การศึกษาลักษณะการขยายสัญญาณแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสง เออร์เบียมโดป และการประยุกต์

A STUDY OF ERBIUM-DOPED FIBER AMPLIFIER CHARACTERISTICS AND APPLICATIONS

วันชัย ขันนาม
WANCHAI KHUNNAM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-247-3

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาลักษณะการขยายสัญญาณแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสง เออร์เบียมโดป และการประยุกต์

A STUDY OF ERBIUM-DOPED FIBER AMPLIFIER CHARACTERISTICS AND APPLICATIONS

วันชัย ขันนาม

WANCHAI KHUNNAM

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 49618
วัน, เดือน, ปี 25 ก.พ. 2547

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-247-3

A STUDY OF ERBIUM-DOPED FIBER AMPLIFIER CHARACTERISTICS AND APPLICATIONS

WANCHAI KHUNNAM

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2003

ISBN 974-324-247-3

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาลักษณะการขยายสัญญาณแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป และการประยุกต์

A STUDY OF ERBIUM-DOPED FIBER AMPLIFIER CHARACTERISTICS AND APPLICATIONS

ชื่อนักศึกษา นายวันชัย ขันนาม

รหัสประจำตัว 43065001

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ปรีชา ยุพาพิน

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.สุวรรณ	คูสำราญ	
รศ.ดร.ปรีชา	ยุพาพิน	
รศ.ดร.ฐิตินัย	แก้วแดง	
ดร.สุรศักดิ์	เชียงกา	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 22 มกราคม 2546 เวลา 9.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬาภรณวลัยลักษณ์ 1 ชั้น 3 ห้อง 307

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัตชู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 20 **เดือน** มกราคม **พ.ศ.** 2546

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาลักษณะการขยายสัญญาณแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดปและการประยุกต์
นักศึกษา	นายวันชัย ขันนาม
รหัสประจำตัว	43065001
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ปรีชา ยุพาพิน

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการขยายสัญญาณแสงโดยใช้ระบบการขยายด้วยใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป สัญญาณแสงที่ต้องการขยายความยาวคลื่นตรงกลาง 1550 นาโนเมตร ซึ่งจะป้อนเข้าไปในคู่ควบใยแก้วนำแสงโหมดเดียว 2x1 ตรงปลายจะเชื่อมต่อกับใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดปยาว 10 เมตร และปั๊มด้วยเลเซอร์จากภายนอกที่ความยาวคลื่นตรงกลาง 980 นาโนเมตร ที่กำลัง 100 mW ที่ปลายอีกข้างของใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดปเชื่อมต่อกับใยแก้วนำแสงไอโซเลเตอร์ก่อนที่จะไปถึงโฟโตดีเท็คเตอร์ ผลจากการศึกษาคุณลักษณะของระบบในการขยายสัญญาณแสงพบว่าได้อัตราขยายสูงสุด 20 dB ซึ่งการเชื่อมต่อกับออปติคัลไอโซเลเตอร์สามารถตัดสัญญาณแสงย้อนกลับได้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการขยายสัญญาณแสง ระบบมีอัตราขยายมีแนวโน้มคงที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 1540-1565 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการขยายสัญญาณแสงอินพุตที่มีการมอดูเลต พบว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้มีความถี่เท่ากับสัญญาณอินพุตและมีขนาดเพิ่มขึ้น เราสามารถนำเทคนิคในการขยายสัญญาณระบบนี้ ไปเป็นอุปกรณ์ในการขยายสัญญาณในงานด้านการสื่อสารด้วยแสงได้

Thesis Title	A Study of Erbium-Doped Fiber Amplifier Characteristics and Applications.
Student	Wanchai Khunnam
Student ID	43065001
Degree	Master of Science
Programme	Applied Physics
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Preecha Yupapin

ABSTRACT

This research is the study of an optical amplifier characteristic using Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA) system. The input laser source with a center wavelength at 1550 nm is launched into a 2x1 single mode fiber coupler connecting to 10 meters erbium doped fiber. Then it is pumped by an external laser source with pumping power and center wavelength at 100 mw and 980 nm respectively. The output erbium doped fiber end is connected to a single mode fiber isolator before launching into a photo-detector. Results have shown such a system can be used to utilize the optical amplifier characteristic study, where the amplifier maximum gain of 20 dB is observed, and also can be increased by connecting the optical isolator. The optical feedback can be neglected by using the optical isolators along transmission line, where the amplifier gain flatness occurs from the output wavelength 1540 to 1565 nm. The frequency stabilized can also be obtained when modulated input signal is injected into base-band signal, then this principle and technique can be used to characterize the optical devices for optical communication.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอุปการะคุณเป็นอย่างดีจาก รศ.ดร.ปรีชา ยุพาพิน อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้คำปรึกษา ให้ความรู้ และแนะนำแนวทางในการดำเนินงานวิจัยเป็นอย่างดี รวมทั้งให้ความอนุเคราะห์จัดหาอุปกรณ์และงบประมาณในการดำเนินงานวิจัย ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของท่านเป็นที่สุด ขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ พี่ๆ เพื่อน ๆ และน้องๆ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ทุกคน และสมาชิกทุกคนใน ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีคลื่นและแสง ที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ และกำลังใจ ในสิ่งต่างๆมากมายเกินกว่าที่จะกล่าวได้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติ พี่ น้อง ที่ให้การสนับสนุน รวมทั้งทุกท่าน ที่มีความปรารถนาดีมอบให้ข้าพเจ้าคอยให้กำลังใจและคำชี้แนะที่ดีในชีวิตแก่ข้าพเจ้าตลอดมาคุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้แด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

วันชัย ขันนาม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง..... VIII

สารบัญรูป.....IX

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....3

1.5 การดำเนินงานวิจัย.....3

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....4

2.1 ใยแก้วนำแสง (Fiber optics).....4

2.1.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของใยแก้วนำแสง.....4

2.1.2 มุมรองรับแสง (Acceptance angle).....5

2.1.3 ลักษณะของแสงที่แพร่กระจายในใยแก้วนำแสง.....6

(Light Propagation in Fiber Optic)

2.2 การเดินทางของแสงในใยแก้วนำแสง.....7

2.2.1 อินเดกซ์โปรไฟล์.....7

2.2.2 นิวเมอริคัลอเปอร์เจอร์.....10

2.2.3 ความถี่นอร์มัลไลซ์.....11

2.3 การกระเจิงของแสง.....12

2.3.1 การกระเจิงแบบเรย์ลี (Rayleigh Scattering).....12

2.3.2 การกระเจิงแบบบริลรูอิน (Brillouin Scattering).....13

2.4 หลักการกำเนิดแสงของเลเซอร์.....13

2.5 อัตราการขยายแสง.....15

2.6 การขยายสัญญาณแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสง.....17

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.6.1 การขยายสัญญาณแบบรามาน.....17

2.6.2 การขยายสัญญาณโดยใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป.....20

2.7 การขยายสัญญาณแบบ 3 ระดับพลังงานของใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป.....22

2.7.1 อัตราขยายสัญญาณน้อยสุด.....26

2.7.2 ขอบเขตของการอิ่มตัว.....28

2.7.3 ความยาวของใยแก้วที่ทำให้ได้อัตราขยายสูงสุด.....29

2.8 การขยายสัญญาณแบบ 2 ระดับพลังงานของใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป.....30

2.9 การกระจายในใยแก้วนำแสง.....32

2.9.1 การกระจายเชิงวัสดุ.....32

2.9.2 การกระจายท่อนำคลื่น.....35

2.10 การลดทอน.....36

2.10.1 การดูดกลืนของวัสดุ.....37

2.10.2 การดูดกลืนจากภายนอก..... 37

2.10.3 การสูญเสียจากการโค้งงอ.....38

2.10.4 การลดทอนรวม.....40

2.10.5 การลดทอนและวัสดุใยแก้วนำแสง.....40

2.11 เลเซอร์ไดโอด.....41

2.11.1 เลเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำ.....41

2.11.2 เลเซอร์ไดโอดชนิดควอนตัมเวลส์.....43

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....45

3.1 อุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย.....45

3.1.1 ออปติคัลไอโซเลเตอร์ (Optical Isolator).....45

3.1.2 ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป.....46

3.1.3 คู่ควบใยแก้วนำแสง (Fiber Optic Coupler).....47

3.1.4 เครื่องเชื่อมต่อใยแก้วนำแสง(Fusion Splicer).....48

3.1.5 เลเซอร์ 980 nm.....48

3.1.6 โมโนโครมาเตอร์(Monochromator).....50

3.1.7 มิเตอร์วัดกำลังแสง.....51

3.1.8 โฟโตดีเท็คเตอร์ 52

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.1.9 อุปกรณ์อื่นๆ.....53

3.2 วิธีการเชื่อมต่อใยแก้วนำแสง.....54

3.2.1วิธีการเชื่อมต่อแบบหลอมรวม.....54

3.2.2 การเชื่อมต่อด้วยหัวเชื่อมตัว(Connector).....57

3.3 การออกแบบและการสร้างระบบ.....58

3.3.1 การเตรียมเส้นใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป.....59

3.3.1 วิธีการในการติดตั้งระบบ.....59

บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัยและวิเคราะห์ผล.....63

4.1 ระบบการขยายสัญญาณแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป.....63

4.2 ผลการวัดและการคำนวณค่าคุณลักษณะของระบบการขยายสัญญาณแสง.....64

4.2.1ผลการวัดกำลังของสัญญาณแสงเอาต์พุตเทียบกับกำลังของ
สัญญาณแสงอินพุต.....65

4.1.2 ผลของอัตราขยายสัญญาณ(Gain) เทียบกับกำลังของสัญญาณแสงอินพุต...66

4.2.3 ผลการวัดกำลังของสัญญาณแสงเอาต์พุตเทียบกับกำลังของเลเซอร์ปั๊ม.....69

4.2.4 ผลของอัตราขยายสัญญาณ(Gain) เทียบกับกำลังของเลเซอร์ปั๊ม.....71

4.2.5 ผลการวัดกำลังของสัญญาณแสงเอาต์พุตเทียบกับความยาวคลื่น.....73

4.2.6 ผลของอัตราขยายสัญญาณ(Gain) เทียบกับความยาวคลื่น.....75

4.2.7 การคำนวณค่าประสิทธิภาพในการแปลงกำลัง.....77
(Power Conversion Efficiency, PCE)

4.2.8 การคำนวณค่าประสิทธิภาพในการแปลงทางควอนตัม.....79
(Quantum Conversion Efficiency, QCE)

4.2.9 ผลการขยายสัญญาณแสงที่มีการมอดูเลต.....81

บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....82

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย.....82

5.2 ข้อเสนอแนะ.....83

5.3 แนวทางในการวิจัยและพัฒนา.....84

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

เอกสารอ้างอิง.....85

ภาคผนวก.....86

ประวัติผู้เขียน.....96

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 แสดงการเปรียบเทียบการสัญญาณแสงแบบรามานและแบบใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป..19

2.2 การสูญเสียจากการดูดกลืนและความยาวคลื่นต่างๆของสารเจือปน.....38

3.1 แสดงรายละเอียดของคู่ควบใยแก้วนำแสง.....48

3.2 แสดงรายละเอียดของเลเซอร์ 980 nm.....49

3.3 แสดงรายละเอียดของมิเตอร์วัดกำลังแสง.....51

4.1 แสดงกำลังของสัญญาณแสงเอาต์พุตเทียบกับกำลังของสัญญาณแสงอินพุต.....64

4.2 แสดงอัตราขยายสัญญาณ(Gain) เทียบกับกำลังของสัญญาณแสงอินพุต.....67

4.3 แสดงกำลังของสัญญาณแสงเอาต์พุตเทียบกับกำลังของเลเซอร์ปั๊ม.....69

4.4 แสดงอัตราขยายสัญญาณ(Gain) เทียบกับกำลังของเลเซอร์ปั๊ม.....71

4.5 แสดงกำลังของสัญญาณแสงเอาต์พุตเทียบกับความยาวคลื่น.....73

4.6 แสดงอัตราขยายสัญญาณ(Gain) เทียบกับความยาวคลื่น.....75

4.7 แสดงค่าประสิทธิภาพในการแปลงกำลัง (PCE).....77

4.8 ค่าประสิทธิภาพในการแปลงทางควอนตัม (QCE).....79

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 แสดงส่วนประกอบของใยแก้วนำแสงคือ แกน แคลดดิ่ง และส่วนห่อหุ้มชั้นนอก.....5
2.2 แสดงมุมรองรับแสงและกรวยรองรับแสงของใยแก้วนำแสง.....5
2.3 แสดงลักษณะของแสงที่แพร่กระจายในใยแก้วนำแสง.....6
2.4 แสดงโหมดของการแพร่กระจายของแสงในใยแก้วนำแสง.....7
2.5 แสดงอินเดกซ์โปรไฟล์ของแกนใยแก้วนำแสง.....8
2.6 ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวขั้นบันได.....9
2.7 ใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดสเตปอินเดกซ์.....10
2.8 ใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดเกรดอินเดกซ์.....10
2.9 แสดงการกระเจิงของแสงแบบเรย์ลี.....12
2.10 แสดงตัวอย่างการกระเจิงแบบบริวรูอิน.....13
2.11 แสดงการเกิดอันตรกริยาของแสงกับวัตถุเมื่อมีการดูดกลืนแสงและการแผ่แสง.....14
2.12 แสดงการปั๊มแบบหลายระดับ.....14
2.13 การลดทอนของแสงเนื่องจากถูกวัสดุดูดกลืน.....15
2.14 การขยายขนาดของสัญญาณแสงในวัสดุตัวกลางกำเนิดเลเซอร์.....16
2.15 วิธีการพิจารณาหาค่าอัตราการขยายแสง.....16
2.16 แสดงไดอะแกรมระดับพลังงานที่เกิดในแกนของใยแก้วนำแสง.....17
2.17 แสดงการขยายสัญญาณทางแสง.....20
2.18 แสดงอุปกรณ์ในการขยายสัญญาณแสงลักษณะต่างๆ.....21
2.19 แสดงระดับพลังงานของเออร์เบียม.....22
2.20 แสดงระดับพลังงานของการขยายแบบ 3 ระดับ.....22
2.21 แสดงสัดส่วนของประชากรผกผัน $((N_2-N_1)/N)$.....25
2.22 แสดงเกณฑ์ขยายที่ความยาวคลื่น 1550 nm สัญญาณอินพุต -40 dBm.....29
2.23 แสดงความยาวของใยแก้วที่ได้เกณฑ์ขยายสูงสุด ความยาวคลื่น 1550 nm สัญญาณอินพุต...30
-40 dBm และ -15 dBm ได้จากการจำลองโดยใช้วิธีนิวเมอร์ริคอลใช้ปั๊มความยาวคลื่น 980 nm
2.24 แสดงระดับพลังงานที่มีระดับพลังงานข้างเคียง(Multiplet System) แบบ 2 ระดับ.....30
2.25 แสดงการเกิดการกระจายของพัลส์สัญญาณแบบต่างๆ.....33
2.26 แสดงสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง.....33
2.27 แสดงการเกิดกระจายของพัลส์.....34

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.28 แสดงการเกิดการกระจายเชิงวัสดุ.....35

2.29 แสดงลักษณะการกระจายในนำคลื่น.....35

2.30 แสดงมุมตกกระทบและทางเดินของแสง.....36

2.31 แสดงการลดทอนของแสงในใยแก้วนำแสงสัมพันธ์กับความยาวคลื่น.....37

2.32 แสดงการดูดกลืนจากไฮดรอกซิล.....38

2.33 แสดงทางเดินของแสงในใยแก้วนำแสงที่โค้งงอ.....39

2.34 ลักษณะแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่โดปสารเจือปนด้วยความเข้มข้นสูงมาก.....42

2.35 รอยต่อพีเอ็นที่โดปสารเจือปนด้วยความเข้มข้นสูงมาก.....42

2.36 รอยต่อพีเอ็นที่กำเนิดแสงเลเซอร์ในเลเซอร์ไดโอด.....42

2.37 ลักษณะสมบัติของความสัมพันธ์ของความเข้มแสงและกระแสไฟฟ้าในเลเซอร์ไดโอด.....43

2.38 แสดงแถบพลังงานของเลเซอร์ไดโอดที่มีชั้นแอคทิฟเป็นควันตัมเวลส์แบบต่างๆ.....44

3.1 แสดงโครงสร้างของไอโซเลเตอร์.....45

3.2 แสดงใยแก้วนำแสงไอโซเลเตอร์.....46

3.3 แสดงใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป.....47

3.4 แสดงคู่ควบใยแก้วนำแสง 1x2 47

3.5 แสดงเครื่องเชื่อมต่อใยแก้วนำแสง(Fusion Splicer).....48

3.6 แสดงเลเซอร์ ปั๊มโมดูลความยาวคลื่น 980 nm และชุดใยแก้วนำแสง(Fiber optic pigtail).....49

3.7 แสดงไดอะแกรมของโมโนโครมาเตอร์.....50

3.8 แสดงโมโนโครมาเตอร์.....50

3.9 แสดงมิเตอร์วัดกำลังแสง.....52

3.10 แสดงโฟโตดีเท็คเตอร์รุ่น 818-SL(Newport).....52

3.11 แสดงโฟโตดีเท็คเตอร์รุ่น MA9723A (Anrisu).....53

3.12 แสดงการปอกใยแก้วนำแสง.....54

3.13 แสดงการตัดใยแก้วนำแสง.....54

3.14 แสดงการสวมสะลีฟเข้าไปที่ใยแก้วนำแสง.....55

3.15 แสดงการติดตั้งใยแก้วนำแสงบนเครื่องเชื่อมต่อ.....55

3.16 แสดงการกดปุ่ม ARC และการหลอมรวมของใยแก้วนำแสง.....56

3.17 แสดงการให้ความร้อนกับสะลีฟให้ติดกับใยแก้วนำแสง.....56

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.18 แสดงใยแก้วนำแสงที่ได้หลังจากการเชื่อมต่อแบบหลอมรวม.....57
3.19 แสดงการวางตัวของใยแก้วนำแสงของหัวเชื่อมต่อ.....57
3.20 แสดงไดอะแกรมของระบบการขยายสัญญาณแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป.....58
3.21 แสดงการติดตั้งเลเซอร์ 1550 nm บนชุดไมโครบล็อก.....59
3.22 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างไอโซเลเตอร์กับคู่ควบใยแก้วนำแสง.....60
3.23 แสดงการเชื่อมต่อเลเซอร์ปั๊มความยาวคลื่น 980 นาโนเมตรกับคู่ควบใยแก้วนำแสง.....60
2.24 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างคู่ควบกับ EDF และ ระหว่าง EDF กับ ไอโซเลเตอร์.....61
3.25 แสดงการติดตั้งโฟโตดีเท็คเตอร์.....61
2.26 แสดงการติดตั้งโมโนโครมาเตอร์.....62
4.1 แสดงระบบขยายสัญญาณแสงโดยใช้ใยแก้นำแสงเออร์เบียมโดป.....63
4.2 แสดงกราฟกำลังของสัญญาณแสงเอาต์พุตเทียบกับกำลังของสัญญาณแสงอินพุต.....65
4.3 แสดงกราฟอัตราขยายสัญญาณ(Gain) เทียบกับกำลังของสัญญาณแสงอินพุต.....68
4.4 แสดงกราฟกำลังของสัญญาณแสงเอาต์พุตเทียบกับกำลังของเลเซอร์ปั๊ม.....70
4.5 แสดงกราฟระหว่างอัตราขยายสัญญาณ(Gain) เทียบกับกำลังของเลเซอร์ปั๊ม.....72
4.6 แสดงกราฟระหว่างกำลังของสัญญาณแสงเอาต์พุตเทียบกับความยาวคลื่น.....74
4.7 แสดงกราฟระหว่างอัตราขยายสัญญาณ(Gain) เทียบกับความยาวคลื่น.....76
4.8 แสดงกราฟระหว่างค่า PCE และกำลังแสงเอาต์พุต.....78
4.9 แสดงกราฟระหว่างค่าประสิทธิภาพการแปลงทางควอนตัมกับกำลังของสัญญาณแสงอินพุต..80
4.10 แสดงสัญญาณแสงอินพุตที่มีการมอดูเลต.....81
4.11 แสดงสัญญาณแสงเอาต์พุตที่มีการมอดูเลต.....81

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความสำคัญและที่มาของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการดำเนินงานวิจัย และขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย ซึ่งจะกล่าวเรียงตามลำดับหัวข้อดังนี้

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านการสื่อสารได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว การสื่อสารด้วยแสงก็ได้มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายเนื่องมาจากผลดีและความเหมาะสมกับการใช้งาน และราคาอุปกรณ์สื่อสารทางแสงก็ถูกลง เมื่อกล่าวถึงอุปกรณ์ในการสื่อสารในระยะใกล้ๆสิ่งที่ขาดไม่ได้คืออุปกรณ์ในการทวนสัญญาณ การส่งสัญญาณแสงไปในใยแก้วนำแสงในระยะทางไกลๆสัญญาณแสงจะมีขนาดลดลง เพื่อให้สามารถส่งสัญญาณไปได้จึงต้องมีระบบขยายสัญญาณ การขยายสัญญาณทางแสงจะสามารถแบ่งได้สองประเภทคือแบบที่เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และแบบที่เป็นการขยายเชิงแสง การขยายโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ [1] ซึ่งกระบวนการในการขยายคือจะมีการแปลงสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วทำการขยายสัญญาณไฟฟ้าด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นก็จะแปลงสัญญาณไฟฟ้าที่ขยายได้เป็นสัญญาณแสงแล้วส่งกลับเข้าไปยังใยแก้วนำแสง ปัญหาของการขยายสัญญาณแบบนี้คือมีข้อจำกัดทางด้านแบนวิดท์ และมีการสูญเสียกำลังแสงเนื่องจากการเชื่อมต่อที่สูง การขยายสัญญาณที่เป็นเชิงแสงโดยตรงนั้นเป็นที่นิยมใช้ในระบบสื่อสารทางแสงนั้นมีอยู่สองแบบคือ การขยายแบบรามาน (Raman Amplifier) และการขยายโดยใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป (Erbium-Doped Fiber Amplifier; EDFA) การขยายแบบรามาน [2,3] เป็นการขยายสัญญาณแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสงซึ่งใช้หลักการในการทำให้เกิดการกระเจิงแบบเรลีย์ (Rayleigh Scattering) ของอิเล็กตรอนในใยแก้วนำแสง ซึ่งจะต้องมีการปั๊มด้วยเลเซอร์ที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสมแล้วทำให้เกิดการกระเจิงของอิเล็กตรอน จะเป็นการทำให้เกิดประชากรผกผันขึ้นในระบบ การขยายก็จะเกิดขึ้นเมื่อมีสัญญาณแสงเข้ามาในระบบ จะทำให้เกิดกำลังแสงเพิ่มขึ้นด้วยกระบวนการที่เรียกว่า " Stimulated Raman Scattering " ความยาวคลื่นในการขยายจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ปั๊ม อัตราการขยายสัญญาณจะต่ำกว่าการขยายโดยใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป ในงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาการขยายสัญญาณแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป ในปี ค.ศ. 1983 ที่เบลเทเลโฟนแลป(Bell Telephon Laboratory) โดยนายบอร์ นายซิมซั่นและนายคาวอร์เกอร์ (Borer, Simpson and Coworker) [4]ได้เริ่มมีการทดลองโดปธาตุกลุ่มแรเอิร์ท(Rare Earth) ในใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดียวซึ่งได้ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานการทางกายภาพนำมาสู่การพัฒนามาเป็นใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดปเพื่อใช้ในการขยายสัญญาณแสงเกิดขึ้นในปี

ค.ศ. 1987 ที่มหาวิทยาลัยเซาท์แทมตัน สหรัฐอเมริกาและ AT&T ซึ่งพบว่าเกิดการขยายสัญญาณแสงที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร เนื่องมาจากคุณสมบัติของเออร์เบียมที่มีแถบพลังงานตรงกับความยาวคลื่นที่ใช้ระบบการสื่อสารทางแสง[5,6] กระบวนการขยายคือการทำให้เกิดเลเซอร์ที่ความยาวคลื่นของสัญญาณที่ต้องการขยาย ซึ่งต้องมีการปั๊มด้วยเลเซอร์โดยจะสามารถใช้ได้ที่สองความยาวคลื่นคือ ความยาวคลื่น 980 นาโนเมตร จะทำให้เกิดการขยายแบบสามระดับพลังงาน และที่ความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตรจะทำให้เกิดการขยายแบบสองระดับพลังงาน ในงานวิจัยนี้จะใช้ปั๊มด้วยเลเซอร์ที่ความยาวคลื่น 980 นาโนเมตร ซึ่งจะทำให้ระบบเกิดประชากรผกผันคือที่ระดับพลังงานสูงจะมีจำนวนอิเล็กตรอนมากกว่าที่สถานะพื้น เมื่อมีสัญญาณแสงที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร เข้ามาในระบบจะทำให้เกิดการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานกลับมาที่สถานะพื้นแล้วทำให้เกิดการปล่อยคลื่นแสงออกมาทำให้แสงที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร มีความเข้มแสงมากขึ้น นั้นคือเกิดการขยายสัญญาณแสงขึ้น ซึ่งมีประสิทธิภาพและอัตราขยายดีกว่าแบบรามาน การขยายสัญญาณที่เป็นระบบทางแสงโดยตรงจึงเป็นสิ่งที่ดีกว่าระบบที่เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ การขยายสัญญาณโดยใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดี ซึ่งมีหลักการทำงานที่น่าสนใจเพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการทำงานที่ลึกซึ้ง เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเพื่อให้สามารถนำไปสู่การสร้างอุปกรณ์ในการขยายสัญญาณทางแสงเพื่อนำมาใช้งาน และเป็นผลในเชิงการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆสำหรับประเทศต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อเป็นการศึกษาหลักการทำงานของการขยายสัญญาณแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป

1.2.2 เพื่อศึกษาเทคนิคและวิธีการในการสร้างระบบการขยายสัญญาณแสงใยแก้วนำแสง

1.2.3 เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในการขยายสัญญาณแสง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาหลักการทำงานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการขยายสัญญาณแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป

1.2.2 ศึกษาการออกแบบและทดลองการขยายสัญญาณโดยใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป

1.2.3 ศึกษาการประยุกต์ใช้งานการขยายสัญญาณโดยใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดปทางด้านการสื่อสาร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เข้าใจหลักการทำงานของการขยายสัญญาณแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป

1.4.2 ได้ทักษะในการใช้อุปกรณ์ทางด้านใยแก้วนำแสง

1.4.3 เรียนรู้เทคนิคและวิธีการในการสื่อสารด้วยระบบใยแก้วนำแสง

1.4.4 พัฒนาความรู้ความสามารถของผู้วิจัย

1.4.5 สามารถนำไปประยุกต์ในการขยายสัญญาณแสงในระบบการสื่อสารทางแสงได้

1.5 การดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยเริ่มจากการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีในการเกิดเลเซอร์ หลักการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับใยแก้วนำแสง ทฤษฎีของกระบวนการที่ทำให้เกิดการขยายสัญญาณในใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป รวมไปถึงอุปกรณ์ที่ใช้งานในระบบการขยายสัญญาณแสง จากนั้นทำการออกแบบระบบในการทดลองและทำการจัดซื้อและเตรียมอุปกรณ์ ต่างๆที่เกี่ยวข้อง ทำการเชื่อมต่อระบบในส่วนต่างๆ ซึ่งจะมีทั้งส่วนที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์และส่วนที่เป็นใยแก้วนำแสงซึ่งต้องเชื่อมต่อแบบหลอมรวมหรือใช้หัวต่อ ทำการทดลองเพื่อหากำลังแสงเอาต์พุตและอัตราขยายของระบบขยายสัญญาณแสงที่สร้างขึ้นมา และทำการทดลองกับการขยายสัญญาณที่มีการมอดูเลตซึ่งเป็นการประยุกต์เพื่อใช้ในระบบการสื่อสาร

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของใยแก้วนำแสง การเกิดเลเซอร์ การกระเจิงของแสง (Scattering of light) ที่เกี่ยวข้องหลักการในการขยายสัญญาณแสง กระบวนการในการขยายสัญญาณแสงที่เกิดขึ้นในใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป กล่าวถึงอัตราขยาย ขอบเขตของการอิ่มตัวของระบบ และหลักการต่างๆที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะกล่าวตามลำดับดังนี้

