผลการจำลองรูปที่ 4.17

```

clear;

clf;

lamda=[965:0.001:1080]*1e-9;

n1=1.461;

n2=1.457;

r=4e-6;

l=0.001;

PoissonR=0.34;

lamdaB=977.3e-9;

Pitch=lamdaB/(2*n1); % (2.31)
NA=sqrt(n1^2-n2^2);
deltan=n1-n2;
v=2*pi*r*NA./lamda;
Mp=1-1./v.^2;
Omega=pi*deltan.*Mp/lamdaB; % (2.34)
k=2*pi*n1./lamda; % (2.36)
deltak=k-pi./Pitch; % (2.35)
s=sqrt(Omega.^2-deltak.^2);
R=(Omega.^2.*(sinh(l.*s)).^2)/(deltak.^2.*(sinh(l.*s)).^2+s.^2.*(cosh(l.*s)).^2); % (2.33)
subplot(1,1,1)
a(1)=plot(lamda*1e9,R,'b-');

hold on

axis([974 981 0 1])

xlabel('Wavelength(nm)')

ylabel('reflectivity')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

lamda=[965:0.001:1080]*1e-9;

n1=1.460;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

n2=1.457;
r=4e-6;
l=0.001;
PoissonR=0.34;
lamdaB=977.3e-9;
Pitch=lamdaB/(2*n1); % (2.31)
NA=sqrt(n1^2-n2^2);
deltan=n1-n2;
v=2*pi*r*NA./lamda;
Mp=1-1./v.^2;
Omega=pi*deltan.*Mp/lamdaB; % (2.34)
k=2*pi*n1./lamda; % (2.36)
deltak=k-pi./Pitch; % (2.35)
s=sqrt(Omega.^2-deltak.^2);
R=(Omega.^2.*(sinh(l.*s)).^2)/(deltak.^2.*(sinh(l.*s)).^2+s.^2.*(cosh(l.*s)).^2); % (2.33)
subplot(1,1,1)
a(2)=plot(lamda*1e9,R,'g--');
hold on
axis([974 981 0 1])
xlabel('Wavelength(nm)')
ylabel('reflectivity')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
lamda=[965:0.001:1080]*1e-9;
n1=1.462;
n2=1.457;
r=4e-6;
l=0.001;
PoissonR=0.34;
lamdaB=977.3e-9;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Pitch=lamdaB/(2*n1);                                %(2.31)
NA=sqrt(n1^2-n2^2);
deltan=n1-n2;
v=2*pi*r*NA./lamda;
Mp=1-1./v.^2;
Omega=pi*deltan.*Mp/lamdaB;                        %(2.34)
k=2*pi*n1./lamda;                                  %(2.36)
deltak=k-pi./Pitch;                                %(2.35)
s=sqrt(Omega.^2-deltak.^2);
R=(Omega.^2.*(sinh(1.*s)).^2)/(deltak.^2.*(sinh(1.*s)).^2+s.^2.*(cosh(1.*s)).^2);  %(2.33)
subplot(1,1,1)
a(3)=plot(lamda*1e9,R,'r-');
axis([974 981 0 1])
xlabel('Wavelength(nm)')
ylabel('reflectivity')

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้