2.1 ใยแก้วนำแสง (Fiber optics)

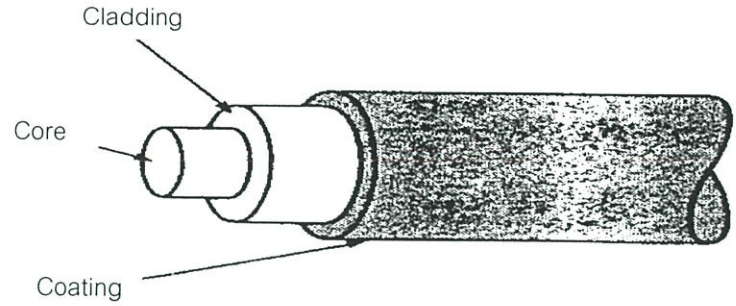
2.1.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของใยแก้วนำแสง

ส่วนประกอบที่สำคัญของใยแก้วนำแสงแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 แบ่งเป็น 3 ส่วนคือ

แกน (Core) เป็นส่วนที่อยู่ในสุดและเป็นส่วนแกนของใยแก้วนำแสง ส่วนใหญ่จะเดินทางในส่วนนี้ โดยทั่วไปแกนจะมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.48 ซึ่งมากกว่าส่วนที่เป็นแคลดดิง เพราะต้องคำนึงถึงกฎการหักเหและการสะท้อนกลับหมดภายในของแสงที่เดินทางอยู่ในแกน ส่วนขนาดของแกนจะขึ้นอยู่กับชนิดของใยแก้วนำแสง โดยใยแก้วนำแสงโหมดเดียวจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนประมาณ 2-10 μm ส่วนใยแก้วนำแสงหลายโหมดจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนประมาณ 50 μm

แคลดดิง (Cladding) จะอยู่ถัดจากแกนออกมาเป็นส่วนห่อหุ้มแกนอีกชั้นหนึ่ง โดยทั่วไปมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.46 แคลดดิงเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดภายใน ทำให้แสงยังคงเดินทางในแกนของใยแก้วนำแสงได้ นอกจากนี้แคลดดิงยังเป็นส่วนป้องกันไม่ให้แสงจากภายนอกเข้าสู่ใยแก้วนำแสงและกันแสงจากใยแก้วนำแสงออกสู่ภายนอก ขนาดของแคลดดิงจะขึ้นอยู่กับชนิดของใยแก้วนำแสง

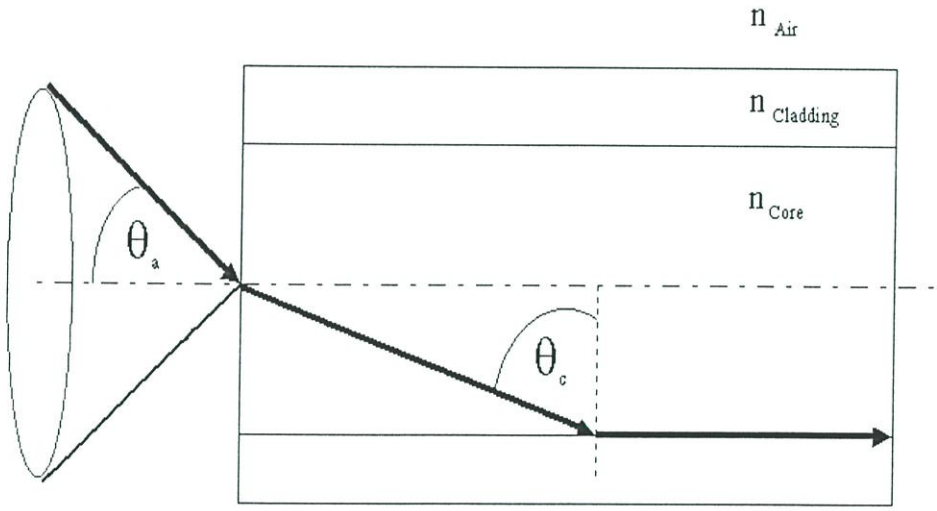
ส่วนป้องกัน (Coating) เป็นส่วนที่ป้องกันแสงจากภายนอกเข้าสู่ใยแก้วนำแสงและป้องกันแสงจากใยแก้วนำแสงออกสู่ภายนอก นอกจากนี้ยังเป็นส่วนห่อหุ้มใยแก้วนำแสงไม่ให้ได้รับความเสียหายจากสิ่งแวดล้อมภายนอก ใยแก้วนำแสงบางชนิดจะมีส่วนห่อหุ้มชั้นนอกหลายชั้น ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของการนำไปใช้งาน



รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของใยแก้วนำแสงคือ แกน แคลดดิ้ง และส่วนห่อหุ้มชั้นนอก

2.1.2 มุมรองรับแสง (Acceptance angle)

มุมรองรับแสง ($2\theta_a$) คือ มุมที่ฉายแสงเข้าไปยังแกนของใยแก้วนำแสงแล้วทำให้แสงที่ตกกระทบที่ผิวรอยต่อระหว่างแกนกับแคลดดิง มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับมุมวิกฤต เป็นผลทำให้แสงสามารถเดินทางภายในแกนของใยแก้วนำแสงได้ ถ้ามองในลักษณะ 3 มิติ มุมรองรับแสงก็คือ กรวยรองรับแสง (Acceptance cone) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงมุมรองรับแสงและกรวยรองรับแสงของใยแก้วนำแสง

$$\theta_a = \sin^{-1}\left(\sqrt{n_{Core}^2 - n_{Cladding}^2}\right) \qquad (2.1)$$

เมื่อ

n_{Air} คือ ดัชนีหักเหของอากาศ

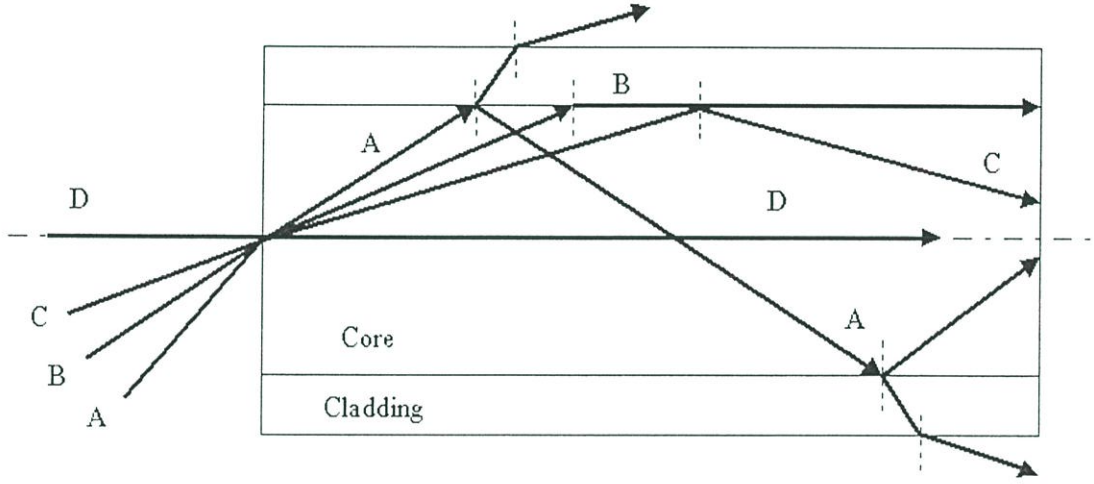
$n_{Cladding}$ คือ ดัชนีหักเหของแคลดดิง

n_{Core} คือ ดัชนีหักเหของแกน

จากสมการที่ 2.1 จะเห็นว่ามุมรองรับแสง ($2\theta_a$) ขึ้นอยู่กับผลต่างของค่าดัชนีหักเหระหว่างแกนกับแคลดดิงใยแก้วนำแสงที่มีผลต่างของค่าดัชนีหักเหระหว่างแกนกับแคลดดิงมากจะทำให้มีมุมรองรับแสงมากนั่นคือ สามารถป้อนแสงเข้าสู่แกนของใยแก้วนำแสงได้มาก

2.1.3 ลักษณะของแสงที่แพร่กระจายในใยแก้วนำแสง(Light Propagation in Fiber Optic)

ลักษณะของแสงที่แพร่กระจายในใยแก้วนำแสงส่วนใหญ่จะมีอยู่ 3 ลักษณะ ดังรูปที่ 2.3



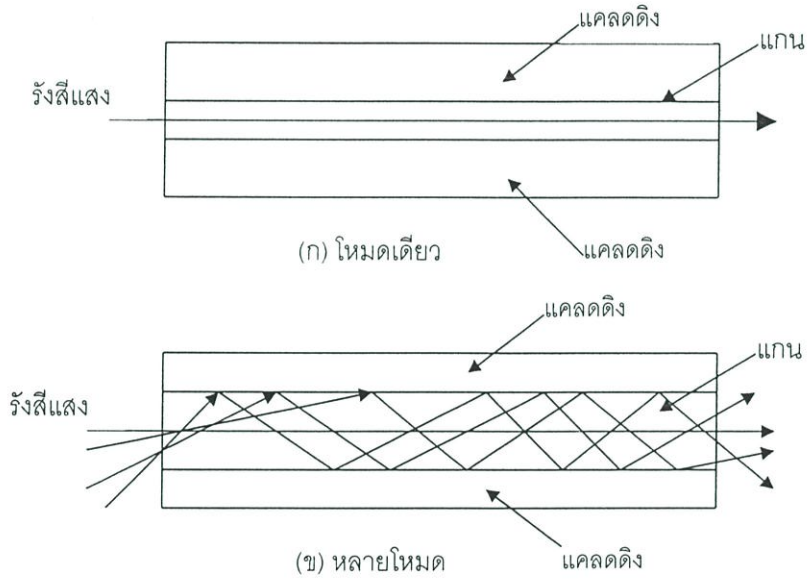
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของแสงที่แพร่กระจายในใยแก้วนำแสง

จากรูปที่ 2.3 ลักษณะของแสงที่แพร่กระจายในใยแก้วนำแสงมีอยู่ 3 ลักษณะคือ ลำแสง A จะมีมุมตกกระทบมากกว่ามุมรองรับแสง ($2\theta_a$) ของใยแก้วนำแสง เมื่อลำแสง A หักเหเข้าไปยังแกนจะมีมุมหักเหมาก เมื่อลำแสง A ตกกระทบที่ผิวรอยต่อระหว่างแกน(Core) กับแคลดดิง(Cladding) จะมีมุมตกกระทบน้อยกว่ามุมวิกฤต ทำให้มีแสงส่วนหนึ่งสะท้อนกลับมายังแกนและแสงอีกส่วนหนึ่งหักเหเข้าไปยังแคลดดิงซึ่งแสงส่วนนี้อาจจะสะท้อนที่ผิวนอกของแคลดดิงกลับเข้ามายังแกนอีกหรืออาจมีแสงบางส่วนหักเหออกไปภายนอกใยแก้วนำแสง ซึ่งในกรณีนี้ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานของแสงที่แพร่กระจายในใยแก้วนำแสง ลำแสง B จะมีมุมตกกระทบเท่ากับมุมรองรับแสง เมื่อลำแสง B หักเหเข้าไปยังแกนลำแสงส่วนที่ตกกระทบที่ผิวรอยต่อระหว่างแกนกับแคลดดิงจะมีมุม ตกกระทบเท่ากับมุมวิกฤติ ทำให้ไม่มีแสงหักเหเข้าไปยังแคลดดิงลำแสง B ส่วนใหญ่จึงเดินทางขนานไปกับผิวรอยต่อระหว่างแกนกับแคลดดิงลำแสง C จะมีมุมตกกระทบน้อยกว่ามุมรองรับแสง เมื่อลำแสง C หักเหเข้าไปยังแกนจะทำให้ลำแสง C ที่ตกกระทบที่ผิวรอยต่อระหว่างแกนกับแคลดดิงมีมุมตกกระทบมากกว่ามุมวิกฤติ ทำให้ลำแสง C ทั้งหมดเดินทางอยู่ภายในแกนของใยแก้วนำแสง ส่วนลำแสง D จะเป็นลำแสงที่ถูกฉายเข้าไปยังแกนโดยตรง (มุมตกกระทบเท่ากับศูนย์) ทำให้

ลำแสง D ทั้งหมดเดินทางขนานไปกับแนวแกนกลางของใยแก้วนำแสง ลักษณะการแพร่กระจายของลำแสง C และ D จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานของแสงน้อยที่สุด

2.2 การเดินทางของแสงในใยแก้วนำแสง

แสงสามารถแพร่กระจายเข้าไปในใยแก้วได้โดยการสะท้อนหรือการหักเหแสง กล่าวคือ แสงจะแพร่กระจายอย่างไรขึ้นอยู่กับโหมดของการแพร่กระจายและรูปแบบของดัชนีหักเห โหมดการแพร่กระจาย หรือโหมด หมายถึงทางเดิน (Path) ของแสงนั่นเอง ถ้าทางเดินของแสงมีเพียงทางเดียวที่ทำให้แสงแพร่กระจายไปในใยแก้วนำแสงได้เรียกโหมดเดียว (Single Mode) ถ้ามีทางเดินของแสงหลายๆ ทาง เรียกว่า มัลติโหมด (Multimode) หรือหลายโหมด รูปที่ 2.4 แสดงการกระจายของแสงเข้าไปในใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดียวและแบบหลายโหมด

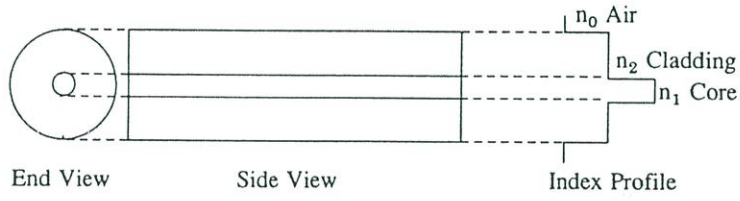


รูปที่ 2.4 แสดงโหมดของการแพร่กระจายของแสงในใยแก้วนำแสง

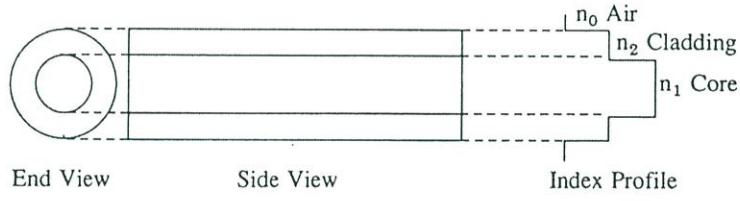
2.2.1 อินเดกซ์โปรไฟล์

อินเดกซ์โปรไฟล์ (Index Profile) ของใยแก้วนำแสง จากรูปที่ 2.5 คือกราฟของความสัมพันธ์ของดัชนีหักเหของแกน(n_1) ของเส้นใยแก้วนำแสง โดยที่ดัชนีหักเหถูกเขียนบนแกนนอนและระยะห่างจากแกนของใยแก้วนำแสงอยู่ในแนวตั้ง อินเดกซ์โปรไฟล์ของใยแก้วนำแสงทั้งสามชนิด ซึ่งแสดงภาพจุดปลาย(End View) และภาพด้านข้าง (Side View)โดยทั่วไปใยแก้วนำแสงจะมีอินเดกซ์โปรไฟล์อยู่ 2 ประเภท คือ แบบสเตป(Step Index) และเกรดอินเดกซ์(Grad Index) หรือเรียกว่าแบบขั้นบันไดและแบบมนตามลำดับ โดยที่แบบสเตปอินเดกซ์จะมีดัชนีหักเหของแสงคงที่ตลอดเนื้อสารที่เป็นแกนและแคลดดิง โดยปกติดัชนีหักเหของแกนจะมีค่ามากกว่าดัชนีหักเหของ

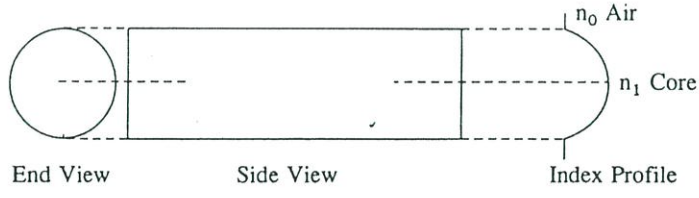
แคลดดิง(n_2) และของอากาศ(n_0) แนวทางเดินของแสงจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงสะท้อนไปมาตรงบริเวณรอยต่อระหว่างแกนกับแคลดดิงตามกฎของสเนลล์ ส่วนใยแก้วนำแสงแบบเกรดอินเดกซ์จะมีดัชนีหักเหของแกนเปลี่ยนแปลงไปตามแนวแกนของใยแก้ว โดยที่ตำแหน่งแนวศูนย์กลางของใยแก้วจะมีค่าดัชนีหักเหสูงสุดจากนั้นค่าดัชนีหักเหจะค่อยๆ ลดลงไปตามระยะที่ห่างออกจากแนวศูนย์กลาง จนมีค่าเท่ากับดัชนีหักเหของแคลดดิงในตำแหน่งที่แกนต่อกับแคลดดิงพอดี โครงสร้างของใยแก้วนำแสงโดยทั่วๆ ไป แบ่งออกเป็นประเภทตามโครงสร้างได้ 3 ประเภท คือ โหมดเดียว หลายโหมดสเตปอินเดกซ์ และหลายโหมดเกรดอินเดกซ์



(ก) โหมดเดียวขั้นบันได



(ข) หลายโหมดขั้นบันได

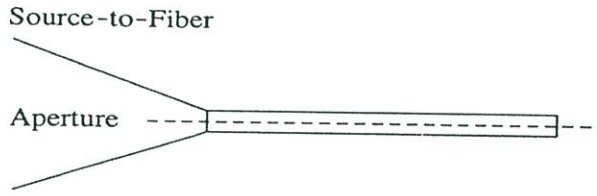


(ค) หลายโหมดแบบมน

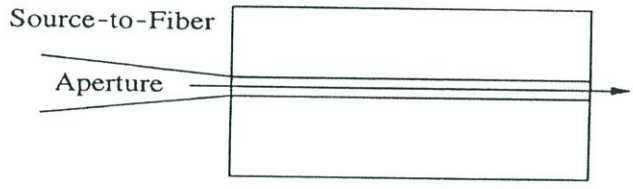
รูปที่ 2.5 แสดงอินเดกซ์โปรไฟล์ของแกนใยแก้วนำแสง

ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวสเตปอินเดกซ์มีแกนกลางขนาดเล็กมากจนแสงผ่านเข้าไปภายในได้เพียงทางเดียวเท่านั้น ใยแก้วนำแสงประเภทนี้แสดงในรูปที่ 2.6 รูปแบบอย่างง่ายที่สุดของใยแก้วนำแสงชนิดนี้ก็คือมีแกนเป็นแก้ว และแคลดดิงเป็นอากาศ ความแตกต่างของดัชนีหักเหของตัวกลางทั้งสองมีค่ามากทำให้มุมวิกฤต (ประมาณ 42^0) มีค่าน้อยที่รอยต่อระหว่างแก้วและอากาศ ผลทำให้ใยแก้วนำแสงมีมุมรับแสง(Aperture) เป็นมุมกว้าง ดังนั้นทำให้ง่ายต่อการส่งแสง

จากแหล่งกำเนิดแสง(Source to Fiber) เข้าไปในใยแก้วนำแสง อย่างไรก็ตามใยแก้วนำแสงชนิดนี้ง่ายต่อการแตกหักจึงมีข้อจำกัดในการนำมาใช้งาน ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวสเตปอินเดกซ์ที่เหมาะนำไปใช้งานคือใยแก้วนำแสงที่มีแกนเป็นแก้วและมีแคลดดิงที่ไม่ใช่อากาศ ค่าดัชนีหักเหของแคลดดิงมีค่าน้อยกว่าดัชนีหักเหของแกนเล็กน้อยและมีค่าเท่ากันตลอด ใยแก้วนำแสงชนิดนี้จะแข็งแรงกว่าชนิดที่มีอากาศเป็นแคลดดิงแต่มุมวิกฤตจะมีค่ามาก (ประมาณ 70^0) เป็นผลให้ใยแก้วมีมุมรับแสงแคบซึ่งทำให้ยากต่อการส่องแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเข้าไปในใยแก้วนำแสง



(ก) มีอากาศเป็นแคลดดิง

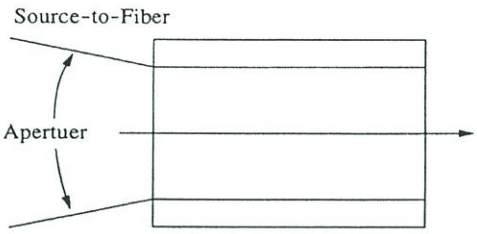


(ข) มีแก้วเป็นแคลดดิง

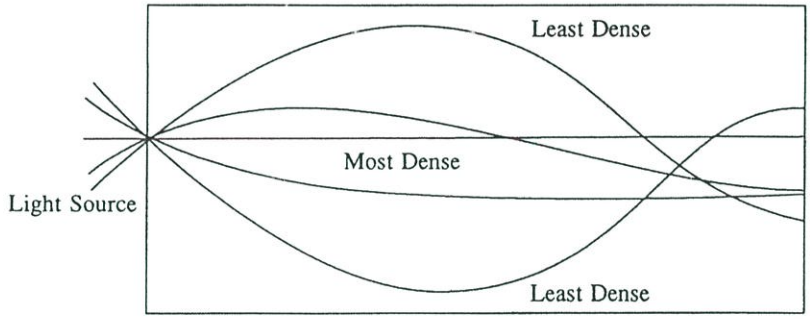
รูปที่ 2.6 ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวขั้นบันได

ใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเตปอินเดกซ์มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับโหมดเดียวแต่มีแกนใหญ่กว่า ดังรูปที่ 2.7 ใยแก้วนำแสงประเภทนี้จะมีมุมในการรับแสง(Aperture) ผ่านเข้าไปได้ง่ายขึ้น รังสีของแสง(Light Source)ที่กระทบรอยต่อของแกนและแคลดดิงที่มีมุมมากกว่ามุมวิกฤติจะผ่านเข้าไปในใยแก้วนำแสงโดยการสะท้อนกลับไปกลับมาทีรอยต่อทั้งสองเป็นรูปซิกแซ็ก รังสีของแสง ที่กระทบรอยต่อของแกนและแคลดดิงโดยมีมุมน้อยกว่ามุมวิกฤต จะผ่านเข้าไปในแคลดดิงแล้วหายไป จะเห็นได้ว่ามีหลายทางที่แสงเขาจะผ่านเข้าไปในใยแก้วนำแสง ซึ่งทำให้รังสีต่างๆ เดินทางผ่านใยแก้วนำแสงที่ความยาวหนึ่งในเวลาที่ไม่เท่ากัน จากรูปที่ 2.8 เป็นใยแก้วนำแสงหลายโหมดเกรดอินเดกซ์มีลักษณะของแกนที่มีดัชนีหักเหที่มีค่ามากที่สุดตรงจุดศูนย์กลางคือมีความหนาแน่นมากที่สุด(Most Dense) แล้วดัชนีหักเหจะลดลงไปตามแนวแกนรัศมี ที่ขอบจะมีความหนาแน่นน้อยสุด(Least Dense) เมื่อแสงผ่านเข้าไปในใยแก้วนำแสงโดยการหักเหมุมต่างๆ กัน แล้วทางเดินของแสงจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง รังสีของแสงด้านนอกสุดจะเดินทางด้วยระยะไกลกว่ารังสีของแสงที่อยู่ใกล้กับจุดศูนย์กลางของใยแก้วนำแสง เพราะว่าดัชนีหักเหลดลงตามแนวรัศมี

และความเร็วแปรผันเป็นส่วนกลับกับค่าดัชนีหักเห ดังนั้นรัศมีของแกนที่ห่างจากจุดศูนย์กลางมาก แสงจะมีความเร็วมากกว่าทำให้รังสีทุกๆ รังสีใช้เวลาในการเดินทางผ่านใยแก้วนำแสงเท่ากัน



รูปที่ 2.7 ใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดสเตปอินเดกซ์



รูปที่ 2.8 ใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดเกรดอินเดกซ์

2.2.2 นิวเมอริคัลอเปอร์เจอร์

จากรูปที่ 2.2 แสดงรูปตัดขวางของใยแก้วนำแสงชนิดดัชนีหักเหแบบขั้นบันไดที่ใช้ในการหานิวเมอริคัลอเปอร์เจอร์ (NA) จะเห็นว่ารูปกรวยของรังสีของแสงที่รับโดยใยแก้วนำแสงจะหาได้จากความแตกต่างของดัชนีหักเหของแกน(n_{core})และดัชนีหักเหของแคลดดิง($n_{Cladding}$) ส่วนของความแตกต่างของดัชนีหักเห(Δ)นี้นิยามโดยสมการที่ 2.2

$$\Delta = \left(n_{core} - n_{cladding}\right) / n_{core} \qquad (2.2)$$

จากนิยามของมุมวิกฤตนั้นสามารถจะหาขนาดของรูปกรวยของแสงที่จะรับโดยใยแก้วนำแสง รังสีตกกระทบที่รอยต่อของแกนและแคลดดิงที่มุมวิกฤต(θ_c) ถ้ามุมของกรวยเป็น θ_a และ n_a เป็นดัชนีหักเหของอากาศ จากกฎของสเนลล์จะได้

$$\sin\theta_c = n_{cladding} / n_{core} \qquad (2.3)$$

ดังนั้น $n_a \sin\theta_a = \sqrt{n^2_{core} - n^2_{cladding}}$ นิวเมอริคัลอเปอร์เจอร์ คือ การวัดว่าระบบของแสงว่าจะรับแสงได้มากน้อยเพียงใด ระบบของแสงอาจจะเป็นใยแก้วนำแสงหรือออปเจ็คทีฟเลนส์ (Objective Lense) หรือ โฟโตกราฟิกเลนส์ (Photographic Lense) NA คือผลคูณของค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่แสงตกกระทบกับค่า ไซน์ (sin) ของมุม θ_a ที่มากที่สุดคือ

$$NA = n_i \sin\theta_{max} \tag{2.4}$$

ส่วนมากแสงที่ตกกระทบจะมาจากอากาศ ดังนั้น $n_a = 1$ ในกรณีนิวเมอริคัลอเปอร์เจอร์ของใยแก้วนำแสงชนิดสเตปอินเดกซ์ คือ

$$NA = \sqrt{n^2_{core} - n^2_{cladding}} \tag{2.5}$$

เมื่อ $\Delta << 1$

$$\begin{aligned} NA &= \sqrt{(n_{core} - n_{cladding})(n_{core} + n_{cladding})} \\ &= \sqrt{(2n_{core}\Delta)(n_{core})} \\ &= n_{core}\sqrt{2\Delta} \end{aligned} \tag{2.6}$$

เงื่อนไขที่ $\Delta << 1$ เรียกว่า วีคลีไกด์ (Weakly-guide)

2.2.3 ความถี่นอร์มัลไลซ์ (V)

ในการหาจำนวนโหมดของการเคลื่อนที่ของคลื่นภายในเส้นใยแก้วนำแสง สามารถหาได้จากพารามิเตอร์ที่เรียกว่าความถี่นอร์มัลไลซ์หรือ V ดังสมการ

$$V = \left[\frac{2\pi a}{\lambda}\right] NA \tag{2.7}$$

เมื่อ a เป็นรัศมีของแกน λ เป็นความยาวคลื่นของแสง จะเห็นได้ว่าขนาดของแกนภายในเส้นใยแก้วนำแสงนั้นมีความสัมพันธ์กับค่า NA และ V โดยทราบแล้วว่าแกนของเส้นใยนำแสงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าจะมีค่า NA มากกว่า และจากสมการข้างต้น V สัมพันธ์กับค่า NA สำหรับเส้นใยนำแสงโหมดเดียวมี $0 < V < 2.405$ แต่สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมด $V > 2.405$

2.3 การกระเจิงของแสง(Scattering of Light)

2.3.1 การกระเจิงแบบเรย์ลี (Rayleigh Scattering)

สามารถอธิบายโดยการกระเจิงของแสงในโมเลกุลของอากาศ ซึ่งเกิดการกระเจิงมากกว่า 10 ครั้งต่อหนึ่งความยาวคลื่น ขนาดของโมเลกุลของอากาศจะมีขนาดเล็กกว่าความยาวของคลื่นแสงที่ตกกระทบ การกระเจิงนี้เองจึงทำให้เราเห็นโมเลกุลของอากาศในท้องฟ้าเป็นสีฟ้า แสดงได้ดังรูปที่ 2.9 เราสามารถคำนวณความเข้มแสงของการกระเจิงดังสมการดังนี้

$$I = I_0 \frac{8\pi^4 N\alpha^2}{\lambda^4 R^2}\left(1 + \cos^2\theta\right) \tag{2.8}$$

เมื่อ N คือ จำนวนรังสีของแสงที่เกิดการกระเจิง

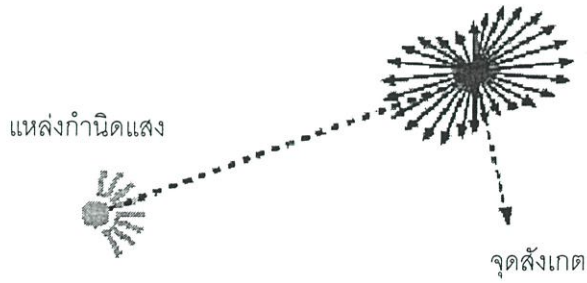
α คือ โพลาไรซ์เซบิลิตี (Polarizability)

λ คือ ความยาวคลื่น

R คือ ระยะจากผู้สังเกตถึงจุดที่เกิดการกระเจิง

θ คือ มุมของผู้สังเกต

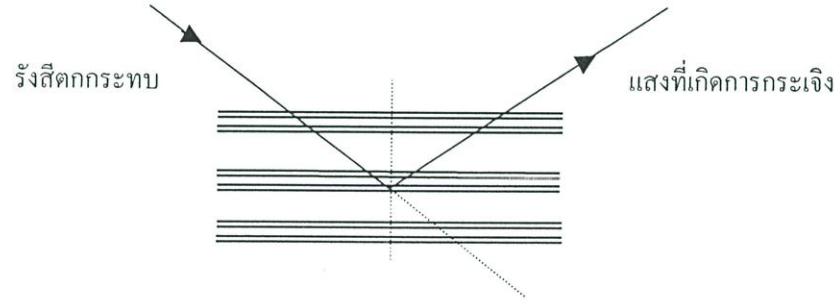
จากรูปที่ 2.9 ความเข้มของแสงที่ผู้สังเกตจะมีค่าเข้าใกล้ 1/ λ^4 ในการพิจารณาการกระเจิงแบบเรลีย์เป็นการกระเจิงแบบยืดหยุ่น พลังงานของโฟตอนที่เกิดการกระเจิงจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ถ้าการโฟตอนที่เกิดการกระเจิงเกิดมีการเพิ่มหรือลดพลังงานเราจะเรียกว่าเป็น การกระเจิงแบบรามาน การเกิดการกระเจิงนั้นจะเป็นการกระตุ้นทำให้เกิดการสั่นในโมเลกุลของตัวกลาง ทำให้โฟตอนมีพลังงานลดลง หรือกล่าวว่าโมเลกุลมีพลังงานการสั่นมากขึ้น



รูปที่ 2.9 แสดงการกระเจิงของแสงแบบเรย์ลี

2.3.2 การกระเจิงแบบบริลรูอิน (Brillouin Scattering)

เป็นการกระเจิงของแสงในแบบของอะคูสติก (Acoustic mode) คือเป็นลักษณะของคลื่นนิ่งที่เกิดขึ้นในของแข็ง ที่มีดัชนีหักเหเปลี่ยนเป็นคาบ เมื่อแสงเดินทางผ่านก็จะทำให้เกิดการสะท้อนหรือการกระเจิง โดยจะเป็นไปตามกฎของแบรก(Bragg Law) เราสามารถพิจารณาในเชิงของควอนตัมของแสงที่มีผลกระทบกับโฟตอน จะทำให้โฟตอนสั่นเป็นคาบ แสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 2.10 จะเป็นการเดินทางของแสงเข้าไปในตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่างกันเป็นคาบๆ



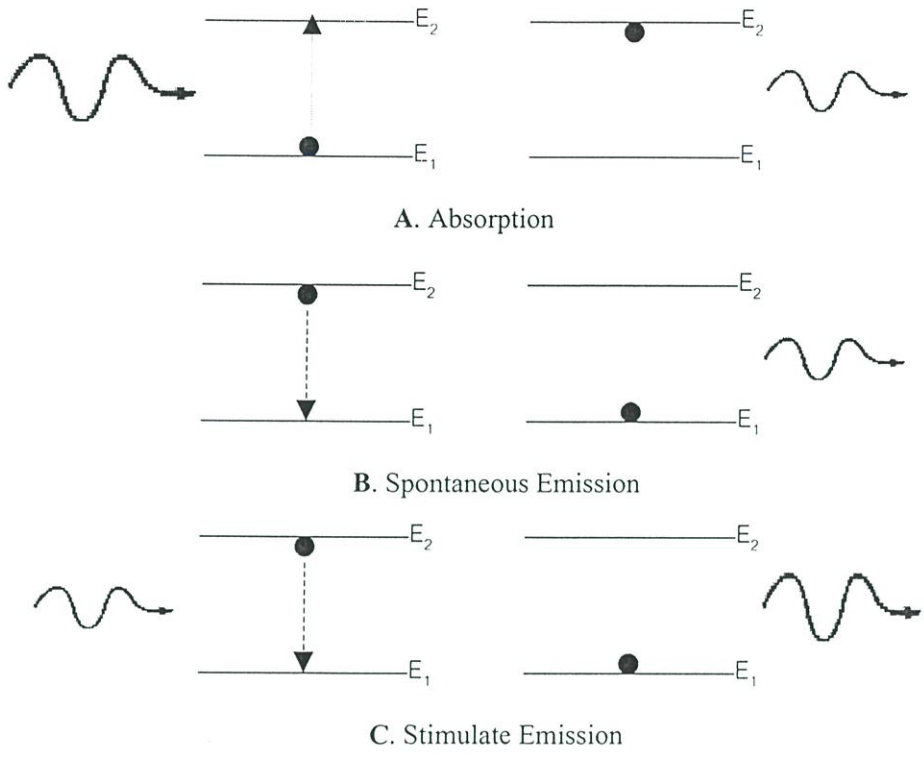
รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างการกระเจิงแบบบริลรูอิน

2.4 หลักการกำเนิดแสงของเลเซอร์

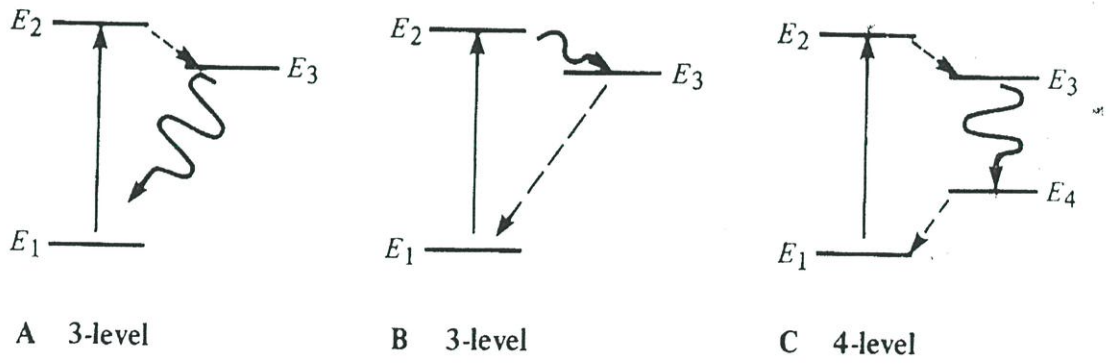
เลเซอร์ (LASER) ย่อมาจาก คำว่า "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation " คือ กระบวนการกระตุ้นให้เกิดการแผ่ของคลื่น (Stimulated Emission) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ก่อให้เกิดความเข้มแสงเพิ่มขึ้น (Light Amplification)

จากรูปที่ 2.11 แสดงถึงกระบวนการพื้นฐานของการดูดกลืนแสง และการแผ่คลื่นออกมามี 3 ชนิด คือ รูปที่ 2.11(A) แสดงพลังงานของแสงเท่ากับพลังงานที่แตกต่างกันระหว่างระดับ E_1 และ E_2 เรโซแนนซ์โฟตอนจะถูกดูดกลืน(Absorption) ทำให้สารนั้นสู่ภาวะกระตุ้น โดยความเข้มของแสงลดลง แต่ ν คงเดิม รูปที่ 2.11(B) เป็นกระบวนการที่เกิดแบบสุ่ม(Random Process) และเป็นกระบวนการทำให้เกิด ฟลูออเรสเซ็นโฟตอน(Fluorescent Photon) เรียกว่ากระบวนการแผ่คลื่นแบบสะปอนเตเนียส(Spontaneous Emission) และแสงที่เกิดขึ้นแบบนี้เป็นแสงที่ไม่อาพันธ์ (Incoherent) สำหรับ รูปที่ 2.11(C) เป็นกระบวนการที่ไอสไตน์ยอมรับว่า เรโซแนนซ์ โฟตอน สามารถเกิดอันตรกริยากับอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ที่สถานะพื้นให้กลายเป็นอะตอมหรือโมเลกุลสู่สถานะกระตุ้นได้ และเรโซแนนซ์โฟตอน ก็จะสามารถเกิดอันตรกริยากับอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ที่สถานะกระตุ้นให้กลายเป็นอะตอมหรือโมเลกุลสู่สถานะพื้นได้กระบวนการอย่างนี้เรียกว่ากระบวนการกระตุ้นให้เกิดการแผ่คลื่น (Stimulation Emission) แสงเลเซอร์นี้จัดว่าเป็นแสงอาพันธ์ (Coherent) จากที่ได้กล่าวมานี้เป็นการพิจารณาที่เป็นสองระดับพลังงาน (Two -Levels System)

ซึ่งยังมีระบบอื่นที่เป็นหลายระดับ (Multi - Levels) ซึ่งเรียกว่าการปั๊ม (Pumping) แสดงได้ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งจะให้เลเซอร์อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.11 แสดงการเกิดอันตรกริยาของแสงกับวัตถุเมื่อมีการดูดกลืนแสงและการแผ่แสง



รูปที่ 2.12 แสดงการปั๊มแบบหลายระดับ

เส้นทึบแสดงการเปลี่ยนระดับพลังงานจากการปั๊ม(Pump Transition) เส้นประแสดงการสลายตัว (Decay) โดยไม่ให้แสงหรือรังสี เส้นคดๆ แสดงการให้เลเซอร์จากทรานซิชัน

รูปที่ 2.12(A) เป็นระบบ 3 ระดับ ซึ่งเป็นระบบที่เรียกว่าเป็นการปั๊มให้เกิดการเปลี่ยนจากระดับ E_1 สู่ E_2 แล้วเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็วแบบไม่ให้รังสีไปยัง E_3 ซึ่งมีชีวิตที่ยาวพอสมควร แล้วกลับมาสู่ระดับ E_1 จะให้เลเซอร์ออกมา

รูปที่ 2.12(B) เป็นระบบ 3 ระดับอีกอย่างหนึ่ง ซึ่งจัดว่าเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพดีกว่านั่นคือเกิดทรานซิชันได้เลเซอร์ คือการเปลี่ยนระดับจาก E_2 สู่ E_3 ระบบนี้เกิดได้ง่าย เพราะเริ่มจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลที่ E_3 ไม่จำเป็นต้องมีเลย ซึ่งต่างจากระบบแรก

รูปที่ 2.12(C) เป็นระบบ 4 ระดับ ซึ่งจัดว่าเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพมากเพราะ E_4 ไม่ได้อยู่ที่สถานะพื้นและทรานซิชันที่ให้เลเซอร์คือการเปลี่ยนระดับจาก E_3 สู่ E_4 ดังนั้นถ้าจะให้เกิดเลเซอร์ขึ้นมากๆ ก็เพียงแต่ปั๊มให้เกิด E_2 และ E_3 มากๆ เท่านั้น ซึ่งการปั๊มนี้ก็ใช้กำลังต่ำกว่าระบบ 3 ระดับพลังงาน

2.5 อัตราการขยายแสง

การเปล่งแสงที่เกิดจากการเร่งเร้า (Stimulated Emission) จะส่งผลให้เกิดการขยายแสงไปในตัว เราจะมาพิจารณาการขยายแอมพลิจูดของคลื่นแสงมีลักษณะเป็นอย่างไร เริ่มแรกจะกล่าวถึงกรณีวัสดุทั่วไปซึ่งมีการดูดกลืนแสง ดังรูปที่ 2.13 สมติว่ามีแสงอินพุตที่มีแอมพลิจูด I_0 วิ่งเข้าสู่วัสดุที่มีความยาว z แสงอินพุตนี้จะถูกวัสดุดูดกลืน ดังนั้นแสงที่ทะลุออกด้านหลังของวัสดุจะมีแอมพลิจูดดังสมการข้างล่าง

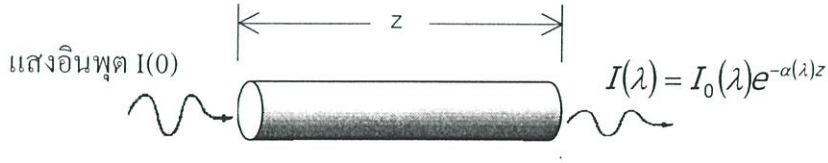
$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-\alpha(\lambda)z} \tag{2.9}$$

โดยที่ I คือ ความเข้มของแสง

λ คือ ความยาวคลื่นแสง

$\alpha(\lambda)$ คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของวัสดุ

สมการนี้แสดงให้เห็นว่าถ้าแสงยิ่งเดินทางระยะทาง (z) ไกลเท่าไร แอมพลิจูดของแสงจะยิ่งลดลง



รูปที่ 2.13 การลดทอนของแสงเนื่องจากถูกวัสดุดูดกลืน

ในกรณีแสงเดินทางเข้าสู่วัสดุซึ่งกำลังอยู่ในสภาพประชากรผกผันดังแสดงในรูปที่ 2.14 แสงที่ทะลุออกด้านหลังจะมีแอมพลิจูดสูงขึ้นเป็นดังสมการ

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{Az} \tag{2.10}$$

สมการนี้แสดงให้เห็นว่าถ้าแสงยิ่งเดินทางไกลมากเท่าไร แอมพลิจูดของแสงก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้นโดย สัมประสิทธิ์ A ในสมการนี้เรียกว่า " สัมประสิทธิ์อัตราการขยายแสง" (Optical Gain Coefficient)

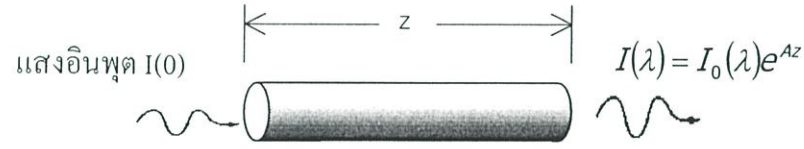
$$A = (N_2 - N_1)\rho / c \tag{2.11}$$

โดยที่ ρ คือ ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะจาก E_2 ไปสู่ E_1

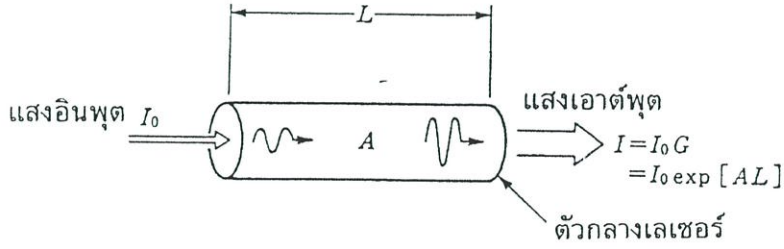
c คือ ความเร็วแสง

N_1 คือจำนวนประชากรในระดับพลังงานที่ 1

N_2 คือจำนวนประชากรในระดับพลังงานที่ 2



รูปที่ 2.14 การขยายขนาดของสัญญาณแสงในวัสดุตัวกลางกำเนิดเลเซอร์



รูปที่ 2.15 วิธีการพิจารณาหาค่าอัตราการขยายแสง

จากรูปที่ 2.15 ถ้ามีวัสดุตัวกลางมีความยาว L และถ้าแสงเอาต์พุตมีแอมพลิจูดเท่ากับ I_0G เราเรียก G ว่า "อัตราการขยายแสง" มีค่าดังสมการ

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$$G = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = \exp(AL) = \exp\left[(N_2 - N_1)\frac{\rho}{c} \cdot L\right] \qquad (2.12)$$

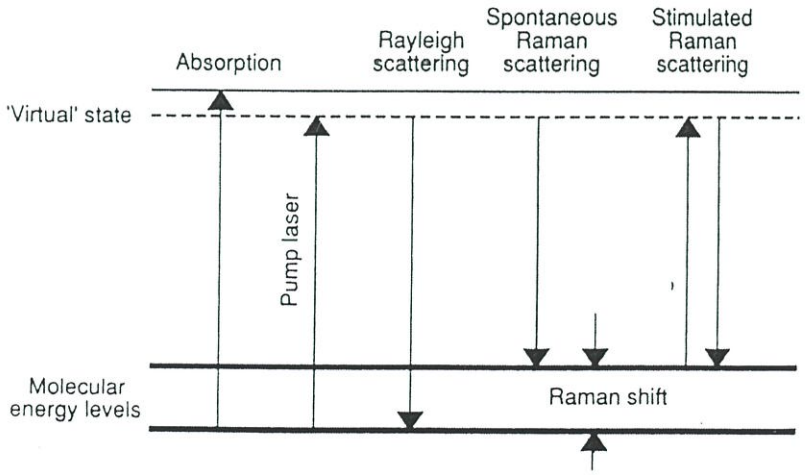
สมการนี้บอกให้เห็นว่า ถ้าจำนวนประชากรผกผัน (N_2- N_1) ยิ่งมากและแสงเดินทางในวัสดุไกลมาก ก็จะได้อัตราการขยายแสงมากขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล

2.6 การขยายสัญญาณแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสง

เนื่องจากการสื่อสารผ่านระยะทางไกลๆ เช่น การส่งสัญญาณจากสถานีส่งไปยัง สถานีรับซึ่งจะมีขนาดของสัญญาณลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้ขนาดสัญญาณมีค่าสูงพอที่จะให้การแปลงข้อมูลที่เครื่องรับมีได้ จึงต้องมีอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ติดตั้งระหว่างสถานีรับและส่งตามจำนวนที่จำเป็น แต่เดิมการขยายขนาดของสัญญาณจะดำเนินการโดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะประกอบด้วยการแปลงสัญญาณจากแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า เพื่อนำสัญญาณดังกล่าวไปขยาย จากนั้นก็จะทำการแปลงสัญญาณไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณแสงดังเดิมเพื่อส่งกลับเข้าไปในใยแก้วนำแสงต่อไปยังจุดหมายปลายทาง

โดยทั่วไปแล้ววงจรสำหรับขยายสัญญาณที่เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มีข้อจำกัดทางด้านความเร็ว ซึ่งไม่เหมาะสมกับสภาวะการณ์เจริญเติบโตทางด้านการสื่อสารที่นับวันจะต้องมีการส่งข้อมูลเพิ่มมากขึ้นเพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนาระบบการขยายสัญญาณในเชิงแสงขึ้นมาแทนเพราะระบบนี้ไม่มีข้อจำกัดในแง่ความจุข้อมูลมาเกี่ยวข้องเหมือนระบบอิเล็กทรอนิกส์ ระบบนี้รู้จักกันในนามอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสง (Optical Fiber Amplifier) จะเป็นการขยายแบบรามาน(Ramman Amplifier) และอีกแบบคือจะใช้ใยแก้วชนิดแอ็คทีฟ โดยจะเป็นใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป (EDF) ซึ่งสามารถอธิบายในหัวข้อต่อไปนี้

2.6.1 การขยายสัญญาณแบบรามาน (Raman Amplifier)



รูปที่ 2.16 แสดงไดอะแกรมระดับพลังงานของการที่เกิดในแกนเส้นใยแก้วนำแสง

49618

จากรูปที่ 2.16 พลังงานของกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนเท่ากับพลังงานที่ดูดกลืน(Absorption)เข้าไป ถ้าพลังงานของโฟตอนมีค่าไม่เท่ากับพลังงานของการเปลี่ยนระดับพลังงานของโมเลกุล(Molecular energy levels) หลังจากโมเลกุลอยู่ในสถานะกระตุ้น จะทำให้เกิดสถานะเสมือน (Virtual State) ซึ่งจะเป็นสถานะที่ทำให้เกิด การเปลี่ยนระดับพลังงานมาที่สถานะพื้นแล้วให้โฟตอนออกมาที่ความยาวคลื่นเดียวกัน กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้เป็นการกระเจิงแบบเรย์ลี (Rayleigh Scattering) ซึ่งเป็นพื้นฐานของกลไกที่ทำให้เกิดการสูญเสียในใยแก้วนำแสง อย่างไรก็ตามพลังงานของโฟตอนที่ได้จากสถานะเสมือนจะมีพลังงานต่ำกว่าพลังงานที่โมเลกุลถูกกระตุ้น เมื่อถึงช่วงชีวิตจะทำให้โมเลกุลเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะเสมือนกลับมาที่สถานะรามานชิพท์(Raman Shift) โดยเกิดขึ้นเอง เป็นกระบวนการที่เรียกว่า " Spontaneous Raman Scattering " ความถี่ของโฟตอนที่กระตุ้นกับโฟตอนที่เกิดขึ้นเองจะมีความแตกต่างกันเนื่องจากเกิดการชิพท์ของพลังงานรามาน จากความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ การเกิดประชากรผกผันระหว่างสถานะเสมือนกับสถานะสุดท้ายที่เกิดรามานชิพท์ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยโฟตอนแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานมาที่สถานะสุดท้ายก็จะเกิดการขยายแสงขึ้น โดยเรียกว่า "Stimulated Raman Scattering(SRS) " โดยจะเป็นการขยายแสงแบบรามาน

การขยายแบบรามาน เกิดขึ้นเมื่อมีการปั๊มด้วยเลเซอร์ที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม โดยสัญญาณแสงเลเซอร์เป็นตัวกระตุ้นให้ เกิดการกระเจิงแบบรามานขึ้น การสั่นของโมเลกุลของวัสดุที่แกนของใยแก้วนำแสงจะทำให้เกิดการชิพแบบรามาน การขยายแบบรามานสามารถขยายได้หลายความยาวคลื่น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ใช้ปั๊ม การขยายโดยใช้ใยแก้วนำแสงชนิดนี้เป็นการขยายแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งมีส่วนประกอบพื้นฐานคล้ายกับการขยายโดยใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป คือ เลเซอร์ คู่ควบใยแก้วนำแสง และใยแก้วนำแสง

การขยายแบบรามาน เมื่อมีการป้อนเลเซอร์ที่ใช้ปั๊มเข้าไปในใยแก้วนำแสงจะทำให้เกิดการซ้อนทับของระดับพลังงานจากการทรานซิชัน สาเหตุเกิดจากโมเลกุลของวัสดุในแกนของใยแก้วนำแสงมีความแตกต่างกัน ซึ่งเรียกว่าเป็นพื้นผิวของรามาน(Raman Cross-section) ในใยแก้วนำแสงมาตรฐานสำหรับการสื่อสารจะมีเยอร์มาเนียมประมาณ 4 %ของโมล ซึ่งจะทำให้เกิดรามานชิพท์ของพลังงานไป 420-450 cm^{-1} ที่ความยาวคลื่น 1300 นาโนเมตร และ 1550 นาโนเมตร จะเกิดการเลื่อนความยาวคลื่นไป 80 นาโนเมตร และ 100 นาโนเมตร ตามลำดับ อัตราการขยายของการขยายแบบรามานมีสมการดังนี้

$$RammanGain[dB] = \frac{(10\log_{10} e)KgL_e P}{A} \qquad (2.13)$$

เมื่อ P คือ กำลังของเลเซอร์ปั๊ม

g คือ สัมประสิทธิ์ของอัตราขยายแบบรามาน

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแสงในใยแก้วนำแสง(Fiber spot area)

K คือ ค่าคงที่สำหรับการออกแบบขึ้นอยู่กับโพลาไรซ์เซชัน

K = 1 สำหรับใยแก้วนำแสงที่มีการรักษาสถานะโพลาไรซ์เซชัน

K = 1/2 สำหรับใยแก้วนำแสงทั่วไป

L_e คือ ความยาวของใยแก้วที่มีผลตอบสนอง (Effective length)

L_e สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$L_e = \frac{1-\exp(-\alpha_p L)}{\alpha_p} \qquad (2.14)$$

เมื่อ L คือ ความยาวของใยแก้วนำแสง

α_p คือ ค่าการสะท้อนกำลังแสงที่ความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ใช้ปั๊ม

ถ้าเส้นใยแก้วนำแสงมีความยาวคลื่นมากๆ จะได้ว่า L_e มีค่าประมาณ $1/\alpha_p$ จากสมการที่ 2.14 เราสามารถที่จะเพิ่มอัตราขยายโดยการลดพื้นที่หน้าตัดของแกนใยแก้วนำแสง และเพิ่มสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายแบบรามานโดยการเพิ่มปริมาณการเติมเยอร์มาเนียมในแกนของใยแก้วนำแสง แต่ในทางกลับกันก็จะเป็นการทำให้เกิดการสูญเสียกำลังมากขึ้น สามารถแก้ไขโดยการใช้ใยแก้วสั้นลง ในกรณีปกติใยแก้วมาตรฐานจะมีการสูญเสียต่ำ และมีการเติมเยอร์มาเนียมในปริมานต่ำในการขยายแบบรามานจะเป็นตัวช่วยให้ระบบมีคุณภาพที่ดีขึ้น ซึ่งต้องใช้ใยแก้วที่มีความยาวให้เหมาะสมกับปริมาณการเติมเยอร์มาเนียม ก็จะได้อัตราในการขยายสัญญาณสูงขึ้น

เราสามารถเปรียบเทียบการขยายสัญญาณแสงแบบรามานและแบบใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดปได้ดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบการขยายแสงแบบรามานและแบบใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียม

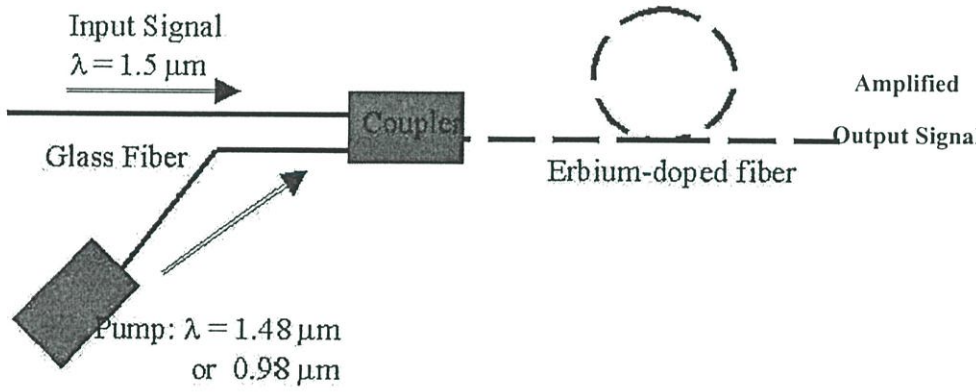
คุณสมบัติ	Raman Amplifier	EDF-Amplifier
ความยาวคลื่นที่ขยาย	ขึ้นอยู่กับเลือกความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ใช้ปั๊ม	ขึ้นอยู่กับสารที่ใช้เติม(Doped) ในแกนของใยแก้วนำแสง
แบนวิดช์	48 นาโนเมตร สำหรับปั๊มหลายความยาวคลื่น	20 นาโนเมตร
อัตราขยาย	4-11 dB ที่กำลังของปั๊มและความยาวของใยแก้วที่เหมาะสม	20 dB ขึ้นอยู่กับการโดปที่ดี ความยาวของEDF และเลเซอร์ที่ใช้ปั๊ม

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

การอิ่มตัวของกำลัง	ขึ้นอยู่กับกำลังของเลเซอร์ปั๊ม	ขึ้นอยู่กับอัตราขยายและสารที่โดป
ความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ใช้ปั๊ม	ต่ำกว่าความยาวคลื่นของสัญญาณที่ต้องการขยาย 100 นาโนเมตร	980 นาโนเมตร หรือ 1480 นาโนเมตร

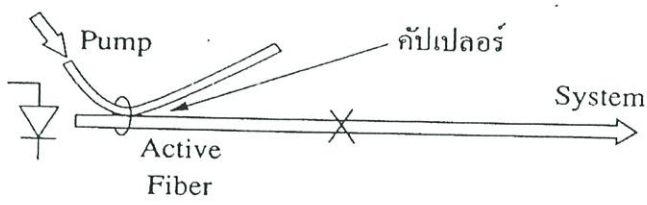
2.6.2 การขยายสัญญาณโดยใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป

การขยายสัญญาณโดยใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดปจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.17 โดยมีการป้อนแสงสองความยาวคลื่นผ่านคู่ควบใยแก้วนำแสงไปยังใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป โดยมีสัญญาณแสงอินพุต(Input Signal) ความยาวคลื่น 1.5 ไมโครเมตร และมีเลเซอร์ที่ใช้ปั๊ม (Pump) ความยาวคลื่น 1.48 ไมโครเมตรหรือ 0.98 ไมโครเมตร แล้วก็จะได้สัญญาณแสงที่ถูกขยายเอาต์พุต (Amplified Output Signal)

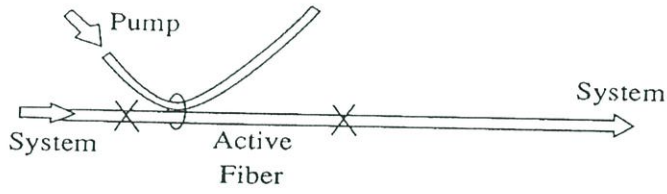


รูปที่ 2.17 แสดงการขยายสัญญาณทางแสง

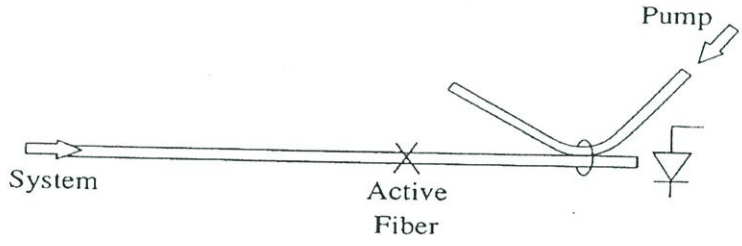
ใยแก้วเออร์เบียมโดป (Erbium Doped Fiber Amplifiers; EDFA) ทำโดยการเติมธาตุในกลุ่มแรเอิร์ท (Rare Earth) คือเออร์เบียม (Erbium) ที่อยู่ในรูปของออกไซด์เข้าไประหว่างขั้นตอนการประดิษฐ์ที่รู้จักกันในเลเซอร์ใยแก้ว(Fiber Laser) ซึ่งทำให้ปัญหาที่เคยมีกับตัวขยายสัญญาณแบบสารกึ่งตัวนำหมดไป การเติมสารเจือให้กับเส้นใยแก้วนำแสงนั้นท่อนำคลื่นที่ได้จะมีความสมมาตร และสามารถนำมาเชื่อมต่อเข้าได้กับใยแก้วนำแสงโดยให้การลดทอนสัญญาณที่จุดต่อที่ต่ำ ซึ่งจะมีลักษณะในการขยายสัญญาณแสงดังรูปที่ 2.18



(ก) การขยายสัญญาณที่อุปกรณ์ส่ง



(ข) อุปกรณ์ทวนสัญญาณแสง



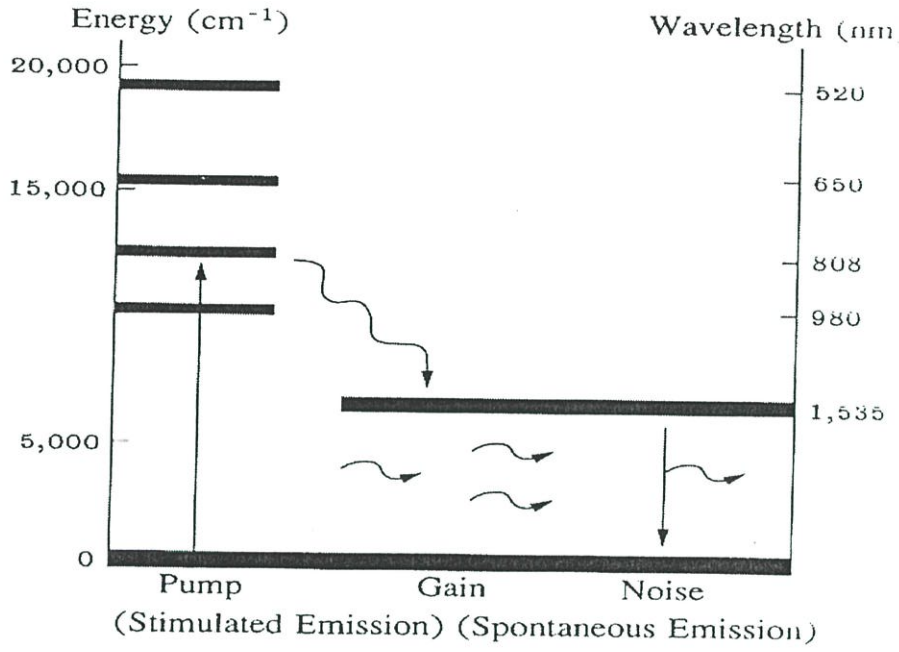
(ค) การขยายสัญญาณที่อุปกรณ์รับ

รูปที่ 2.18 แสดงอุปกรณ์ในการขยายสัญญาณแสงลักษณะต่างๆ

จากรูปที่ 2.19 แสดงระดับพลังงานของเออร์เบียมในแก้ว การดูดกลืนแสงโดยอิเล็กตรอนในสภาวะพื้นฐานจะทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ในที่สูงกว่าระดับเลเซอร์ทันที ในสภาวะเลเซอร์นี้จะมีช่วงชีวิตที่ยาวและกระทำตัวเหมือนชั้นสะสมอิเล็กตรอน โฟตอนที่มีความยาวคลื่น 1535 นาโนเมตร จะถูกกระตุ้นด้วยโฟตอนที่เหมือนกันและออกมาเป็นเลเซอร์หรือมีการขยายสัญญาณเกิดขึ้น พิจารณาจากไดอะแกรมของระดับพลังงานของแถบสเปกตรัม เลเซอร์ที่ใช้ปั๊มจะนำมาใช้งานได้ดีที่สุดจะมีอยู่สองความยาวคลื่นคือ 980 นาโนเมตร และที่ 1460 - 1490 นาโนเมตร ซึ่งที่ 980 นาโนเมตร จะมีอัตราขยาย 3.9 $dBmW^{-1}$ ใช้เลเซอร์ไดโอดที่เป็น GaAlAs เป็นตัวกระตุ้น ส่วนที่ 1460 - 1490 นาโนเมตรจะมีอัตราขยายอยู่ที่ 2.2 $dBmW^{-1}$ ใช้เลเซอร์ไดโอดที่เป็น GaAsP เป็นตัวกระตุ้น

อัตราขยายสูงสุดที่ทำได้ของตัวขยายสัญญาณแบบนี้ทำได้ถึง 46.5 dB โดยการกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร พลังงาน 133 mW และอัตราขยาย 25 - 40 dB โดยการกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 980 นาโนเมตร พลังงาน 40-100 mW การขยายสัญญาณโดยใช้ใยแก้วจะมีการสูญเสียต่ำเนื่องจากรอยต่อ ทำให้การขยายสัญญาณที่ได้มีค่าไกล้เคียงกับค่าจริงเมื่อนำไปใช้งานแต่ค่า

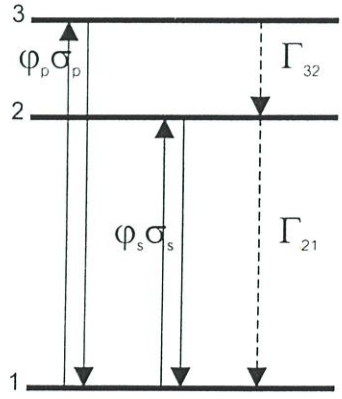
แบนวิททางแสงมีค่าจำกัดมากกว่าของตัวขยายสัญญาณแบบสารกึ่งตัวนำทำให้มีค่าอิ่มตัวของเอาต์พุตต่ำ ที่ -5 ถึง +3 dB



รูปที่ 2.19 แสดงระดับพลังงานของเออร์เบียม

2.7 การขยายสัญญาณแบบ 3 ระดับพลังงานของใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป

การขยายสัญญาณโดยใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดปเราจะพิจารณากระบวนการขยายโดยการพิจารณาจากระบบพลังงานในอะตอมของเออร์เบียมแบบสามระดับ ซึ่งจะเป็นโมเดลที่บอกถึงลักษณะที่สำคัญ กลไกลที่เกิดขึ้นจะประกอบไปด้วย การกระตุ้นโดยคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสมหรือเรียกว่าการปั๊ม เราสามารถพิจารณาได้จากสมการซึ่งจะมีความซับซ้อน ผลที่เกิดขึ้นจากการดูดกลืนพลังงานของอิเล็กตรอนทำให้เปลี่ยนระดับพลังงานไปอยู่ในสถานะกระตุ้น ลักษณะที่เกิดขึ้นจะเป็นปัญหาแบบสามมิติ



รูปที่ 2.20 แสดงระดับพลังงานของการขยายแบบ 3 ระดับ

จากรูปที่ 2.20 เป็นระบบที่มีสามระดับพลังงาน ระดับ 1 คือสถานะพื้น(Ground State) ระดับที่ 3 คือสถานะกระตุ้น (Intermediate State) เป็นระดับที่ถูกกระตุ้นโดยแสงที่ปั๊ม จะมีช่วงชีวิตที่สั้นซึ่งจะลงไปอยู่ที่ระดับที่ 2 ระดับที่ 2 คือสถานะกึ่งเสถียร(Metastable State) เป็นระดับที่มีช่วงชีวิตที่ยาว จะเป็นผลดีต่อการขยายสัญญาณ ระดับที่ 2 นี้จะเป็นระดับที่เมื่อมีการเปลี่ยนระดับพลังงานมาที่ระดับที่ 1 จะเกิดการขยายสัญญาณเกิดขึ้น จะตรงกับความยาวคลื่นที่ 1550 นาโนเมตร จำนวนประชากรของอิเล็กตรอนในแต่ละระดับพลังงานเราจะแทนด้วย N_1 , N_2 , N_3 ตามลำดับ จากระดับพลังงานในแต่ระดับจะตรงกับระดับพลังงานในอะตอมของ Er^{3+} กระบวนการขยายสัญญาณแสงเกิดขึ้น คือจะต้องทำให้เกิดประชากรผกผัน(Population Inversion) ขึ้นในระหว่างระดับพลังงาน ที่ 1 และ 2 ที่ระดับพลังงานที่ 1 จะเป็นสถานะพื้น ซึ่งการกระตุ้นจะทำให้เกิดจำนวนอิเล็กตรอนของเออร์เบียมมีจำนวนมากขึ้นที่ระดับพลังงานที่ 2 แสงที่ใช้ในการปั๊มต้องมีกำลังมากกว่ากำลังขีดเริ่ม (Threshold pump power) จึงจะทำให้เกิดการขยายสัญญาณ ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับการทำให้เกิดเลเซอร์ในระบบสามระดับพลังงาน

ในการพิจารณาขอบเขตที่สำคัญคือแสงเดินทางไปในใยแก้วนำแสงที่มีแกนขนาดเล็กความเข้มของแสงมีค่าเพิ่มขึ้น สมมุติให้การกระจายของแสงในใยแก้วมีความสม่ำเสมอเมื่อเคลื่อนที่ไปในระยะทางที่ไกลขึ้น ซึ่งจะเกิดประชากรผกผันมากขึ้นด้วย เราจะพิจารณาในระบบ 1 มิติ คือให้การแสงเดินทางไปตามทิศทางความยาวของใยแก้ว และแสงตกกระทบตามพื้นที่หน้าตัดของใยแก้ว การเดินทางของแสงจะทำให้เกิดการกระจายตัวของอิเล็กตรอนของ Er^{3+} เพื่อทำให้เกิดการขยายสัญญาณแสง

เมื่อแสงที่ปั๊มเดินทางเข้าไปในใยแก้วนำแสงซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจาก 1 ไป 3 เราแทนฟลักซ์ของแสงนั้นด้วย ϕ_p และเราแทนฟลักซ์ของแสงที่มีการเปลี่ยนระดับพลังงานจาก 2 ไป 1 เป็น ϕ_s จะเป็นฟลักซ์ของสัญญาณ ที่เปลี่ยนระดับพลังงานไปสู่ระดับที่สูงขึ้น โดยจะได้รับพลังงานจากการดูดกลืนพลังงานจากโฟตอนของแสงที่ตกกระทบ เราจะแทนโอกาสที่อิเล็กตรอนจะเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับที่ 3 มาที่ 2 ด้วย Γ_{32} ซึ่งการเปลี่ยนระดับพลังงานนี้จะไม่มีการแผ่คลื่นแสงออกมาเนื่องจากมีช่วงชีวิตที่สั้นมาก และ Γ_{21} คือโอกาสที่อิเล็กตรอนจะเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับที่ 2 มาที่ 1 การเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับที่ 2 มาที่ 1 จะแผ่คลื่นแสง และ $\Gamma_{21} = 1/\tau_2$ เมื่อ τ_2 คือช่วงชีวิตของระดับพลังงานที่ 2 σ_p คือพื้นผิวหน้าตัดในการดูดกลืนแสงที่มีการเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับ 1 ไป 3 และ σ_s คือพื้นผิวหน้าตัดในการแผ่คลื่นแสงที่มีการเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับ 2 ไป 1 เราจะได้สมการอัตราการเปลี่ยนแปลงประชากรดังนี้

$$\frac{dN_3}{dt} = -\Gamma_{32}N_3 + (N_1 - N_3)\phi_p\sigma_p \tag{2.15}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\Gamma_{21}N_2 + \Gamma_{32}N_3 - (N_2 - N_1)\phi_s\sigma_s \tag{2.16}$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \Gamma_{21}N_2 - (N_1 - N_3)\phi_p\sigma_p + (N_2 - N_1)\phi_s\sigma_s \tag{2.17}$$

เมื่ออะตอมอยู่ในสภาวะคงตัวเราจะได้ว่า

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = \frac{dN_3}{dt} = 0 \tag{2.18}$$

จำนวนประชากรรวมทั้งหมด N

$$N = N_1 + N_2 + N_3 \tag{2.19}$$

จากสมการที่ 2.15 เราจะสามารถเขียนสมการแสดงจำนวนประชากรในระดับพลังงานที่ 3 ดังนี้

$$N_3 = \frac{1}{1 + \Gamma_{32} / \phi_p\sigma_p} N_1 \tag{2.20}$$

เนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับที่ 3 มาที่ 2 เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เราจะได้ว่า Γ_{32} จะมีค่ามาก และ N_3 มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งประชากรส่วนใหญ่จะอยู่ที่ระดับพลังงานที่ 1 และ 2 จากสมการที่ 2.20 นำไปแทนในสมการที่ 2.17 เราจะได้ว่า

$$N_2 = \frac{(\phi_p\sigma_p / \Gamma_{32}) + \phi_s\sigma_s}{\Gamma_{21} + \phi_s\sigma_s} N_1 \tag{2.21}$$

จากสมการที่ 2.20 เราจะได้ว่าจำนวนประชากรผกผัน $N_2 - N_1$ เป็นดังนี้

$$N_2 - N_1 = \frac{\phi_p\sigma_p - \Gamma_{21}}{\Gamma_{21} + 2\phi_s\sigma_s + \phi_p\sigma_p} N \tag{2.22}$$

จากเงื่อนไขของระบบที่เกิดประชากรผกผันคือ $N_2 \geq N_1$ ดังนั้นฟลักซ์ของแสงขีดเริ่มที่ใช้ปั๊ม ทำให้เกิดประชากรผกผันขึ้น พิจารณาจาก $N_1 = N_2$ จะได้ดังนี้

$$\phi_{th} = \frac{\Gamma_{21}}{\sigma_p} = \frac{1}{\tau_2 \sigma_p} \tag{2.23}$$

ในกรณีที่ ความเข้มของสัญญาณแสงมีค่าน้อยๆ ค่าของ Γ_{32} จะมีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการเปลี่ยนระดับพลังงานจากการปั๊ม เราจะได้ว่าประชากรผกผันจะมีค่าเป็นดังนี้

$$\frac{N_2 - N_1}{N} = \frac{\phi_p^{'} - 1}{\phi_p^{'} + 1} \tag{2.24}$$

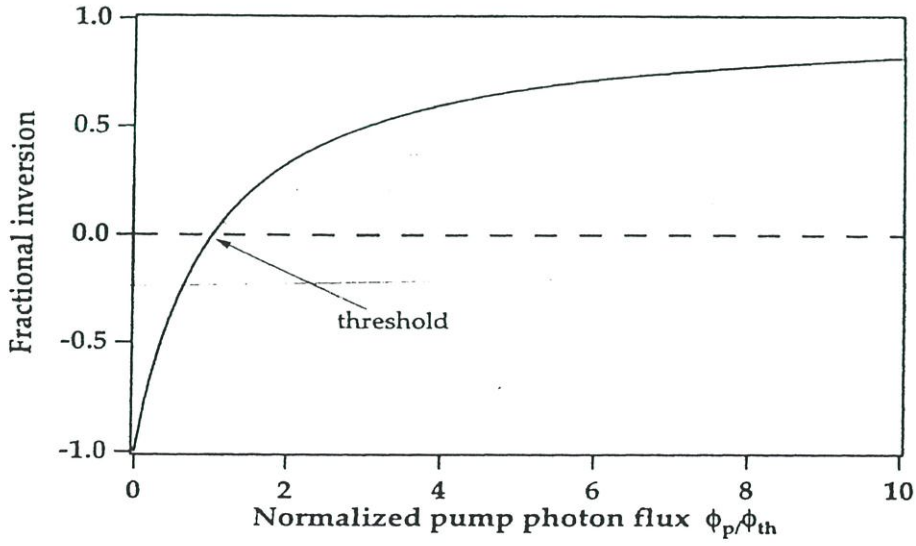
เมื่อ

$$\phi_p^{'} = \frac{\phi_p}{\phi_{th}} \tag{2.25}$$

จากสมการที่ 2.25 เราสามารถที่จะนำไปพล็อตกราฟแสดงอัตราส่วนประชากรผกผันซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.21 ฟลักซ์ของปั๊มมีค่าน้อยกว่าค่าขีดเริ่มจะได้ค่าที่เป็นลบ ถ้าฟลักซ์ของปั๊มมีค่ามากกว่าค่าขีดเริ่มจะได้ค่าเป็นบวก ประชากรผกผันที่มีค่าเป็นลบเมื่อมีสัญญาณแสงเข้ามาจะมีการดูดกลืนสัญญาณ จะเกิดการลดทอนสัญญาณ มีอัตราในการขยายที่เป็นลบ และประชากรผกผันที่มีค่าเป็นบวกเมื่อมีสัญญาณแสงเข้ามา ก็จะเกิดการขยายสัญญาณ มีอัตราในการขยายที่เป็นบวกนั้นเอง

ความเข้มของแสงที่ใช้ปั๊มมีค่าเป็น $I_p = h\nu_p \phi_p$ เราจะได้ความเข้มแสงขีดเริ่มของแสงที่ปั๊มเป็นดังสมการ

$$I_{th} = \frac{h\nu_p \Gamma_{21}}{\sigma_p} = \frac{h\nu_p}{\sigma_p \tau_2} \tag{2.26}$$



รูปที่ 2.21 แสดงสัดส่วนของประชากรผกผัน ($(N_2-N_1)/N$)

จากสมการที่ 2.26 บอกว่าถ้า σ_p และ τ_2 มีค่ามากเท่าไหร่ก็จะมีผลดี ช่วงชีวิตที่ยาวจะทำให้เราใช้กำลังของแสงที่ใช้ปั๊มน้อยลง ซึ่งจะเป็นการรับประกันว่ากำลังแสงที่ปั๊มเพียงพอที่จะทำให้ประชากรส่วนใหญ่ไปอยู่ในระดับพลังงานที่ 2

สำหรับเออร์เบียมที่โดปในแก้วซิลิกาเราจะได้ว่าช่วงชีวิตของระดับพลังงานที่ 2 (τ_2) เป็นค่าที่มากพอ ซึ่งมีค่าประมาณ 10 ms แสงที่ใช้ปั๊มจะเป็นแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 980 nm และ $\sigma_p = 2 \times 10^{-21}$ cm^2 เราจะได้ความเข้มขีดเริ่มของเลเซอร์ปั๊มจะมีค่าเป็น $I_{th} \approx 10kw/cm^2$ และพื้นที่หน้าตัดของแกนใยแก้ว $A_{eff} = 5\mu m^2$ ดังนั้นเราจะได้กำลังแสงขีดเริ่มของปั๊ม $P_{th} = I_{th} A_{eff} \approx 0.5mW$

2.7.1 อัตราขยายสัญญาณน้อยสุด

เราจะมาพิจารณา จำนวนประชากร N , N_1 , N_2 , N_3 ซึ่งความหนาแน่นของประชากรจะเป็นจำนวนอิเล็กตรอนต่อปริมาตร แสงที่เดินทางไปในตัวกลางก็จะเกิดอัตกริยากับอิเล็กตรอนในตัวกลาง เรากำหนดให้ I_s คือความเข้มของสัญญาณแสง และ I_p คือความเข้มของแสงที่ใช่ปั๊ม โฟตอนฟลักซ์จะมีค่าดังสมการ

$$\phi_s = \frac{I_s}{h\nu_s} \tag{2.27}$$

และ

$$\phi_p = \frac{I_p}{h\nu_p} \tag{2.28}$$

การเคลื่อนที่ของแสงไปตามแนวความยาวของใยแก้วให้เป็น z เราสามารถที่จะเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและความเข้มของแสงดังนี้

$$I(z) = \frac{P(z)\Gamma}{A_{eff}} \tag{2.29}$$

เมื่อ Γ คือแฟกเตอร์ของการซ้อนทับกัน A_{eff} คือพื้นผิวหน้าตัด(Effect Area) ในการพิจารณาเราจะสมมุติให้ ลำแสงของปั๊มเดินทางไปในทิศทางเดียว ซึ่งจะเกิดการลดทอนกำลังแสงหรือการขยายเกิดขึ้น เราจะหาอนุพันธ์ของฟลักซ์ของแสงเทียบกับ Z จากการดูดกลืนพลังงานของอิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะพื้น N_1 ไปสู่สถานะกระตุ้น N_2 , N_3 ได้ดังนี้

$$\frac{d\phi_s}{dz} = (N_2 - N_1)\sigma_s\phi_s \tag{2.30}$$

$$\frac{d\phi_p}{dz} = (N_3 - N_1)\sigma_p\phi_p \tag{2.31}$$

ซึ่งสามารถที่จะนำไปคำนวนแล้วจะได้สมการแสดงอัตราการเปลี่ยนความเข้มของสัญญาณแสงต่อความยาวได้ดังนี้

$$\frac{dI_s}{dz} = \frac{\frac{\sigma_p I_p}{h\nu_p} - \Gamma_{21}}{\Gamma_{21} + 2\left(\frac{\sigma_s I_s}{h\nu_s} + \frac{\sigma_p I_p}{h\nu_p}\right)}\sigma_s I_s N \tag{2.32}$$

และจะได้สมการแสดงการลดทอนของแสงที่ใช้ปั๊มดังนี้

$$\frac{dI_p}{dz} = -\frac{\frac{\sigma_s I_s}{h\nu_s} + \Gamma_{21}}{\Gamma_{21} + 2\left(\frac{\sigma_s I_s}{h\nu_s} + \frac{\sigma_p I_p}{h\nu_p}\right)}\sigma_p I_p N \tag{2.33}$$

จากสมการที่ 2.32 เงื่อนไขในการที่จะเกิดการขยายสัญญาณจะต้องเป็นดังนี้

$$I_p \geq I_{th} = \frac{h\nu_p}{\sigma_p \tau_2} \tag{2.34}$$

นอร์มอลไลซ์ความเข้มของแสงกับความเข้มขีดเริ่มของปั๊มได้ดังนี้

$$I_p' = \frac{I_p}{I_{th}} \tag{2.35}$$

$$I_s' = \frac{I_s}{I_{th}} \tag{2.36}$$

กำหนดให้

$$\eta = \frac{h\nu_p}{h\nu_s}\frac{\sigma_s}{\sigma_p} \tag{2.37}$$

และความเข้มอิ่มตัวจะได้ดังนี้

$$I_{sat}(z) = \frac{1 + I_p'(z)}{2\eta} \tag{2.38}$$

ดังนั้นเราจะเขียนสมการกระจายของความเข้มแสงจากความเข้มแสงที่นอมอลไลซ์ได้ดังนี้

$$\frac{dI_s^{'}(z)}{dz} = \frac{1+\eta I_s^{'}(z)}{1+I_s^{'}(z)/I_{sat}(z)}\left(\frac{I_p^{'}(z)-1}{I_p^{'}(z)+1}\right)\sigma_s I_s^{'}(z)N \tag{2.39}$$

และสำหรับปั๊ม

$$\frac{dI_p^{'}(z)}{dz} = -\frac{1+\eta I_s^{'}(z)}{1+2\eta I_s^{'}(z)+I_p^{'}(z)}\sigma_p I_p^{'}(z)N \tag{2.40}$$

สัญญาณแสงที่วิ่งเข้าไปในใยแก้วจะมีการขยายเกิดขึ้นเมื่อกำลังของปั๊มต้องมากกว่ากำลังแสงขีดเริ่ม ($I_p \geq I_{th}$) ภายใต้เงื่อนไขอัตราขยายน้อยสุด เมื่อ $I_s^{'} << I_{sat}$ และสมมุติให้ความเข้มของเลเซอร์ปั๊มมีค่าคงที่และใยแก้วมีความเหมือนกันทุกส่วน เราจะได้สมการการกระจายของสัญญาณแสงซึ่งเป็นฟังก์ชั่นของความยาวของใยแก้วดังนี้

$$I_s^{'}(z) = I_s^{'}(0)\exp(\alpha_p z) \tag{2.41}$$

กำหนดให้สัมประสิทธิ์ของอัตราขยาย คือ

$$\alpha_p = \frac{I_p^{'}-1}{I_p^{'}+1}\sigma_s N \tag{2.42}$$

การขยายสัญญาณจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กโพเน็นเชียล ซึ่งจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับจำนวนของอิเล็กตรอนที่เกิดประชากรผกผัน เนื่องจากความเข้มของแสงที่ปั๊มมีค่ามากเราสามารถที่จะประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราเป็นดังนี้

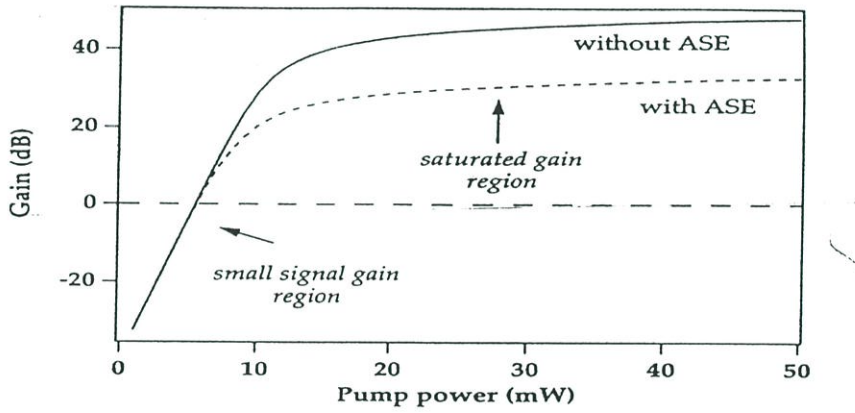
$$\alpha_p = \sigma_s N \tag{2.43}$$

2.7.2 ขอบเขตของการอิ่มตัว

เมื่อสัญญาณอินพุตมีกำลังมากพอที่จะทำให้เกิดการขยายถึงจุดอิ่มตัว คือจะได้สัญญาณ $I_s^{'}$ มีค่าเข้าใกล้ I_{sat} ซึ่งเราสามารถที่จะแสดงได้ดังสมการ

$$\frac{dI_s'}{dz} = I_{sat}\left(\frac{I_p' - 1}{I_p' + 1}\right)\sigma_s N \tag{2.44}$$

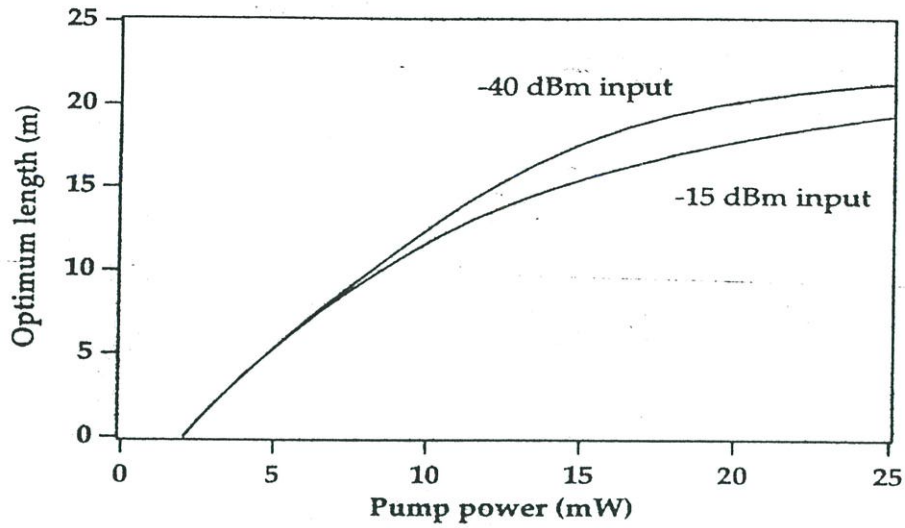
จากรูปที่ 2.22 เป็นอัตราในหน่วย dB ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นของกำลังของเลเซอร์ปั๊ม อัตราของการขยายที่ใช้ใยแก้วยาว L เราจะนิยามจาก G = 10 log(I(z =L)/I(z = 0)) รูปที่ 2.23 จะใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดปยาว 15 เมตร สัญญาณแสงความยาวคลื่น 1550 nm กำลัง -40 dBm ใช้เลเซอร์ปั๊มความยาวคลื่น 980 nm จะแสดงผลกระทบที่เกิดจาก ASE (Amplifier Spontaneous Emission) ซึ่งจะทำให้อัตราลดลงเนื่องจากเกิดการรบกวนกับสัญญาณแสง จากกราฟจะเห็นว่า I_{sat} จะไม่คงที่เมื่อความกำลังของเลเซอร์ปั๊มเพิ่มขึ้น การให้กำลังของปั๊มที่เพียงพอจะทำให้รักษาสภาพประชากรผกผัน ก็จะทำให้กำลังของสัญญาณที่สูงและขอบเขตของการอิ่มตัวที่สูงด้วย



รูปที่ 2.22 แสดงอัตราขยายที่ความยาวคลื่น 1550 nm สัญญาณอินพุต -40 dBm

2.7.3 ความยาวของใยแก้วนำแสงที่ได้อัตราขยายสูงสุด

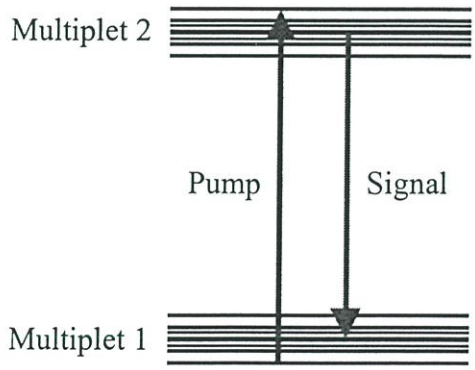
การพิจารณาหาความยาวของใยแก้วที่จะได้อัตราขยายสูงสุดนั้นจะต้องคำนึงถึงกำลังของเลเซอร์ที่ใช้ปั๊ม แสงที่เดินทางในแกนของใยแก้วนั้นจะมีความเข้มลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งกำลังของเลเซอร์ที่ใช้ปั๊มจะลดลงจนมีค่าเท่ากับค่ากำลังขีดเริ่มของปั๊ม(I_{th}) ที่ความยาวของใยแก้วจุดนี้จะเป็นความยาวสูงสุดที่ทำให้ได้กำลังขยายสูงสุดด้วย ถ้าใยแก้วนำแสงยาวมากกว่านั้นก็จะเกิดการลดทอนสัญญาณเกิดขึ้นเนื่องจากส่วนที่เกินไปนั้นจะมีกำลังของแสงที่ปั๊มน้อยกว่า I_{th} ถ้าเราพิจารณาอัตราขยายในแต่ละจุดตามความยาวของใยแก้ว (z) ในช่วงแรกของใยแก้วนำแสงก่อนถึงความยาวสูงสุดจะมีอัตราขยายเป็นบวก ส่วนที่ยาวมากกว่านั้นจะมีอัตราขยายเป็นลบ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.23 เป็นกราฟแสดงความยาวของใยแก้วที่ได้อัตราขยายสูงสุด ซึ่งจะขึ้นอยู่กับกำลังของเลเซอร์ปั๊ม(Pump Power)



รูปที่ 2.23 แสดงความยาวของใยแก้วที่ได้อัตราขยายสูงสุด ความยาวคลื่น 1550 nm สัญญาณอินพุต-40 dBm และ -15 dBm ได้จากการจำลองโดยใช้วิธีนิวเมอร์ริคอลใช้ปั๊มความยาวคลื่น 980 nm

2.8 การขยายสัญญาณแบบ 2 ระดับพลังงานของใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป

การขยายสัญญาณแบบนี้จะใช้ลักษณะของความเป็นแถบพลังงานของอะตอมคือ ที่ระดับพลังงานนั้นจะมีระดับพลังงานที่อยู่ข้างเคียง(Multiplet System) โดยจะมี 2 ระดับพลังงาน ดังรูปที่ 2.24 Multiplet 1 เป็นสถานะพื้น และ Multiplet 2 เป็นสถานะกระตุ้น ที่ระดับพลังงานที่ทำให้เกิดการขยายสัญญาณจะอยู่ที่ระดับที่สองดังนั้นการปั๊มก็ต้องให้อิเล็กตรอนขึ้นไปในระดับพลังงานที่สูงกว่า



รูปที่ 2.24 แสดงระดับพลังงานที่มีระดับพลังงานข้างเคียง(Multiplet System) แบบ 2 ระดับ

ในระบบ 2 ระดับนี้จะใช้เลเซอร์ที่ใช้ปั๊มความยาวคลื่น 1480 nm ให้จำนวนประชากรที่ระดับพลังงานที่ 1 เป็น N_1 และระดับที่ 2 เป็น N_2 ดังนั้นเราจะได้สมการแสดงจำนวนประชากรของอิเล็กตรอนดังนี้

$$\frac{dN_2}{dt} = -\Gamma_{21}N_2 + \left(N_1\sigma_s^{(a)} - N_2\sigma_s^{(e)}\right)\phi_s - \left(N_2\sigma_p^{(e)} - N_1\sigma_p^{(a)}\right)\phi_p$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \Gamma_{21}N_2 + \left(N_2\sigma_s^{(e)} - N_1\sigma_s^{(a)}\right)\phi_s - \left(N_1\sigma_p^{(a)} - N_2\sigma_p^{(e)}\right)\phi_p \qquad (2.45)$$

เมื่อ $\sigma_s^{(a)}, \sigma_s^{(e)}, \sigma_p^{(a)}, \sigma_p^{(e)}$ คือพื้นที่หน้าตัดของสัญญาณและปั๊ม ที่ดูดกลืนและแผ่รังสี ของสัญญาณแสงและแสงที่ปั๊ม จำนวนประชากรทั้งหมดคือ

$$N = N_1 + N_2 \qquad (2.46)$$

ดังนั้น

$$\frac{dN_1}{dt} = -\frac{dN_2}{dt} \qquad (2.47)$$

ความหนาแน่นของประชากรซึ่งจะเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งตามความยาวของใยแก้ว z ดังสมการ

$$N_2(z) = \frac{\frac{\tau\sigma_s^{(a)}}{h\nu_s}I_s(z) + \frac{\tau\sigma_p^{(a)}}{h\nu_p}I_p(z)}{\frac{\tau\left(\sigma_s^{(a)} + \sigma_s^{(e)}\right)}{h\nu_s}I_s(z) + \frac{\tau\left(\sigma_p^{(a)} + \sigma_p^{(e)}\right)}{h\nu_p}I_p(z)}N \qquad (2.48)$$

โดยทั่วไปเราจะสมมุติ N เป็นอิสระต่อกับความยาว z การกระจายของแสงที่ปั๊มกับสัญญาณแสงมีสมการดังนี้

$$\frac{dI_p(z)}{dz} = \left(N_2\sigma_p^{(e)} - N_1\sigma_p^{(a)}\right)I_p(z) \qquad (2.49)$$

$$\frac{dI_s(z)}{dz} = \left(N_2\sigma_s^{(e)} - N_1\sigma_s^{(a)}\right)I_s(z) \qquad (2.50)$$

การกระตุ้นให้เกิดการแผ่คลื่นออกมาจากระดับพลังงานที่ 2 นั้นจะทำให้แสงมีขนาดโตขึ้นจะเป็นการขยายสัญญาณแสง ส่วนการดูดกลืนพลังงานที่ระดับพลังงานที่ 1 แสงที่ใช้ปั๊มจะมีกำลังลดลง

จากเงื่อนไขของของการเกิดประชากรผกผัน คือ $N_2 - N_1 > 0$ จะต้องให้กำลังแสงที่ปั๊มมีค่ามากกว่ากำลังแสงขีดเริ่มของปั๊มดังสมการ

$$I_{th} = \frac{h\nu_p}{\left(\sigma_p^{(a)} - \sigma_p^{(e)}\right)\tau_2} \tag{2.51}$$

กำลังแสงขีดเริ่มของปั๊มจะมีลักษณะเช่นเดียวกับอัตราของสัญญาณแสง ($dI_s/dz > 0$) ดังสมการ

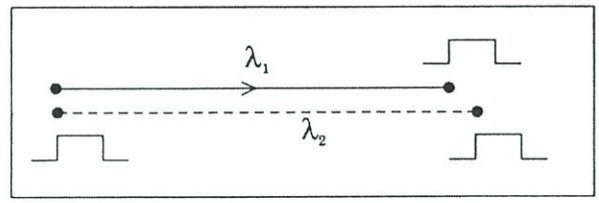
$$I_{th} = \frac{h\nu_p}{\tau_2} \frac{1}{\sigma_p^{(a)}\left(\frac{\sigma_s^{(e)}}{\sigma_s^{(a)}}\right) - \sigma_p^{(e)}} \tag{2.52}$$

2.9 การกระจายในใยแก้วนำแสง

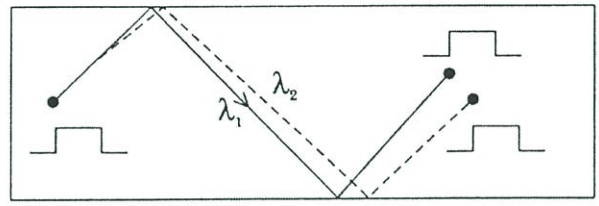
ขณะที่พัลส์เดินทางไปตามเส้นใยแก้วนั้น พัลส์แต่ละแบบจะขยายกว้างออกและทับกับพัลส์ที่อยู่ใกล้เคียงทำให้เกิดความผิดพลาดเกิดขึ้นที่เอาต์พุต การเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่าการเกิดการกระจายของพัลส์ (Dispersion) กลไกที่ทำให้เกิดการกระจาย มี 3 ชนิด คือ การกระจายเชิงวัสดุ (Material Dispersion) การกระจายของท่อนำคลื่น (Waveguide Dispersion) และการกระจายเชิงโหมด (Mode Dispersion) ดังรูปที่ 2.25

2.9.1 การกระจายเชิงวัสดุ

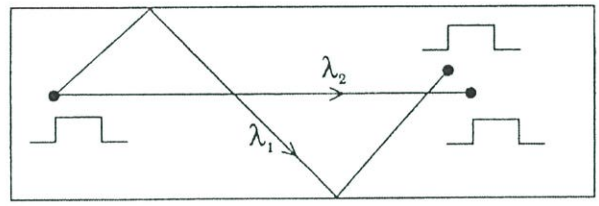
การกระจายแบบนี้เกิดขึ้นเนื่องจากดัชนีหักเหของซิลิกาที่ทำใยแก้วนำแสงเปลี่ยนตามความยาวคลื่นของแสงที่เดินทางผ่าน จึงทำให้ความเร็วของแสงในซิลิกาเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่น ในขณะเดียวกันแสงที่มาจากแหล่งกำเนิดแสงเช่น LED หรือ LD จะมีความยาวคลื่นไม่คงที่เพียงความยาวคลื่นเดียวจึงทำให้แสงที่ได้จากแหล่งกำเนิดแสงมีความกว้างของสเป็กตรัม ($\Delta\lambda$) ขึ้น ดังรูปที่ 2.26



(ก) การกระจายเชิงวัสดุ

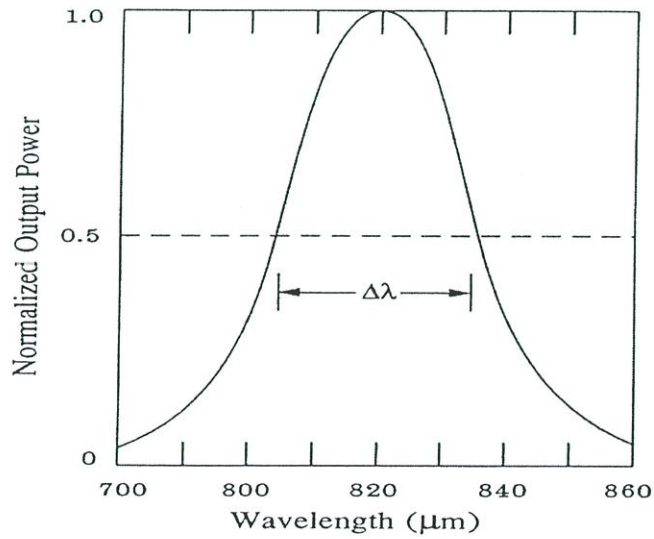


(ข) การกระจายของท่อนำคลื่น



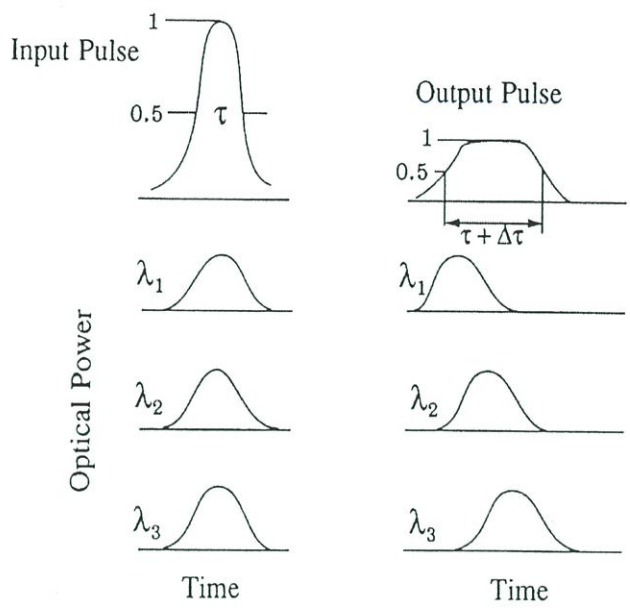
(ค) การกระจายเชิงโหมด

รูปที่ 2.25 แสดงการเกิดการกระจายของพัลส์สัญญาณแบบต่างๆ



รูปที่ 2.26 แสดงสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง

ดังนั้น พัลส์ที่เกิดจากแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันจะมีความเร็วในซิลิกาที่แตกต่างกัน เราพบว่าคือพัลส์ที่เกิดจากแสงคนละความยาวคลื่นจะเดินทางถึงจุดปลายในเวลาต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2. 27 แสดงการเกิดกระจายของพัลส์

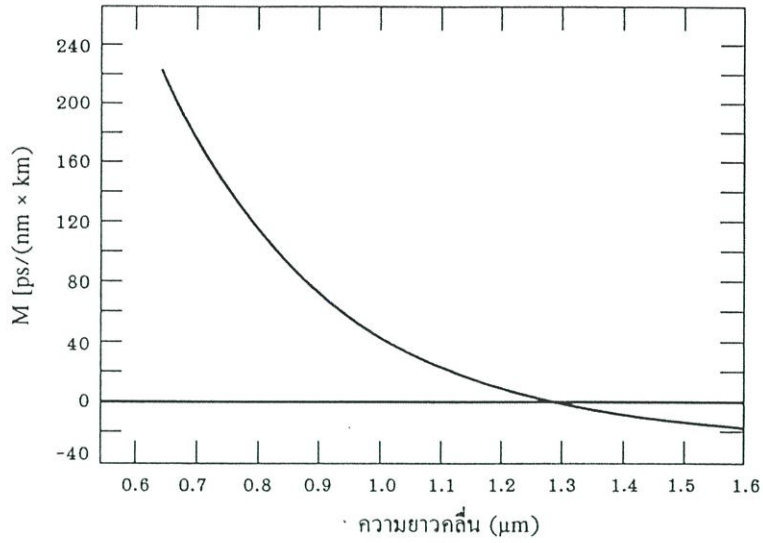
ความกว้างของพัลส์ ($\Delta\lambda$) ที่เพิ่มขึ้นต่อหนึ่งหน่วยความยาว (L) สามารถหาได้จากสมการ

$$\frac{\Delta\tau}{L} = \frac{\lambda}{c} n\Delta\lambda \qquad (2.53)$$

$$= \quad -M\Delta\lambda$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง c คือความเร็วแสงในสุญญากาศ n คือค่าดัชนีหักเหของวัสดุที่ทำใยแก้ว M คือค่าการกระจายเชิงวัสดุ และ $\Delta\lambda$ คือความกว้างของสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงโดยที่ค่า M จะมีค่าสัมพันธ์กับความยาวคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.28 ตัวอย่างการคำนวณหาความกว้างของพัลส์ที่เพิ่มขึ้น โดยพิจารณาในระบบเชื่อมสัญญาณที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดซิลิกายาว 2 กิโลเมตร ความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร และแหล่งกำเนิดแสง LED มีความกว้างของสเปกตรัม เท่ากับ 30 นาโนเมตร และมีค่า M ตามรูปที่ 2.28 เท่ากับ 90 ps/nm/km คือ

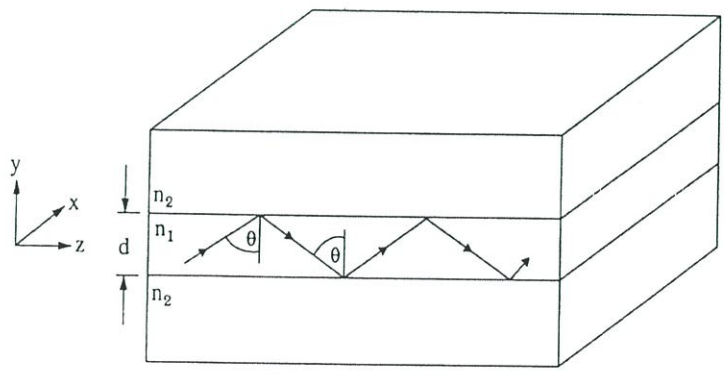
$$\begin{aligned} \Delta\tau &= -M\Delta\lambda\, L \\ &= 90 \text{ ps/nm/km} \times 30 \text{ nm} \times 2 \text{ Km} \\ &= 5.4 \text{ ns} \end{aligned} \qquad (2.54)$$



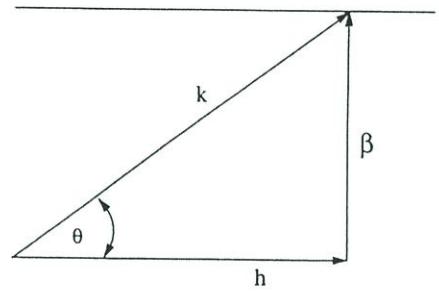
รูปที่ 2.28 แสดงการเกิดการกระจายเชิงวัสดุ

2.9.2 การกระจายท่อนำคลื่น

การกระจายแบบนี้จะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นเช่นเดียวกับกระจายเชิงวัสดุ เพื่อให้เข้าใจการกระจายแบบนี้จะต้องกล่าวถึงทางเดินของแสงโหมดต่างๆ ในท่อนำคลื่น โดยการสมมติว่ามีท่อนำคลื่นที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.29 เมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านชั้นกลางที่มีดัชนีหักเห n_1 ซึ่งชั้นนี้จะบางมากและมีความหนาเท่ากับ d โดยชั้นที่อยู่บนและล่างจะมีค่าดัชนีหักเห n_2 และ n_3 ตามลำดับ กรณีที่ $n_2 = n_3$ เรียกว่าเป็นโครงสร้างที่สมมาตร ถ้าให้ K เป็นเฟกเตอร์ของการแพร่ (Propagation Factor) ในตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n_1 โดยที่ K จะมีค่าเป็น $K = K_0 n_1$ เมื่อ K_0 คือเป็นแฟกเตอร์ของการแพร่ในอากาศ



รูปที่ 2.29 แสดงลักษณะการกระจายในท่อนำคลื่น



รูปที่ 2.30 แสดงมุมตกกระทบและทางเดินของแสง

ถ้าแสงเดินทางทำมุมตกกระทบ θ ดังรูปที่ 2.30 ก็จะสามารถกระจายทางเดินของแสงให้อยู่ในแนวตรงได้ และถ้าให้ β เป็นแฟกเตอร์ของการแพร่ในแนวตรงซึ่งทำให้ได้ว่า

$$\beta = K \sin \theta = K_o n_1 \sin \theta \qquad (2.55)$$

และ

$$h = K \cos \theta \qquad (2.56)$$

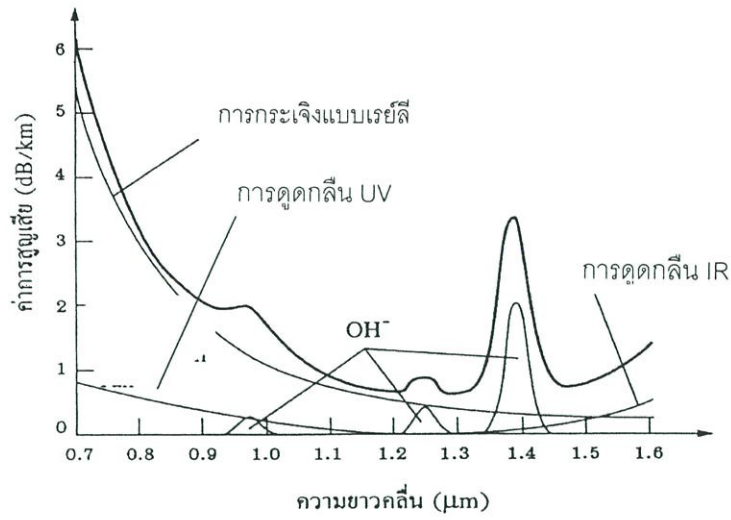
ในที่นี้ β เรียกว่าแฟกเตอร์ของการแพร่ตามยาว (Longitudinal) และให้ n_{eff} คือ ดัชนีเอฟเฟคทีพ (Effective Refractive Index) ซึ่งเท่ากับ $n_1 \sin \theta$ โดยที่ n_{eff} จะเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดโหมดต่างๆ ในการเคลื่อนที่ของแสง เมื่อค่า θ มีค่าอยู่ระหว่าง θ_cและ 90^0 ดังนั้น n_{eff} จะมีค่าอยู่ระหว่าง n_2 และ n_1

2.10 การลดทอน

กำลังของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง (P_i) ถูกส่งเข้าไปในใยแก้วนำแสงยาว L กิโลเมตรแล้ว กำลังของแสงที่ออกจากเส้นใยแก้วนำแสง (P_o) เมื่อพิจารณา $P_o < P_i$ โดยทั่วไปแล้วการสูญเสียกำลังของแสงในใยแก้วนำแสงจะถูกกำหนดเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอน (Attenuation Coefficient , α) ซึ่งมีหน่วยเป็นเดซิเบลต่อกิโลเมตร ซึ่งแทนด้วยความสัมพันธ์คือ

$$\alpha L = -10 \log \frac{p_o}{p_i} \qquad (2.58)$$

เมื่อการลดทอนกำลังของแสงในใยแก้วนำแสงนั้นมีผลมาจากการดูดกลืนแสงของในส่วนของแกนหรือแคลด การสะท้อนของรังสีของแสง และการโค้งงอของใยแก้วนำแสง



รูปที่ 2.31 แสดงการลดทอนของแสงในใยแก้วนำแสงสัมพันธ์กับความยาวคลื่น

2.10.1 การดูดกลืนของวัสดุ

พิจารณาการดูดกลืนในแก้วซิลิกาที่บริสุทธิ์ จากรูปที่ 2.31 จะเห็นว่าแก้วซิลิกาที่บริสุทธิ์จะดูดกลืนแสงน้อย และจะเห็นว่าอยู่ในช่วงของความยาวคลื่นระหว่าง 0.8 ถึง 1.6 ไมครอน จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวถูกเลือกเพื่อใช้งานทางด้านสื่อสาร การดูดกลืนแบบนี้จะมีค่ามากบริเวณความยาวคลื่นในช่วงของอัลตราไวโอเลต(Ultraviolet ,UV) และอินฟราเรด (Infrared , IR)

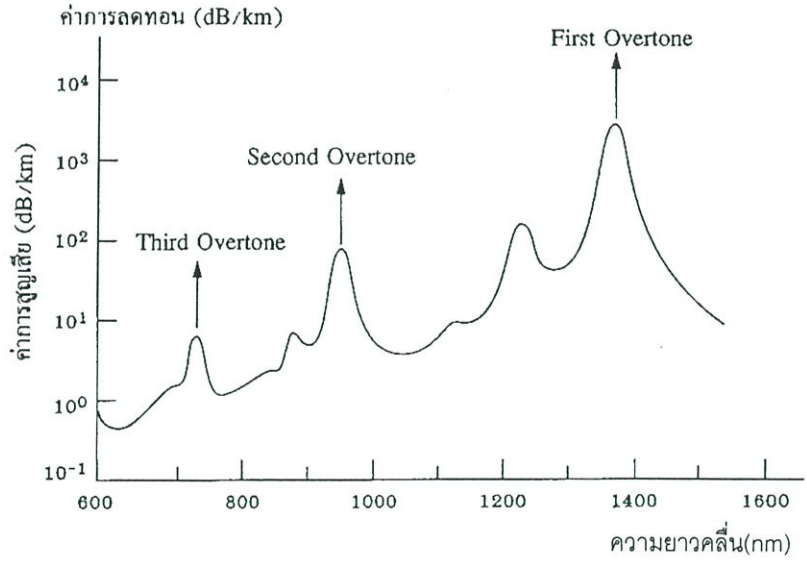
2.10.2 การดูดกลืนจากภายนอก

การลดทอนของแสงที่เกิดจากการดูดกลืนแสงนี้เกิดจากการที่แสงที่ใช้ผลิตเส้นใยแก้วนำแสงนั้นมีสารอื่นเจือปนอยู่ทำให้เกิดการดูดกลืนของแสงขึ้น โดยทั่วไปแล้วจะมีการดูดแสงอันเนื่องมาจากแก้วและสารเจือปน ตัวอย่าง เช่น กรณีที่มีสารเจือปนอยู่ 1 ในล้านส่วนก็จะทำให้เกิดการดูดกลืนแสงที่มีค่าดังตารางที่ 2.2

เทคนิคการผลิตใยแก้วนำแสงสมัยใหม่นั้นสามารถลดอิเล็กตรอนของสารเจือปนพวกนี้ได้จนถึงระดับที่ไม่มีผลต่อการดูดกลืนได้ อย่างไรก็ตามอิออนของการดูดกลืนตัวหนึ่งที่ไม่สามารถขจัดได้ก็คือ ไฮดรอกซิล (Hydroxyl,OH) ดังแสดงในรูปที่ 2.32 จุดยอดของการสั่นพื้นฐานของอิเล็กตรอนไฮดรอกซิล จะเกิดที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ 2.27 ไมโครเมตร และแสดงพื้นฐานการสั่นที่ 4.2 ไมโครเมตร ซึ่งการสั่นพื้นฐานนี้จะทำให้เกิดโอเวอร์โทน (Overtone) ที่ฮาร์มอนิกต่างๆ ดังนี้ (First Overtone) 1.38 ไมโครเมตร , (Second Overtone) 0.95 ไมโครเมตรและ (Third Overtone) 0.72 ไมโครเมตร และเมื่อรวมระหว่างการสั่นพื้นฐานและโอเวอร์โทนจะได้จุดยอดที่ 1.24 , 1.13 และ 0.88 ไมโครเมตรตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 การสูญเสียจากการดูดกลืนและความยาวคลื่นต่างๆ ของสารเจือปน

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



รูปที่ 2.32 แสดงการดูดกลืนจากไฮดรอกซิล

2.10.3 การสูญเสียจากการโค้งงอ

การสูญเสียแบบโค้งงอ (Bending Loss) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ การโค้งงอชนิดมหภาคหรือแมคโครเบนด์ (Macrobend) ที่มีรัศมีของส่วนโค้งมากกว่า 10 มิลลิเมตร และการโค้งงอชนิดจุลภาคหรือไมโครเบนด์ (Microbend) ที่มีรัศมีของส่วนโค้งน้อยกว่า 10 มิลลิเมตร การโค้งงอชนิดแมคโครเบนด์จะเกิดขึ้นเมื่อเส้นใยแก้วม้วนอยู่รอบหลอดม้วน เนื่องมาจากการถูกโค้งงอตามมุมต่างๆ การเกิดการสูญเสียอันเนื่องมาจากโค้งงอแบบนี้รัศมีของแสงที่เคลื่อนที่ในใยแก้วตรงบริเวณที่

โค้งงอ ซึ่งทำให้แสงตกกระทบตรงรอยต่อระหว่างแกน และแคลด ที่มีค่าน้อยกว่ามุมวิกฤต จึงทำให้รังสีของแสงกระจายออกไปนอกเส้นใยแก้วดังแสดงในรูปที่ 2.33

พิจารณาการสูญเสียจากไมโครเบนด์ คือ

$$L_f = N < h^2 > \frac{a^4}{D^6 \lambda^3} \left[\frac{E_b}{E_f} \right]^{3/2} \qquad (2.58)$$

N คือ จำนวนโค้งของการโค้งงอต่อความยาว

h คือ ส่วนสูงเฉลี่ยของเคเบิลที่โค้งงอ

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเคเบิลใยแก้วนำแสง

a คือ รัศมีของแกนใยแก้วนำแสง

λ คือ ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง

E_b คือ ค่าอิลาสติกโมดูลัสของใยแก้ว

E_f คือ ค่าอิลาสติกโมดูลัสของเคเบิล

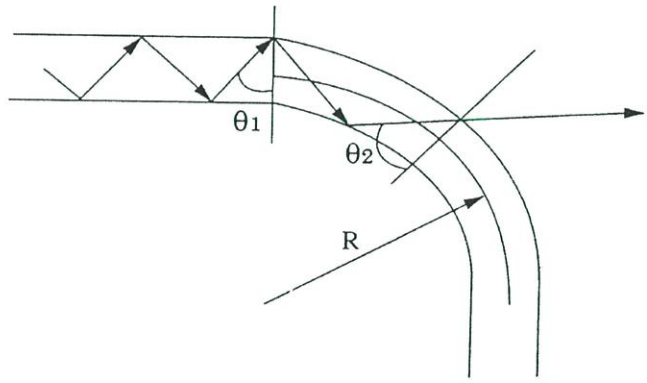
พิจารณาค่าการสูญเสียจากแมคโครเบนด์ แปรผันกับ $\exp^{-R/R_c}$

R คือ รัศมีของการโค้งงอ

เมื่อ $R_c = a/(NA)^2$

A คือ รัศมีของแกนใยแก้ว

NA คือ นิวเมอริคัลอเปอร์เจอร์



θ_1 และ θ_2 คือมุมตกกระทบของแสงภายในใยแก้วนำแสง

รูปที่ 2.33 แสดงทางเดินของแสงในใยแก้วนำแสงที่โค้งงอ

การสูญเสียของกำลังแสงจะมีค่าต่ำสำหรับแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำ และถ้าผลต่างของค่าดัชนีหักเหระหว่างแกนและแคลดมีค่ามากก็จะทำให้การสูญเสียมีค่าสูง เส้นใยแก้วชนิดโหมดเดียว

ทำงานที่ความยาวคลื่นยาวๆ จะไวต่อการสูญเสียต่อการโค้งงอ และเส้นใยแก้วที่ถูกพันอยู่รอบแกนม้วนที่มีรัศมี 10 เซนติเมตร ซึ่งนับว่าสั้นนั้นก็ยังสามารถแก้ไขได้โดยการตัดใยแก้วนำแสงส่วนที่โค้งงอทิ้งไป การโค้งงอ เช่น รัศมีของแกน จุดต่อระหว่างแกน และแคลดที่ขรุขระ เป็นต้น ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการผลิตนอกจากนั้นการที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแก้วไม่เท่ากันตลอดทั้งเส้นก็ทำให้แสงบางส่วนกระจายออกมาจากใยแก้วนำแสงได้เช่นกัน

2.10.4 การลดทอนรวม

พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอนทั้งหมด (α) ตามสมการ

$$\alpha = \alpha_A + \alpha_B + \alpha_C \qquad (2.60)$$

เมื่อ α_A, α_B และ α_C คือค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอนภายในใยแก้วนำแสงที่แสงเดินทางผ่านไปที่ตำแหน่ง A, B และ C ค่าการลดทอนที่วัดได้สำหรับเส้นใยแก้วชนิดโหมดเดียว จะพบว่าการลดทอนต่ำสุดจะอยู่ที่ความยาวคลื่น $\lambda = 1.55$ ไมโครเมตร ซึ่งมีค่าประมาณ 0.2 เดซิเบล / กิโลเมตร จึงเป็นเหตุหนึ่งที่เคเบิลใยแก้วใต้ทะเลใช้ที่ความยาวคลื่น 1.55 ไมโครเมตรเพื่อให้มีการสูญเสียต่ำที่สุด

2.10.5 การลดทอนและวัสดุใยแก้ว

พี ซี เอส (Plastic Clad Silica,PCS) เป็นเส้นใยแก้วที่มีการสูญเสียสูงมากซึ่งเป็นผลเนื่องจากการดูดกลืนของแคลด ทั้งนี้เพราะเส้นใยพลาสติก (Plastic Fiber) จะมีการสูญเสียมากที่สุด ใยแก้วฟลูออไรด์(Fluoride Glass Fiber) จะมีการสูญเสียในช่วงความยาวคลื่นของอินฟราเรดที่มีค่าต่ำกว่าเส้นใยแก้วชนิดอื่นๆ จึงทำให้สามารถใช้ในช่วงความยาวคลื่นมากกว่า 1.6 ไมโครเมตร เดียวกันก็สามารถลดการสะท้อนเรย์ลีที่ความยาวคลื่นยาวๆ ได้ด้วย

การแบ่งความยาวคลื่นแสงในระบบการสื่อสารนั้นจะสามารถแบ่งตามความยาวคลื่นได้ดังนี้

O-Band (Original band) อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 1260 –1360 นาโนเมตร

S-Band(Short Wavelength Band) อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 1360-1530 นาโนเมตร

C-Band (Conventional Wavelength Band) อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 1530-1565 นาโนเมตร

L-Band (long Wavelength Band) อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 1565 –1625 นาโนเมตร

2.11 เลเซอร์ไดโอด

เลเซอร์ไดโอดนั้นมีหลายชนิดในส่วนนี้เราจะกล่าวถึงเลเซอร์ไดโอดแบบสารกึ่งตัวนำและแบบควอนตัมเวลส์

2.11.1 เลเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำ

เลเซอร์อีกชนิดหนึ่งมีความสำคัญมากคือ เลเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) หรือ **เลเซอร์ไดโอด** (Laser Diode) ซึ่งมีการผลิตเป็นรอยต่อ p-n โครงสร้างแบบเฮเทโร และสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง และเมื่อใช้โครงสร้างแบบดับเบิลเฮเทโร (Double Heterjunction) ทำให้เลเซอร์ไดโอดทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง และเปล่งแสงแบบต่อเนื่อง (CW) ได้และมีอายุการใช้งานยาวนาน

เลเซอร์ไดโอดมีโครงสร้างรอยต่อแบบ p-n ทำจากสารประกอบกึ่งตัวนำ เช่น GaAs, InP มีขนาดเล็กมาก สิ่งประดิษฐ์มีปริมาตรเพียงไม่ถึง 1 ลูกบาศมิลลิเมตร บรรจุอยู่ในกล่องโลหะ (Metal Package) ที่มีขาติดอยู่เพื่อใช้ป้อนกระแสไฟฟ้า

คุณสมบัติเด่นของเลเซอร์ไดโอดซึ่งเลเซอร์ชนิดอื่นไม่มีได้แก่

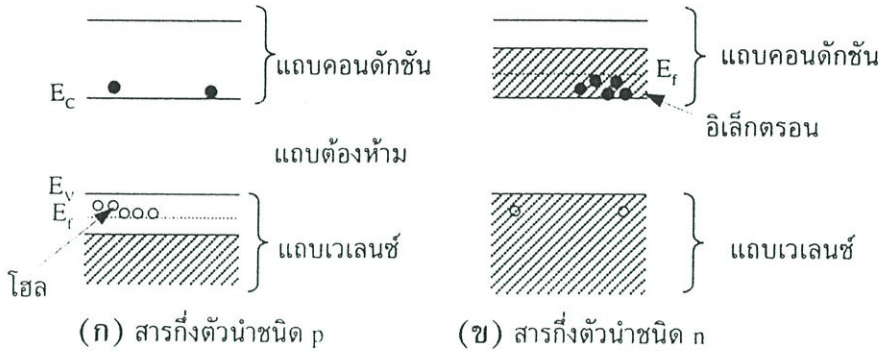
1) มีขนาดเล็กและเบามาก
2) มีประสิทธิภาพสูง
3) สามารถมอดูเลตความเข้มของการเปล่งแสงด้วยกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง
4) มีอายุการใช้งานยาวนาน
5) ผลิตจำนวนมากได้ง่ายและราคาถูก

ปัจจุบันเลเซอร์ไดโอดถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น การสื่อสารด้วยแสง เลเซอร์ดีสก์ ซีดีรอม การแพทย์ การบันเทิง ฯลฯ

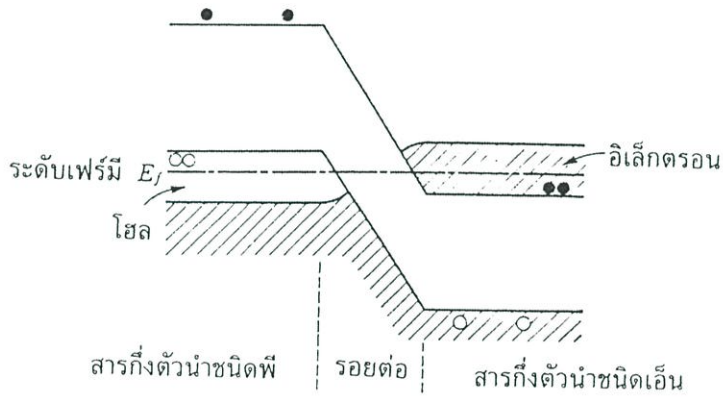
กลไกการเปล่งแสงของเลเซอร์ไดโอด โครงสร้างพื้นฐานของเลเซอร์ไดโอด คือ รอยต่อ p-n ของสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรง (Direct Band Gap) เช่น GaAs สารเจือปนสำหรับชนิด p ได้แก่ Zn หรือ Be และสารเจือปนสำหรับชนิด n ได้แก่ Te หรือ Si ลักษณะของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n แสดงในรูปที่ 2.34 เนื่องจากในการโดปสารเจือปนนั้นจะโดปมาก ดังนั้นพลังงานเฟร์มี (E_f) จึงล้ำเข้าไปในแถบเวเลนซ์ สำหรับชนิด p และเข้าไปในแถบคอนดักชันสำหรับชนิด n เราเรียกสารกึ่งตัวนำที่โดปมากเช่นนี้ว่า "Degenerated Semiconductor" เมื่อนำสารกึ่งตัวนำทั้ง 2 ชนิด มาสร้างเป็นรอยต่อ p-n แบบไดโอดจะได้แถบพลังงานดังที่แสดงในรูปที่ 2.35

ในการกระตุ้นพาหะเพื่อให้เกิดเลเซอร์นั้น จะใช้วิธีฉีดกระแสไฟฟ้าจากภายนอกให้ไหลเข้าสู่รอยต่อ p-n โดยป้อนแรงดันไฟฟ้าไบแอสตรง คือ ป้อนแรงดันบวกเข้าด้าน p และป้อนแรง

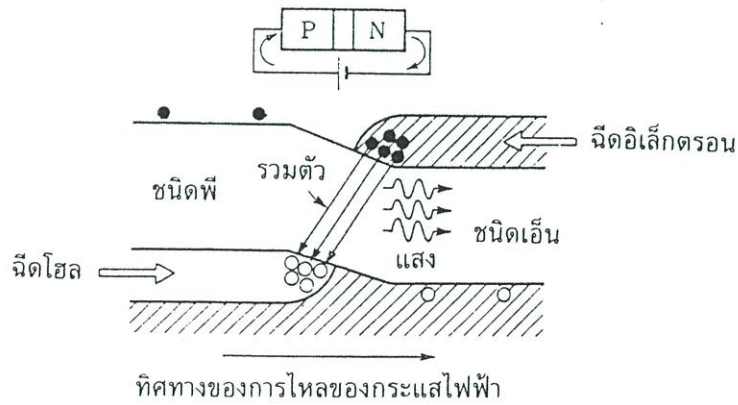
ดันลบเข้าด้าน n จะทำให้แถบพลังงานเปลี่ยนไปดังรูปที่ 2.36 อิเล็กตรอนจะไหลเข้าด้าน n เข้าสู่รอยต่อ และโฮลจะไหลจากด้าน p เข้าสู่รอยต่อ



รูปที่ 2.34 ลักษณะแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่โดปสารเจือปนด้วยความเข้มข้นสูงมาก

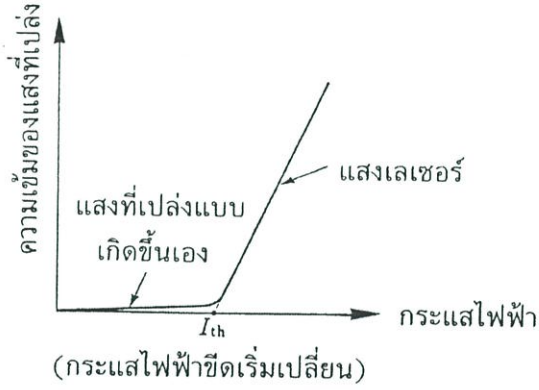


รูปที่ 2.35 รอยต่อพีเอ็นที่โดปสารเจือปนด้วยความเข้มข้นสูงมาก



รูปที่ 2.36 รอยต่อพีเอ็นที่กำเนิดแสงเลเซอร์ในเลเซอร์ไดโอด

ที่บริเวณรอยต่อจะมีคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลเกิดขึ้นจำนวนมากเมื่ออิเล็กตรอนและโฮลรวมตัวกัน (Recombine) จะเกิดการเปล่งแสงออกมาด้วยพลังโฟตอนเท่ากับช่องพลังงานของ ของรอยต่อ $(E_g = hv)$ หลักการเปล่งแสงเช่นนี้คล้ายกับกรณีของ LED แต่การทำให้เกิดเลเซอร์จะต้องฉีดกระแสไฟฟ้าให้มากเป็นพิเศษดังที่แสดงในรูปที่ 2.37 ถ้ากระแสไฟฟ้ามีค่าน้อย การเปล่งแสงจะเป็นแบบเกิดขึ้นเอง(Spontaneous) และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้สูงกว่ากระแสไฟฟ้าขีดเริ่มเปลี่ยน(Threshold Current ; I_{th}) จะเกิดปรากฏการณ์ประชากรผกผัน(Population Inversion) กล่าวคือถ้าจำนวนคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลมีมากกว่าค่าหนึ่งๆ ก็จะทำให้เกิดการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลและเกิดการเปล่งแสงเร่งเร้า (Stimulated Emission) ที่ด้านข้างภายนอกของรอยต่อ p-n จะถูกออกแบบให้เป็นผิวมันแบบกระจก ให้ทำหน้าที่เป็นออปติคัลเรโซเนเตอร์(Optical Resonator) แสงที่สะท้อนกลับไปมาภายในเรโซเนเตอร์นี้ จะกลายเป็นแสงเลเซอร์วิ่งเข้าสู่ภายนอกในที่สุด

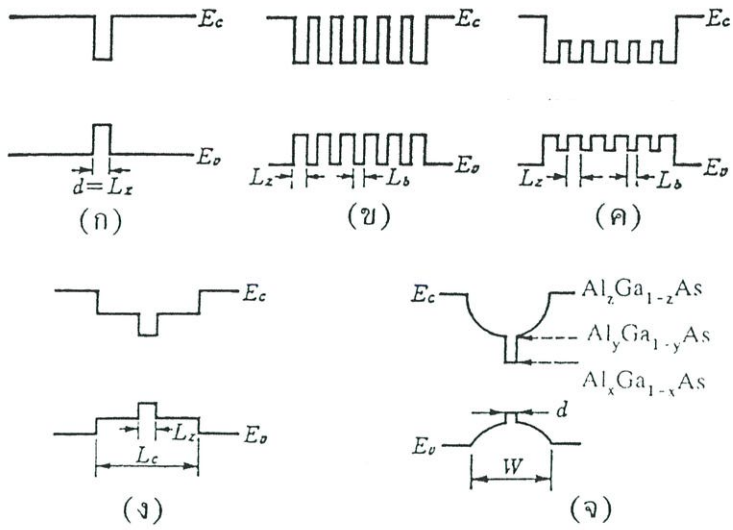


รูปที่ 2.37 ลักษณะสมบัติของความสัมพันธ์ของความเข้มแสงและกระแสไฟฟ้าในเลเซอร์ไดโอด

2.11.2 เลเซอร์ไดโอดชนิดควอนตัมเวลล์

โดยทั่วไปเราเรียกเลเซอร์ไดโอดซึ่งชั้นแอกทิฟที่เปล่งแสงมีโครงสร้างเป็นควอนตัมเวลล์ว่า "เลเซอร์ไดโอดชนิดควอนตัมเวลล์" (Quantum Well Laser Diode) คำว่าควอนตัมเวลล์นิยมใช้ตัวอักษรย่อว่า QW ถ้าชั้นแอกทิฟดังกล่าวมีชั้นบ่อเพียงชั้นเดียวจะเรียกว่า เลเซอร์ไดโอดชนิดซิงเกิลเวลล์(Single Quantum well) และชั้นแอกทิฟมีชั้นบ่อหลายชั้นจะเรียกว่า เลเซอร์ไดโอดมัลติควอนตัมเวลล์ (Multi – Quantum well)

โครงสร้างของเลเซอร์ไดโอดชนิดควอนตัมเวลล์ มีลักษณะพื้นฐานคล้ายกับเลเซอร์ไดโอดชนิดดับเบิลเฮเทโร แต่แตกต่างกันตรงแอกทิฟถูกออกแบบให้บางลง เหลือระดับหลายสิบนาโนเมตรและชั้นควอนตัมเวลล์อาจถูกออกแบบให้มีความแตกต่างกันออกไปอีกตามวัตถุประสงค์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.38 แสดงแถบพลังงานของเลเซอร์ไดโอดที่มีชั้นแอคทิฟเป็นควันตัมเวลส์แบบต่างๆ

รูปที่ 2.38 (ก) แสดง "เลเซอร์ไดโอดชนิดซิงเกิลควอนตัมเวลล์" ในโครงสร้างนี้ถ้าความหนา L_Z ของชั้นบ่อลดลง จะทำให้เกิดผลเสียคือ แฟกเตอร์การกักแสง ลดลงด้วย และส่งผลให้กระแสไฟฟ้าเริ่มเปลี่ยน J_{th} สูงขึ้น วิธีการแก้ปัญหานี้ทำได้โดยใช้รูปที่ 2.43 (ข,ค)

รูปที่ 2.38(ข) แสดง "เลเซอร์ไดโอดชนิดมัลติควอนตัมเวลล์" ในโครงสร้างนี้มีบ่อศักย์อยู่จำนวนมากหลายชั้น ทำให้เฟกเตอร์การกักแสงมีค่าเพิ่มขึ้น

รูปที่ 2.38(ค) แสดง "เลเซอร์ไดโอดชนิดมอดิไฟด์มัลติควอนตัมเวลล์" (Modified Multi-Quantum Well) ลักษณะเด่นคือ ช่องว่างพลังงานของชั้นกำแพงจะแคบกว่าของชั้นแคลด กระแสไฟฟ้าขีดเริ่มเปลี่ยนของเลเซอร์ไดโอดชนิดนี้ลดลงถึงระดับ 250 A/cm^2 และเพื่อให้การฉีดอิเล็กตรอนเข้าบ่อศักย์แต่ละบ่อมีความสม่ำเสมอ ความหนาของชั้นบ่อจะถูกออกแบบให้บางด้วย

รูปที่ 2.38(ง) แสดง "เลเซอร์ไดโอดชนิด SCH" (Separate Confinement Heterostructure) โครงสร้างนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการให้บริเวณที่มีการกักแสงและบริเวณที่มีการกักพาหะถูกแยกออกจากกัน เพื่อส่งผลให้แฟกเตอร์การกักแสงเพิ่มขึ้น ชั้นที่มีช่องว่างพลังงานแคบที่สุดคือชั้นกักพาหะ และที่มีช่องว่างพลังงานกว้างถัดไปคือชั้นกักแสง อนึ่งโครงสร้างนี้ถือว่าอยู่ในประเภทซิงเกิลควอนตัมเวลล์

รูปที่ 2.38(จ) แสดง "เลเซอร์ไดโอดชนิด GRIN-SCH" (Graded Index Separate Confinement Heterostructure) จุดเด่นของโครงสร้างนี้คือ ช่องว่างพลังงานของชั้นกักแสงถูกออกแบบให้มีรูปร่างแบบพาราโบลา ทำให้ค่าดัชนีหักเหของแสงชั้นนี้มีรูปร่างแบบพาราโบลาด้วย ข้อดีของโครงสร้างนี้คือ แฟกเตอร์การกักแสงมีค่ามาก และแปรผันตรงกับความหนาของชั้นบ่อ ด้วยความสัมพันธ์แบบยกกำลังหนึ่ง ดังนั้นแม้ว่าเราจะลดความหนาของชั้นบ่อลง แต่ก็ไม่ได้ทำให้กระแสไฟฟ้าขีดเริ่มเปลี่ยนมีค่าเพิ่มขึ้นมากนัก

บทที่3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

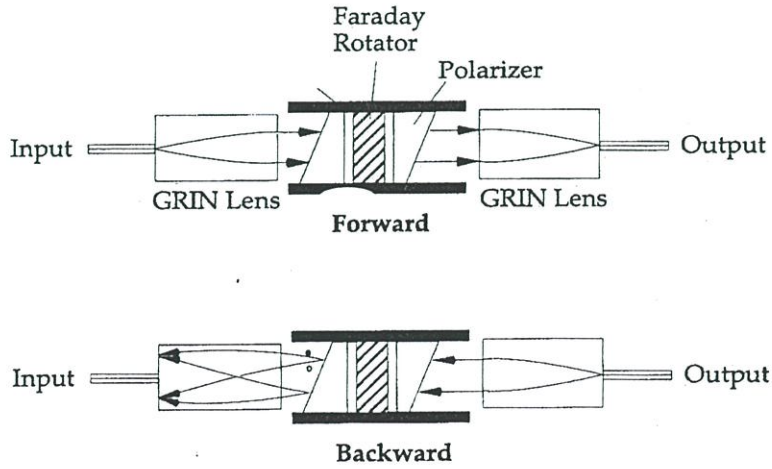
ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย รวมไปถึงการออกแบบและขั้นตอนในการติดตั้ง การเชื่อมต่อ และการทดลองในส่วนต่างๆ ดังนี้

3.1 อุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย

3.1.1 ออปติคัลไอโซเลเตอร์ (Optical Isolator)

ออปติคัลไอโซเลเตอร์เป็นอุปกรณ์ทางแสงที่ยอมให้แสงเดินทางผ่านไปได้ทิศทางเดียวเท่านั้น คือ แสงสามารถเดินทางผ่านทางอินพุตไปยังเอาต์พุตได้ แต่แสงไม่สามารถเดินทางจากเอาต์พุตผ่านมาที่อินพุต ในระบบการสื่อสารด้วยแสง เช่น ระบบดิจิตอลความเร็วสูง หรือระบบแอนาล็อกอินเท็นซิตีมอดูเลชัน ถ้ามีแสงสะท้อนกลับจากอุปกรณ์ต่างๆ ย้อนกลับเข้าสู่เลเซอร์ไดโอด จะทำให้การทำงานของเลเซอร์ผิดเพี้ยนไปได้ และจะทำให้มีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในระบบ

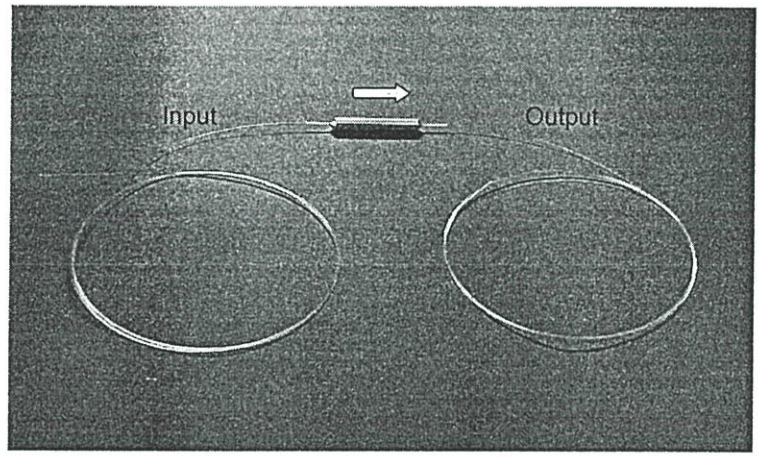
การป้องกันมิให้มีแสงสะท้อนกลับสามารถทำได้ 2 วิธีคือ วิธีปรับปรุงอุปกรณ์ที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสะท้อนของแสง และการใช้อุปกรณ์ตัดแสงสะท้อน ซึ่งก็จะเป็นออปติคัลไอโซเลเตอร์ใส่เข้าไปในระบบก็จะสามารถแก้ปัญหานั้นได้ จากรูปที่ 3.1 โครงสร้างของตัวออปติคัลไอโซเลเตอร์ทั่วไปจะประกอบด้วย โพลาไรเซอร์(Polarizer) ฟาราเดย์โรเตเตอร์(Faraday Rotator) และเลนส์(Grin Lens)จะทำหน้าที่รวมแสง โดยสร้างจากหลักการของคุณสมบัติโพราไรเซชันของแสง (Polarization) คือแสงที่สามารถเดินทางผ่านโพลาไรเซอร์ได้ จะต้องมีแนวโพลาไรเซชันตรงกับตัวโพลาไรเซอร์ เมื่อแสงเดินทางไปข้างหน้า(Forward) แสงจะผ่านเลนส์ไปที่ตัวโพราไรเซอร์ตัวแรก จากนั้นแสงที่ทะลุผ่านจะวิ่งต่อไปยังฟาราเดย์โรเตเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้แนวโพลาไรเซชันของ



รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของไอโซเลเตอร์

แสงหมุนเปลี่ยนไป และแสงจะผ่านไปยังโพลาไรเซอร์ตัวที่สอง ซึ่งจะมีแนวโพลาไรเซชันตรงกับแสงที่ถูกเปลี่ยนแนวโพราไรเซชันโดยฟาราเดย์โรเตเตอร์ แสงก็จะผ่านเลนส์ออกไปทางเอาต์พุต (Output)ได้ แต่เมื่อมีแสงสะท้อนกลับมา(Backward) แสงจะผ่านโพลาไรเซอร์ตัวที่สองได้แต่เมื่อถึงฟาราเดย์โรเตเตอร์จะทำให้แนวโพราไรเซชันหมุนไป แต่จะไม่ผ่านโพราไรเซอร์ตัวแรกได้เนื่องจากแนวโพราไรเซชันไม่ตรงกัน จึงทำให้ไม่มีแสงผ่านไปที่ด้านอินพุต(Input)

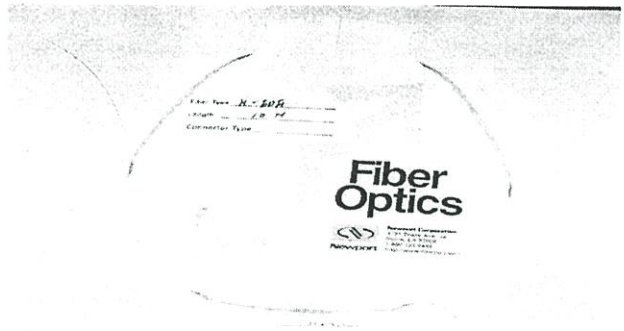
ในงานวิจัยนี้ใช้ใยแก้วนำแสงไอโซเลเตอร์ที่ใช้กับความยาวคลื่น 1550 nm เป็นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว(SMF) ความยาว 1.5 เมตร แสดงได้ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งจะมีอยู่สองพอร์ทคือพอร์ทอินพุตและพอร์ทเอาต์พุต ในการใช้งานต้องต่อให้ถูกตามทิศทางถึงจะสามารถใช้งานได้



รูปที่ 3.2 แสดงใยแก้วนำแสงไอโซเลเตอร์

3.1.2 ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป

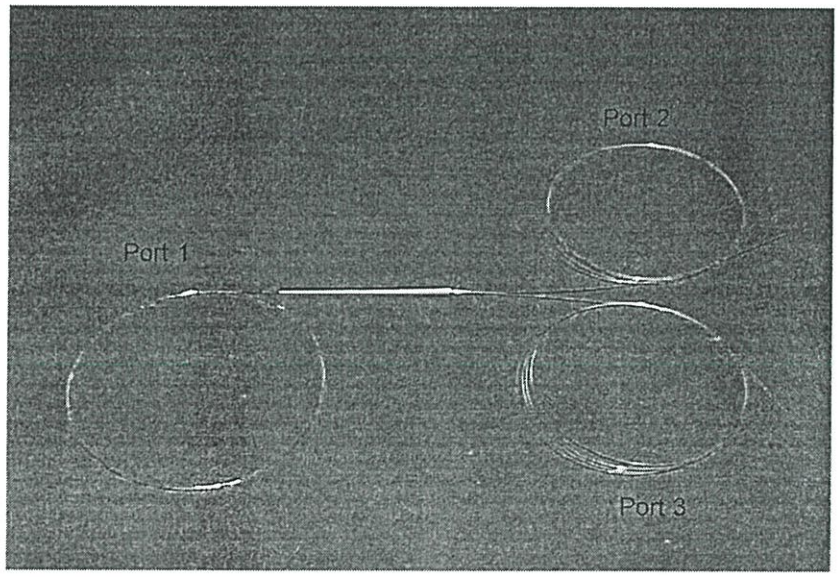
เป็นใยแก้วนำแสงชนิดพิเศษที่มีการเจือธาตุเออร์เบียมในตัววัสดุที่ใช้ทำเป็นแกนของใยแก้วนำแสง ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษสามารถทำให้เป็นตัวกลางที่ทำให้เกิดเลเซอร์ได้ ซึ่งจะนำมาประยุกต์ใช้ในการขยายสัญญาณแสง โดยจะต้องมีการปั๊มด้วยเลเซอร์ เพื่อทำให้เกิดประชากรผกผันและทำการกระตุ้นด้วยสัญญาณแสงเพื่อทำให้เกิดเลเซอร์ ในงานวิจัยนี้เราใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดปของ บริษัทนิวพอร์ท เป็นใยแก้วนำแสงที่โดปด้วยธาตุเออร์เบียมเป็น 220 ppm ใช้งานที่ความยาวคลื่น 980/1550 นาโนเมตร ความหมายคือ ที่ความยาวคลื่น 980 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ใช้ปั๊ม และที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นของสัญญาณแสงที่ต้องการขยาย เป็นใยแก้วนำแสงที่มีดัชนีหักเหแบบขั้นบันได มีรัศมีของแคลดิง 125 ไมโครเมตร ตัดความยาวคลื่น(Cut-off Wavelength) ที่ 880 นาโนเมตร ค่าการสูญเสียอยู่ที่ 3.1 dB/km จากรูปที่ 3.3 แสดงใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดปยาว 10 เมตร



รูปที่ 3.3 แสดงใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป

3.1.3 คู่ควบใยแก้วนำแสง (Fiber Optic Coupler)

คู่ควบใยแก้วนำแสง เป็นอุปกรณ์พาสซีพทางแสง ทำหน้าที่แยกแสงหรือรวมแสงเข้าด้วยกัน แสงสามารถวิ่งได้ทั้งสองทิศทาง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุด ทั้งยังเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับระบบสวิตชิ่ง (Switching) และมัลติเพล็กซ์ (Multiplexing)ได้ด้วย ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงคู่ควบใยแก้วนำแสง 1x2

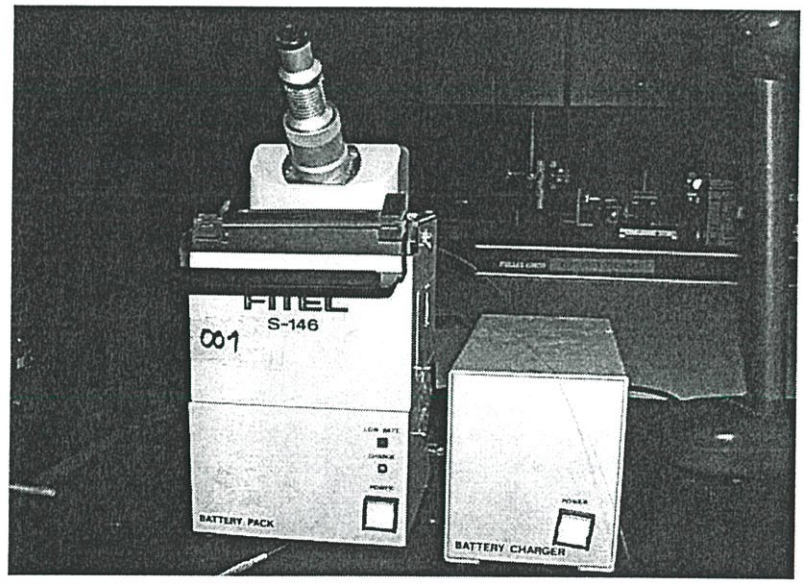
ในงานวิจัยนี้ใช้ใยแก้วนำแสงคู่ควบใยแก้วนำแสง แบบ 1x2 เป็นใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดียวใช้งานที่ความยาวคลื่น 1310/1550 นาโนเมตร มีค่าการแยกแสงที่ 50/50 % คือความเข้มแสงที่วิ่งเข้าทางพอร์ท 1 มีค่าเป็น 100 % เมื่อผ่านไปยังพอร์ท 2 จะมีความเข้มแสง 50 % และพอร์ท 3 จะมีความเข้มแสง 50 % ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของคู่ควบใยแก้วนำแสง

Operation Wavelength	1310+/-40 nm		1550+/-40nm	
Output Port / Input Port	Insertion Loss (dB)		Insertion Loss (dB)	
	O1	O2	O1	O2
I1	3.09	3.10	3.05	3.22

3.1.4 เครื่องเชื่อมต่อใยแก้วนำแสง(Fusion Splicer)

การเชื่อมต่อด้วยวิธีการหลอมรวมเป็นวิธีการเชื่อมต่อเส้นในแก้วนำแสงสองเส้นเข้าด้วยกันโดยการให้ความร้อนที่ปลายเส้นใยแก้วนำแสง จากนั้นปลายของเส้นใยแก้วนำแสงจะหลอมติดกันการเชื่อมต่อในลักษณะนี้เป็นการเชื่อมต่อแบบถาวร เส้นใยแก้วนำแสงที่เชื่อมต่อกันแล้วดูเสมือนว่าเป็นเส้นเดียวกัน การสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยวิธีนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.01 – 0.2 dB ในขั้นตอนของการเชื่อมต่อนั้น ความร้อนที่ทำให้ปลายเส้นใยแก้วนำแสงอ่อนตัวนั้นจะมาจากประกายไฟที่เกิดจากการอาร์คระหว่างขั้วอิเล็กโทรดภายในเครื่อง เครื่องเชื่อมต่อใยแก้วนำแสงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องเชื่อมต่อใยแก้วนำแสง(Fusion Splicer)

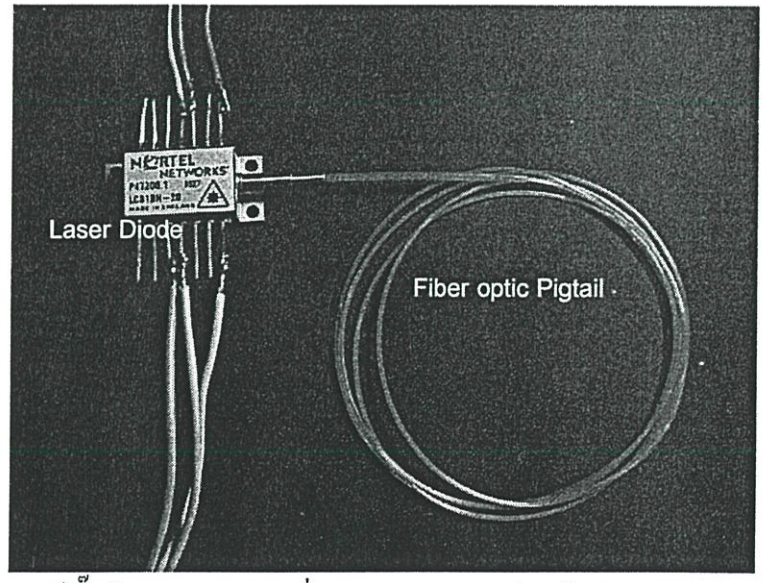
3.1.5 เลเซอร์ 980 nm

ในงานวิจัยนี้ใช้เลเซอร์ความยาวคลื่น 980 นาโนเมตร ในการปั๊มให้กับใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดปซึ่งเป็นเลเซอร์ไดโอดสารชนิดสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพิกเทล(Pigtail) คือจะมีการต่อกับเส้นใยแก้ว

นำแสงเพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งานกับเส้นใยแก้วนำแสง มีลักษณะดังรูปที่ 3.6 เป็นเลเซอร์ที่ใช้งานในช่วงอุณหภูมิ –20 °C ถึง +750 °C กำเนิดแสงแบบต่อเนื่อง(CW) กำลังแสงสูงสุด 100 mW ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของเลเซอร์ 980 nm

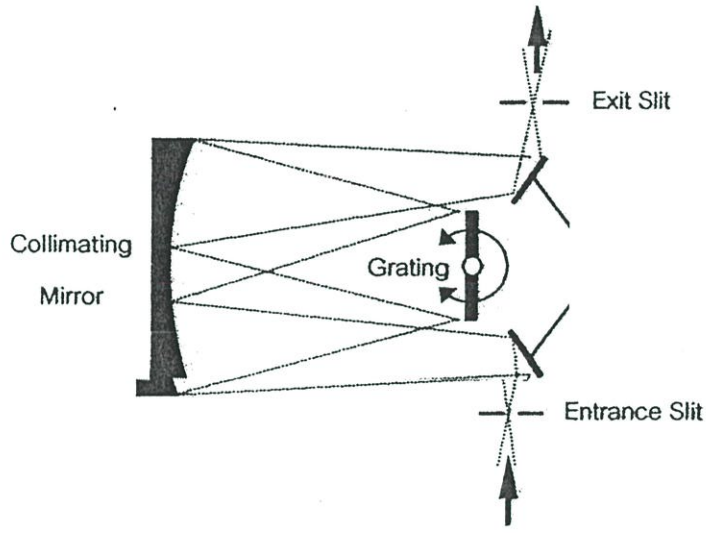
Parameter	Min	Typ	Max	Unit
Threshold current (1th)	-	15	20	mA
Operating drive current (1f) E , F, G 250	-	-	210	mA
Forward voltage	1.8	-	2.5	V
Peak wavelength(λp) Power in	975	-	985	nm
wavelength band 975 - 985nm	85	95	-	%
Monitor detector responsivity	2.5	15	25	μA/mW
Monitor dark current	-	-	50	nA
Thermistor resistance (at 250C)	9.5	10	10.5	kΩ
Intended laser operating temperature	20	25	30	°C
Laser temperature, R = 10 kΩ	23.5	-	26.5	A
Heatpump current ($\Delta T = 50^0C$ If = 300mA)	-	-	1.2	A
Heatpump voltage ($\Delta T = 50^0C$ If = 300mA)	-	-	2.5	V



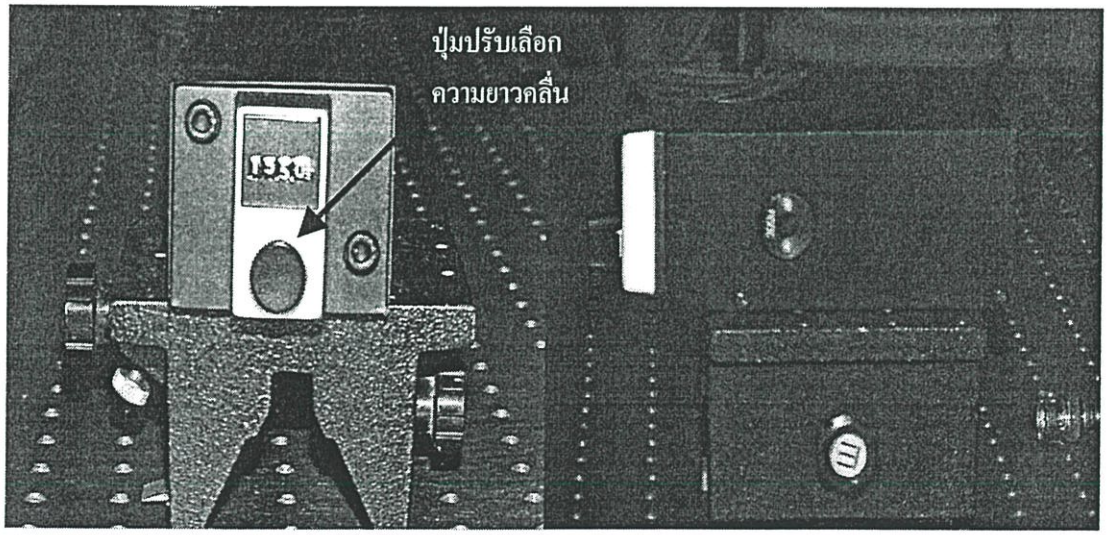
รูปที่ 3.6 แสดงเลเซอร์ ปั๊มโมดูลความยาวคลื่น 980 nm และชุดใยแก้วนำแสง(Fiber optic pigtail)

3.1.6 โมโนโครมาเตอร์(Monochromator)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กรองแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆให้ผ่านได้โดยสามารถเลือกความยาวคลื่นตามที่ต้องการได้ ไดอะแกรมของโมโนโครมาเตอร์แสดงในรูปที่ 3.7 หลักการทำงานคือเมื่อมีแสงเข้ามาทางสลิท(Entrance Slit) แสงจะสะท้อนผ่านกระจกไปตกกระทบที่กระจกคอลลิเมตติง(Collimating Mirror) และสะท้อนกลับไปยังเกรตติง(Grating) โดยเกรตติงจะเป็นตัวปรับเพื่อเลือกความยาวคลื่นให้สะท้อนกลับไปยังกระจกคอลลิเมตติง แล้วสะท้อนไปยังกระจกผ่านออกไปยังสลิท(Exit Slit) โมโนโครมาเตอร์ที่ใช้งานสามารถแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 แสดง ไดอะแกรมของโมโนโครมาเตอร์



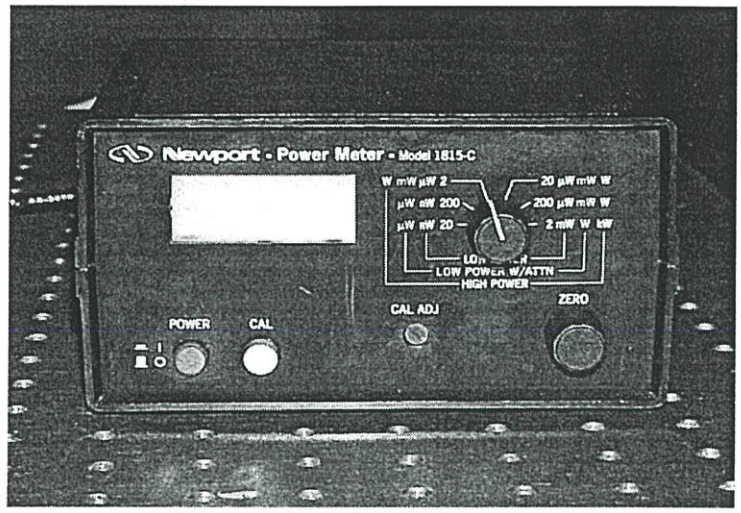
รูปที่ 3.8 แสดงโมโนโครมาเตอร์

3.1.7 มิเตอร์วัดกำลังแสง

เป็นเครื่องมือในการวัดกำลังแสงซึ่งต้องใช้ร่วมกับโฟโตดีเท็คเตอร์ มิเตอร์วัดกำลังแสงที่ใช้คือรุ่น 1815-C (Newport) จากตารางที่ 3.3 ซึ่งสามารถวัดกำลังแสงในช่วง(Full Scale Reading) 20 nW–2 mW (Low-Power) 20 μW–2 W (Low-Power w/Attn) Attn คือการใส่ตัวลดทอนกำลังเข้าไปที่โฟโตดีเท็คเตอร์ และ 2 W–2 kW (High-Power) อัตราในการสุ่มสัญญาณ(Sampling Rate) 2.5 Hz ความถี่สูงสุด(Bandwidth) ที่สามารถวัดได้ 9 kHz ให้สัญญาณเอาต์พุต (Analog Output) 0-2 V ความแน่นอนของสัญญาณไฟตรง(DC Accuracy) < ±0.5%, ±0.25% ใช้งานที่ช่วงอุณหภูมิ (Operating Temperature) 18°C ถึง 28°C และมีลักษณะดังรูปที่ 3.9

ตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียดของมิเตอร์วัดกำลังแสง

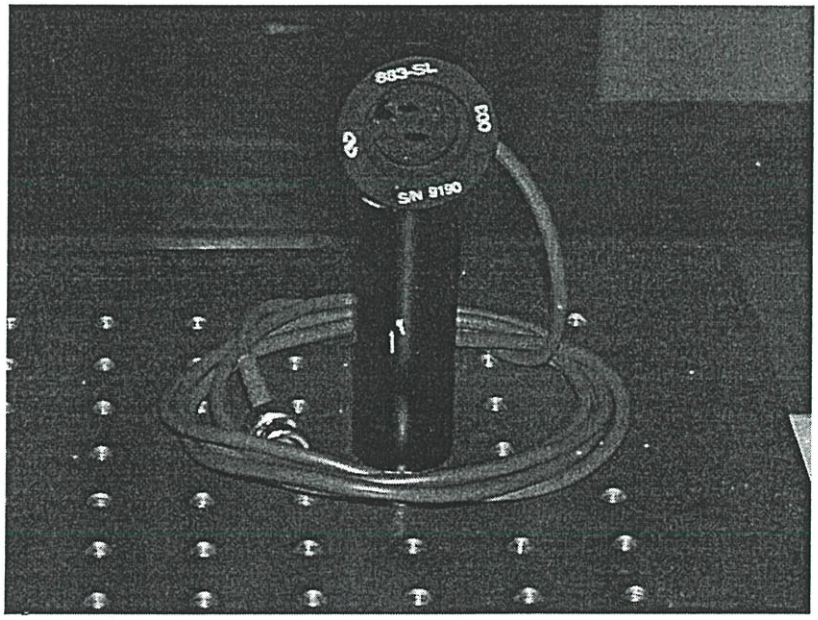
Display Type		3.5-digit LCD
Sampling Rate		2.5 Hz
Full Scale Readings:		
	Low-Power	20 nW–2 mW
	Low-Power w/Attn	20 μW–2 W
	High-Power	2 W–2 kW
DC Accuracy		< ±0.5%, ±0.25% Typ.
Bandwidth		9 kHz max
Analog Output		0-2 V an 1 mW
Input Connector		BNC
Battery Life		130-180 Stunden
Battery		6 x AA Alkali
Weight [lb (kg)]		1.5 (0.7)
Dimension (W x H x D) [in. mm)]		3.3 (83) x 6.0 (152) x 7.0 (178)
Operating Temperature		18°C to 28°C
Storage Temperature		25°C b is 60°C,



รูปที่ 3.9 แสดงมิเตอร์วัดกำลังแสง

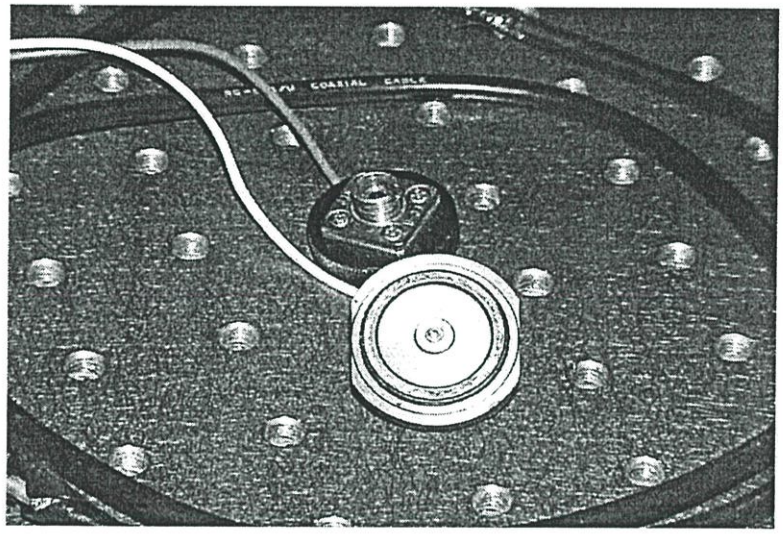
3.1.8 โฟโตดีเท็คเตอร์

เป็นอุปกรณ์ในการตรวจจับแสงในงานวิจัยนี้ใช้โฟโตดีเท็คเตอร์รุ่น 818-SL(Newport) เป็นชนิดสารกึ่งตัวนำซิลิกอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.33 cm ตอบสนองที่ความยาวคลื่น 400-1100 นาโนเมตร กำลังแสงที่สามารถวัดได้อยู่ในช่วง (Power Range) –90 dBm ถึง +33 dBm ความละเอียด (Resolution) 0.1 pW ความแน่นอน(Accuracy) ±2% ความเป็นเชิงเส้น(Linearity) ±0.5% สามารถแสดงลักษณะได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงโฟโตดีเท็คเตอร์รุ่น 818-SL(Newport)

และอีกตัวที่ใช้คือ รุ่น MA9723A (Anrisu) มีรายละเอียดดังนี้ เป็นชนิดสารกึ่งตัวนำเยอร์มาเนียม ตอบสนองที่ความยาวคลื่น 750-1800 นาโนเมตร กำลังแสงที่สามารถวัดได้อยู่ในช่วง (Power Range) –60 dBm ถึง +33 dBm สำหรับเป็นคลื่นต่อเนื่อง(CW) และ–60 dBm ถึง +0 dBm สำหรับคลื่นที่มีการมอดูเลต(MOD) ความละเอียด(Resolution) 0.1 pW ความแน่นอน(Accuracy) ±5% ความเป็นเชิงเส้น(Linearity) ±0.5% เส้นผ่านศูนย์กลาง 1mm ทำงานที่ช่วงอุณหภูมิ 0°C ถึง 50°C สามารถแสดงลักษณะได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงโฟโตดีเท็คเตอร์รุ่น MA9723A (Anrisu)

3.1.9 อุปกรณ์อื่นๆ

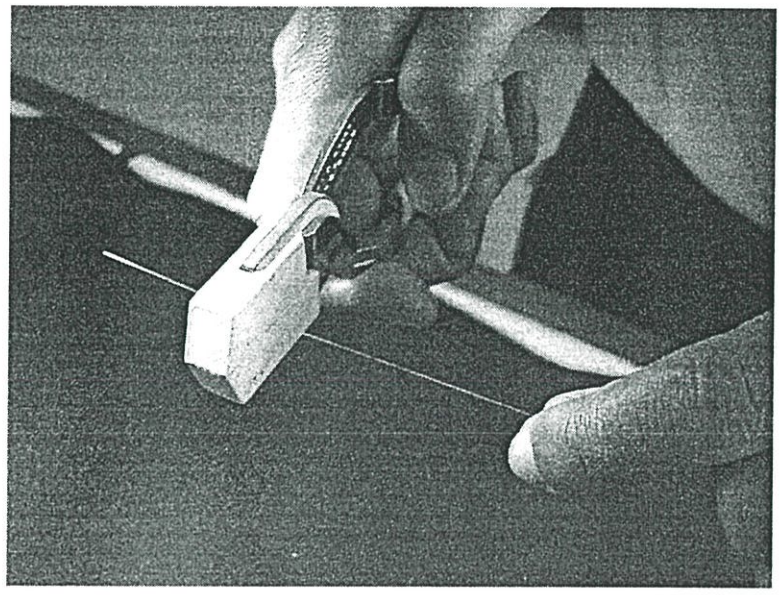
- ใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดียว
- เลเซอร์ไดโอด (1550 nm)
- วงจรขับเลเซอร์ไดโอด
- คอนเน็คเตอร์ FC, ST
- โอทีดีอาร์
- ออสซิลโลสโคป
- มีดตัดใยแก้ว
- คีมปอกใยแก้ว
- คีมปอกเคเบิลใยแก้ว
- เพาเวอร์ซับพลาย
- กระดาษขัดใยแก้ว
- แอลกอฮอล์
- ตัวจับใยแก้วนำแสง (Microblock fiber launch kit)
- อุปกรณ์ในการจับยึด ขาตั้ง
- อื่นๆ

3.2 วิธีการเชื่อมต่อใยแก้วนำแสง

3.2.1 วิธีการเชื่อมต่อแบบหลอมรวม

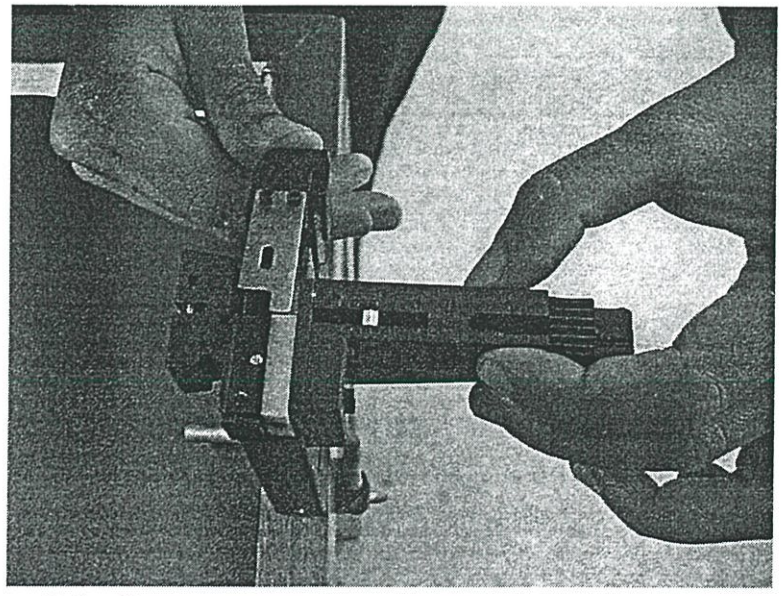
การเชื่อมต่อแบบหลอมรวมเป็นการเชื่อมต่อแบบถาวรโดยมีขั้นตอนดังนี้

1) นำใยแก้วนำแสงที่ต้องการเชื่อมต่อมาปอกส่วนที่หุ้มภายนอกออกจนถึงชั้นของแคลดดิง โดยการใช้มีดปอกแสดงดังรูปที่ 3.12



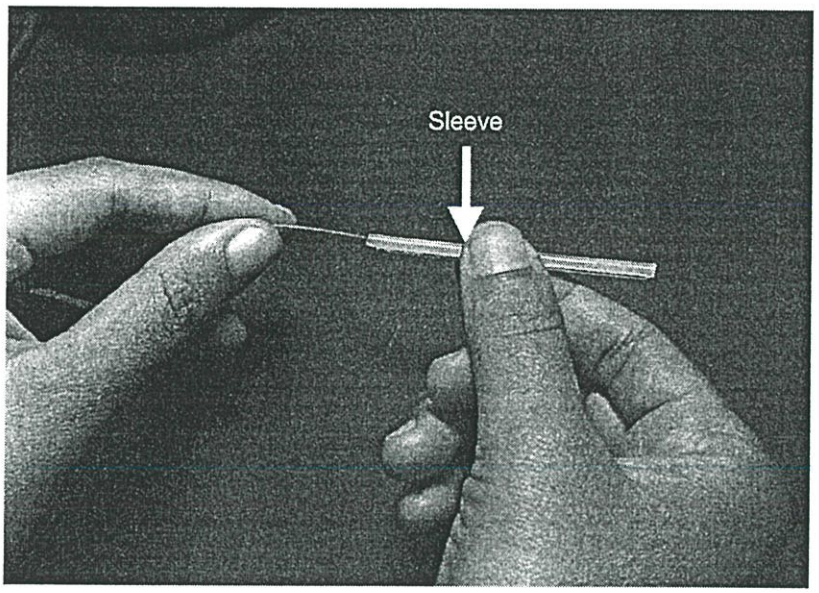
รูปที่ 3.12 แสดงการปอกใยแก้วนำแสง

2) ทำความสะอาดใยแก้วโดยใช้แอลกอฮอล์ ทำความสะอาด จากนั้นนำไปตัดโดยใช้ที่ตัดใยแก้วเพื่อให้ได้รอยตัดที่เรียบซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.13 ทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์อีกครั้ง แล้วนำไปส่องดูรอยตัดด้วยกล้อง



รูปที่ 3.13 แสดงการตัดใยแก้วนำแสง

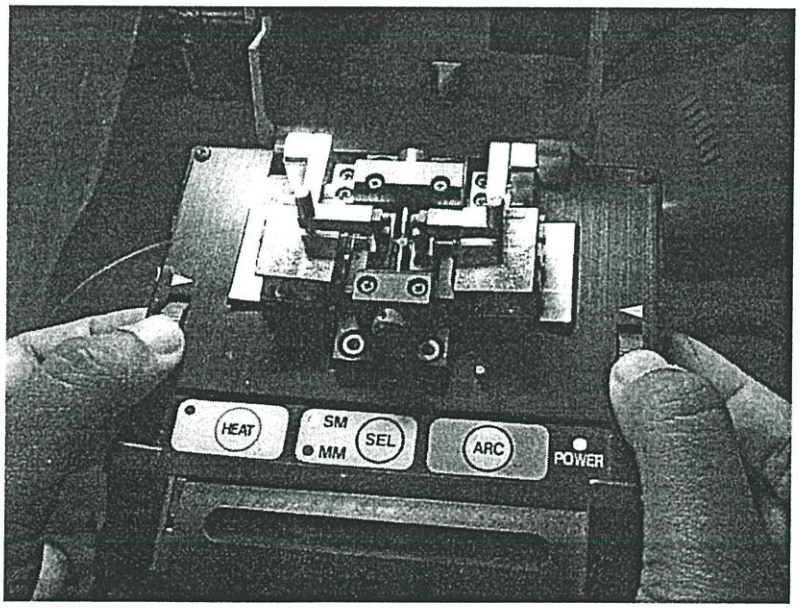
3) ทำการสวมสะลีฟ(Sleeve) เข้าไปที่ใยแก้วนำแสงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงการสวมสะลีฟเข้าไปที่ใยแก้วนำแสง

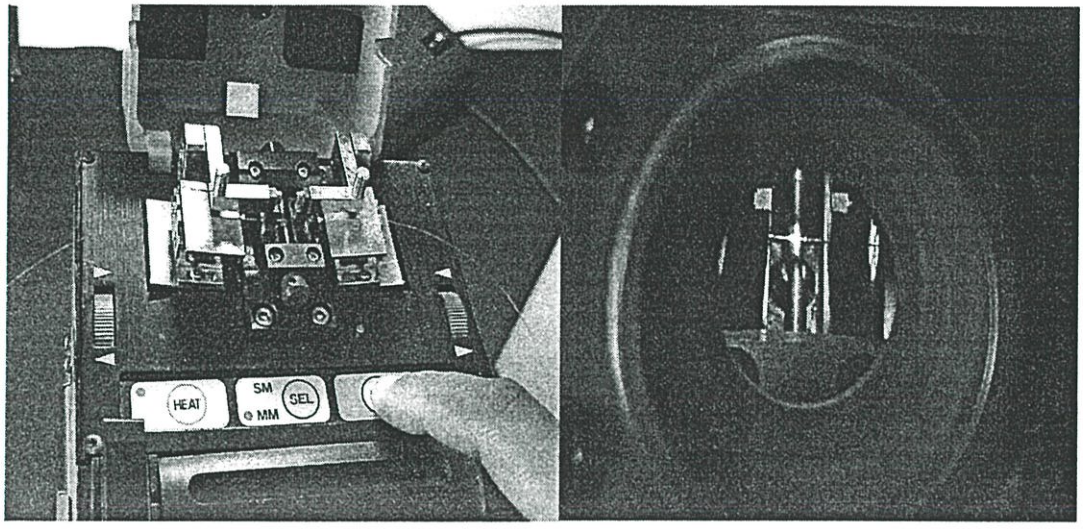
4) นำใยแก้วทั้งสองเส้นที่ต้องการจะเชื่อมต่อไปติดตั้งบนเครื่องเชื่อมต่อดังรูปที่ 3.15 แล้วทำ

การปรับระยะให้ปลายใยแก้วทั้งสองข้างสัมผัสกันพอดี



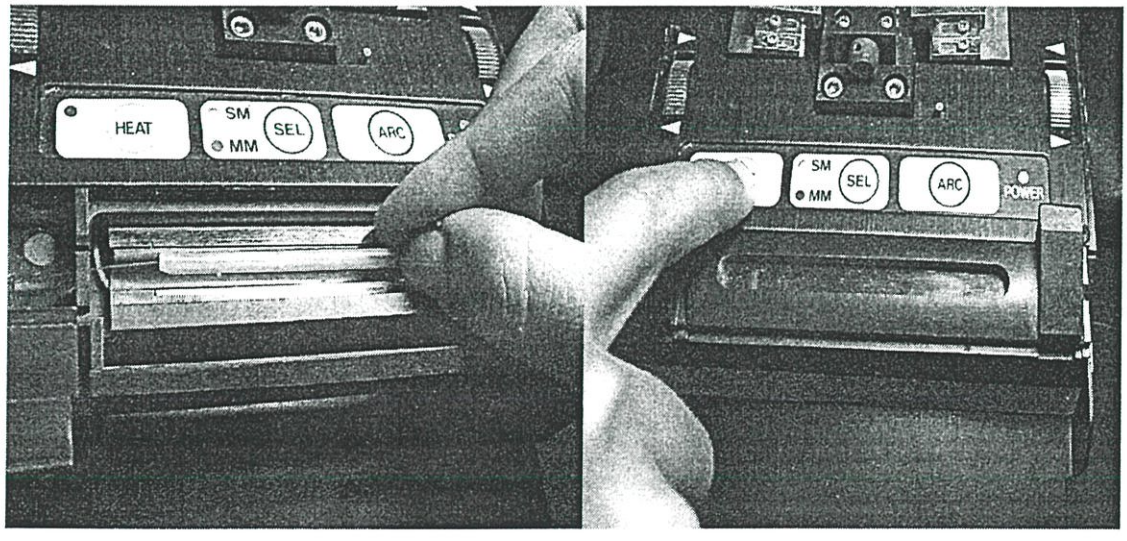
รูปที่ 3.15 แสดงการติดตั้งใยแก้วนำแสงบนเครื่องเชื่อมต่อ

5) กดปุ่ม ARC เพื่อทำการเชื่อมต่อซึ่งจะทำให้เกิดการหลอมด้วยความร้อนจากการอาร์ค แล้วจะทำให้ใยแก้วนำแสงหลอมติดกันแสดงได้ดังรูปที่ 3.16



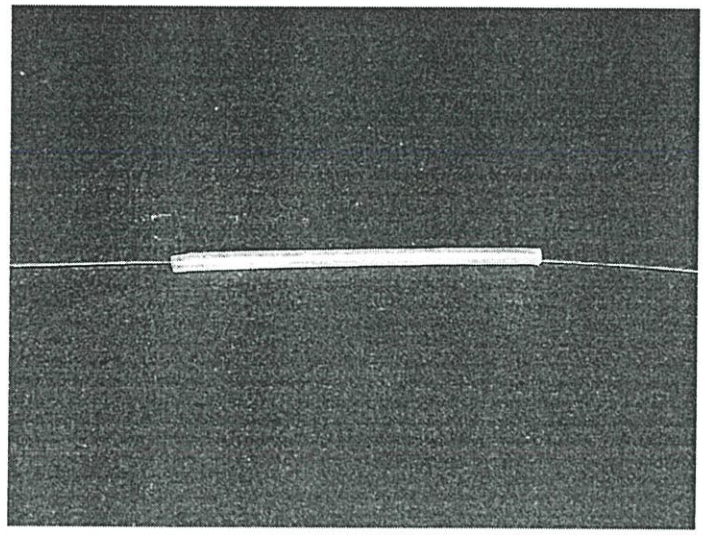
รูปที่ 3.16 แสดงการกดปุ่ม ARC และการหลอมรวมของใยแก้วนำแสง

6. นำใยแก้วนำแสงออกจากจุดเชื่อมต่อแล้วดึงสะลีฟมาอยู่ตรงกึ่งกลางของรอยต่อแล้วนำสะลีฟไปวางลงตรงช่องให้ความร้อนเพื่อทำให้สะลีฟติดกับใยแก้วนำแสงโดยการกดปุ่ม HEAT แสดงได้ดังรูปที่ 3.17 ซึ่งตัวสะลีฟจะเป็นตัวป้องกันไม่ให้รอยเชื่อมต่อขาด



รูปที่ 3.17 แสดงการให้ความร้อนกับสะลีฟให้ติดกับเส้นใยแก้วนำแสง

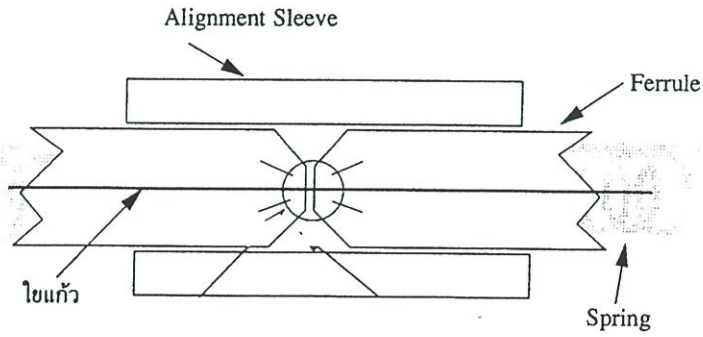
7) นำใยแก้วนำแสงออกจากช่องให้ความร้อนซึ่งเราก็จะได้ใยแก้วนำแสงที่เชื่อมต่อกันและที่รอยต่อก็ จะหุ้มด้วยสะลีฟดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แสดงใยแก้วนำแสงที่ได้หลังจากการเชื่อมต่อแบบหลอมรวม

3.2.2 การเชื่อมต่อด้วยหัวเชื่อมตัว (Connector)

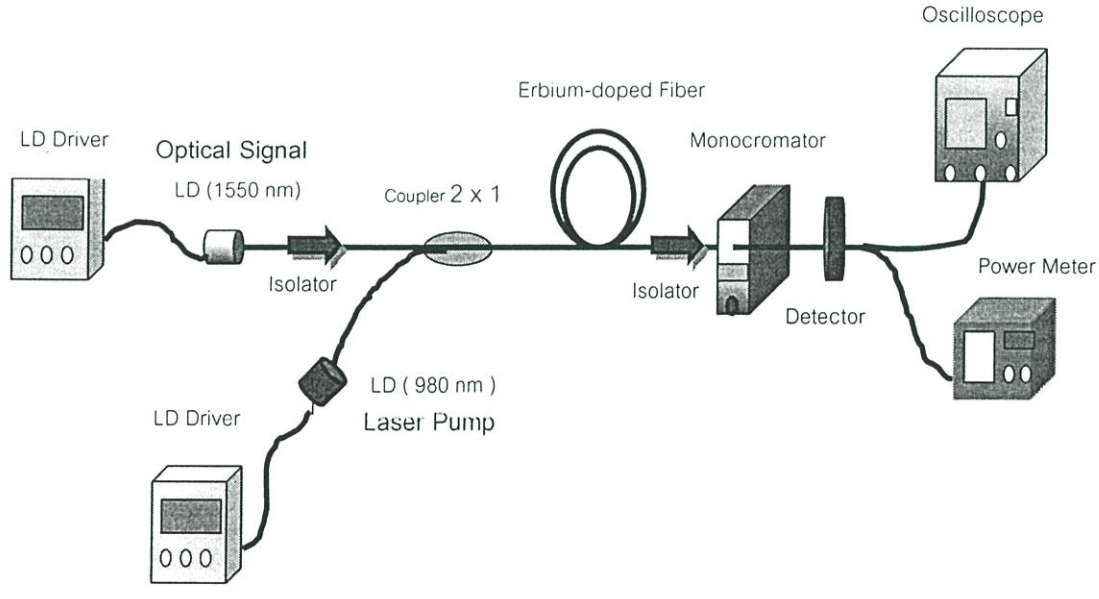
นอกจากการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงเข้าด้วยกันตามวิธีการหลอมรวมดังที่กล่าวมาแล้ว การเชื่อมเส้นใยแก้วนำแสง ยังสามารถทำได้โดยการใช้หัวเชื่อมต่ออีกด้วย การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง แบบใช้หัวเชื่อมต่อ ซึ่งอำนวยความสะดวกให้กับผู้ใช้ในการถอดเปลี่ยนได้ตามความจำเป็น ในปัจจุบันการผลิตหัวเชื่อมต่อสำหรับเส้นใยแก้วนำแสงมีหลายแบบ ซึ่งสามารถเลือกใช้ตามสภาพการใช้งานเป็นหลัก โดยทั่วไปหัวเชื่อมต่อถูกออกแบบมาเพื่อช่วยทำให้ปลายของใยแก้วนำแสงทั้งสองเส้นอยู่ใกล้กันมากที่สุด แสดงดังรูปที่ 3.19 ภายในหัวต่อจะมีสปริง(Spring)เพื่อทำให้ปลายของใยแก้วทั้งสองติดกันอย่างสนิท ส่วนสลีฟ(Alignment Sleeve) เป็นช่องทำให้เฟอร์รูล(Ferrule) ทั้งสองข้างเข้ามาชนกันพอดี นอกจากนี้หัวเชื่อมต่อยังต้องมีคุณสมบัติอื่นๆอีก เช่น แข็งแรง ทนทาน เกิดการสูญเสียต่ำและมีราคาที่เหมาะสม



รูปที่ 3.19 แสดงการวางตัวของใยแก้วนำแสงของหัวเชื่อมต่อ

3.3 การออกแบบและการสร้างระบบ

หลังจากศึกษาหลักการและทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ทำการออกแบบและก็สร้างระบบขึ้นมา ในงานวิจัย เราจะแบ่งระบบการออกแบบสองส่วนคือ ส่วนแรกเป็นระบบทางแสง และส่วนที่สอง เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนแรกจะเป็นวิธีการเชื่อมต่อใยแก้วโดยใช้เครื่องเชื่อมจะต้องใช้ทักษะ ในการทำ ต้องมีการทดลองเพื่อให้ได้รอยต่อที่มีคุณภาพดีคือมีการสูญเสียน้อยที่สุด บางส่วนต้อง เชื่อมต่อโดยใช้คอนเน็คเตอร์ ในส่วนที่เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะเป็นวงจรขับเลเซอร์ จะเป็นตัว ความคุมการทำงานของเลเซอร์ การเลือกอุปกรณ์ที่เหมาะสม ในการวัดสัญญาณ เช่นออสซิโลส โคบ เครื่องวัดกำลังแสง การใช้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสง แนวคิดในการออกแบบคือเรา ต้องการปั๊มด้วยแสงเลเซอร์เข้าไปในใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป โดยใช้เลเซอร์ที่ความยาวคลื่น 980 นาโนเมตร และป้อนสัญญาณแสงความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตรเข้าไปยังใยแก้วนำแสง เออร์เบียมโดปเนื่องจากเราต้องการที่จะป้อนแสงสองความยาวคลื่นเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงเส้น เดียวกันดังนั้นเราต้องใช้อุปกรณ์ที่ใช้ในการรวมแสงจากสองแหล่งคือใช้คู่ควบใยแก้วนำแสง ใน การเชื่อมต่อจะมีแสงบางส่วนสะท้อนกลับมาที่ยังแหล่งกำเนิดสัญญาณแสงเราต้องมีการใส่ไอโวเล เตอร์เข้าไปตรงจุดนั้นเพื่อให้แสงวิ่งไปในทิศทางเดียว ซึ่งจะติดตั้งสองจุดคือที่พอร์ทของคู่ควบที่ ป้อนสัญญาณแสงความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร และปลายใยแก้วนำแสงที่ตำแหน่งของสัญญาณ แสงเอาต์พุต ระบบการทดลองจะมีส่วนประกอบดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 แสดงไดอะแกรมของระบบการขยายสัญญาณแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป

จากรูปที่ 3.20 ตัวขับเลเซอร์(LD Driver) จะทำหน้าที่ความคุมการทำงานของเลเซอร์ไดโอด เราสามารถที่จะควบคุมกำลังแสงของเลเซอร์โดยการควบคุมกระแสที่ป้อนให้กับเลเซอร์ได

โอดที่ตัวขับเลเซอร์ ในระบบเราใช้เลเซอร์สองตัว คือตัวแรกเป็นเลเซอร์ที่ใช้เพื่อปั๊ม(Pump Laser) 980 นาโนเมตร และเลเซอร์เพื่อป้อนสัญญาณแสง (Optical Signal) ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร สัญญาณแสงจะผ่านไปยังไอโซเลเตอร์(Isolator) คู่ควบ 2x1 (Coupler) ทำหน้าที่รวมแสงทั้งสองความยาวคลื่นเข้าไปที่ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป(Erbium-doped Fiber) แล้วก็ผ่านไอโซเลเตอร์ทางด้านเอาต์พุต ผ่านโมโนโครมาเตอร์(Monocromator) ไปตกกระทบที่โฟโตดีเท็คเตอร์(Detector) แล้วก็แสดงผลโดยมิเตอร์วัดกำลังแสง(Power Meter) หรือออสซิโลสโคป (Oscilloscope)

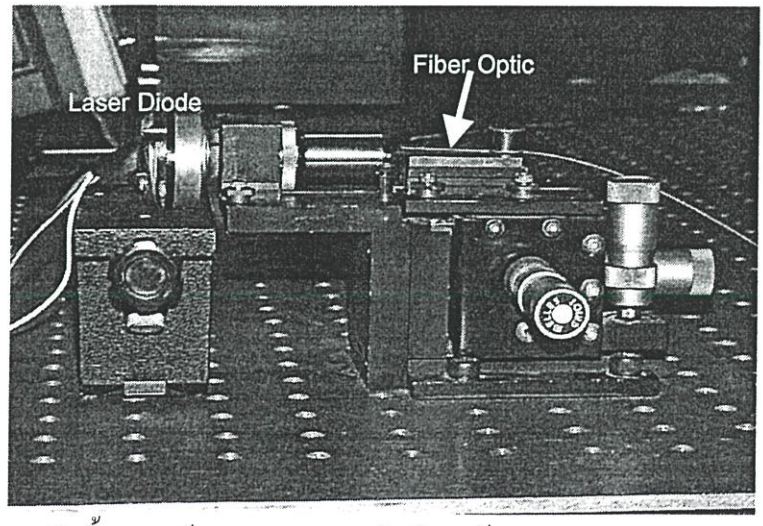
3.3.1 การเตรียมเส้นใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป

ในงานวิจัยนี้เรามีใยแก้วนำแสงยาว 10 เมตร เนื่องจากใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดปเป็นใยแก้วนำแสงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเล็กกว่าใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดียวปกติ ดังนั้นการเชื่อมต่อเพื่อให้ได้รอยต่อที่ดี คือมีการสูญเสียที่เกิดจากรอยต่อต่ำที่สุดนั้น จึงต้องมีการเตรียมใยแก้วเออร์เบียมโดปเป็นพิเศษเพื่อให้สูญเสียเส้นใยแก้วให้น้อยที่สุด การปอกและการตัดต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษผู้ปฏิบัติต้องฝึกเชื่อมต่อให้ชำนาญ การตัดให้ได้รอยตัดที่ดีต้องตั้งใบมีดให้พอเหมาะ แล้วก็ต้องมีการทำความสะอาดทั้งก่อนตัดและหลังตัด หลังจากเชื่อมต่อเสร็จต้องมีการดูรอยเชื่อมต่อจากกล้องโดยสังเกตุว่ารอยเชื่อมต่อที่ดีต้องเรียบ ไม่มีฟองอากาศตรงรอยเชื่อมต่อ

3.3.2 วิธีการในการติดตั้งระบบ

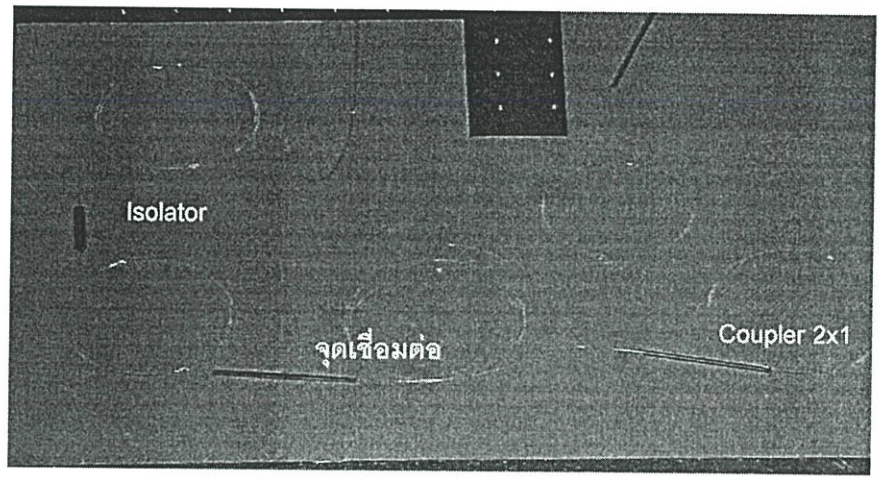
ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1) ทำติงตั้งเลเซอร์ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตรเพื่อสามมารถที่จะป้อนสัญญาณแสงเข้าไปในใยแก้วนำแสง โดยทำการติดตั้งบนชุดไมโครบล็อกซึ่งจะมีชุดเลนส์รวมแสงและสามารถที่จะปรับตำแหน่งอย่างละเอียดได้ทั้งสามแกน เพื่อให้แสงเข้าไปในใยแก้วนำแสง ซึ่งจะต้องปรับให้ได้กำลังสูงสุด สามารถแสดงการติดตั้งได้ดังรูปที่ 3.21



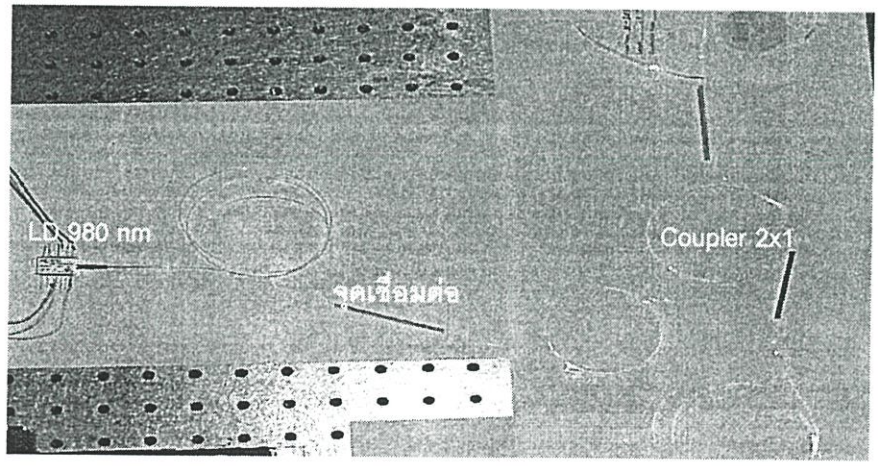
รูปที่ 3.21 แสดงการติดตั้งเลเซอร์ 1550 nm บนชุดไมโครบล็อก

2) ทำการเชื่อมต่อไอโซเลเตอร์เข้ากับคู่ควบใยแก้วนำแสงโดยการเชื่อมต่อแบบหลอมรวม แล้วก็ทำการตรวจสอบรอยต่อโดยการดูจากกล้องและการป้อนสัญญาณแสงเพื่อทดสอบ หลังจากเชื่อมต่อเสร็จสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.22



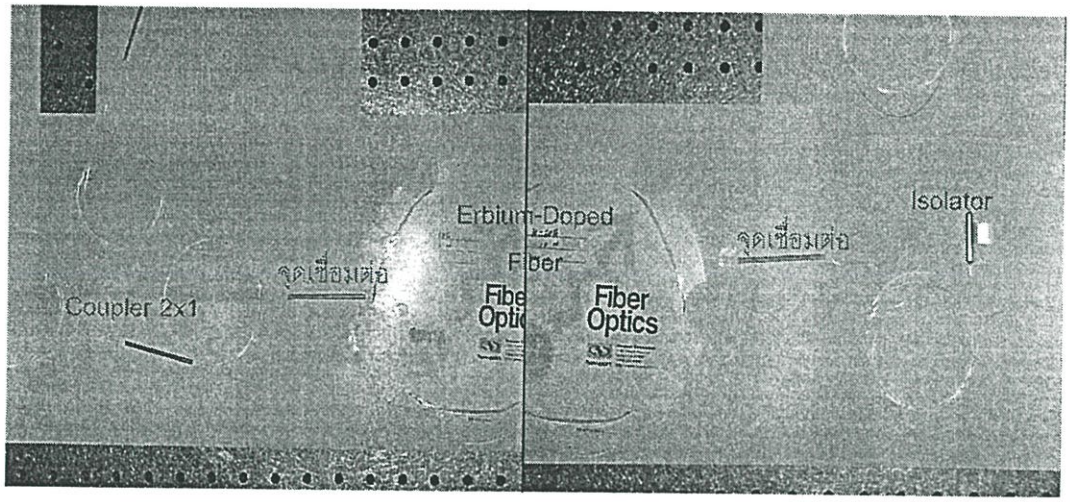
รูปที่ 3.22 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างไอโซเลเตอร์กับคู่ควบใยแก้วนำแสง

3) เชื่อมต่อเลเซอร์ปั๊มความยาวคลื่น 980 นาโนเมตร เข้ากับคู่ควบใยแก้วนำแสงโดยการเชื่อมต่อแบบหลอมรวม แล้วก็ทำการตรวจสอบรอยต่อโดยการดูจากกล้องและการขับกระแสให้กับเลเซอร์แล้ววัดกำลังแสงที่ผ่านไปที่คู่ควบใยแก้วนำแสงทำการแก้ไขจนกว่าจะได้รอยเชื่อมต่อที่ดี หลังจากเชื่อมต่อเสร็จสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.23



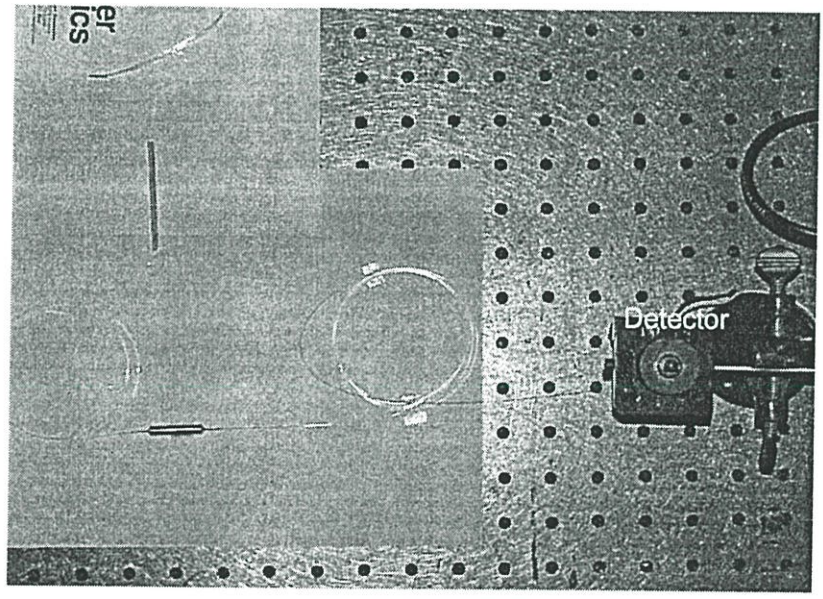
รูปที่ 3.23 แสดงการเชื่อมต่อเลเซอร์ความยาวคลื่น 980 นาโนเมตรกับคู่ควบใยแก้วนำแสง

4) นำใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดปมาเชื่อมต่อกับคู่ควบและอีกปลายเชื่มต่อกับไอโซเลเตอร์ โดยการเชื่อมต่อแบบหลอมรวมทำการตรวจสอบและแก้ไขให้ได้รอยเชื่อมต่อที่มีคุณภาพดี สมารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.24



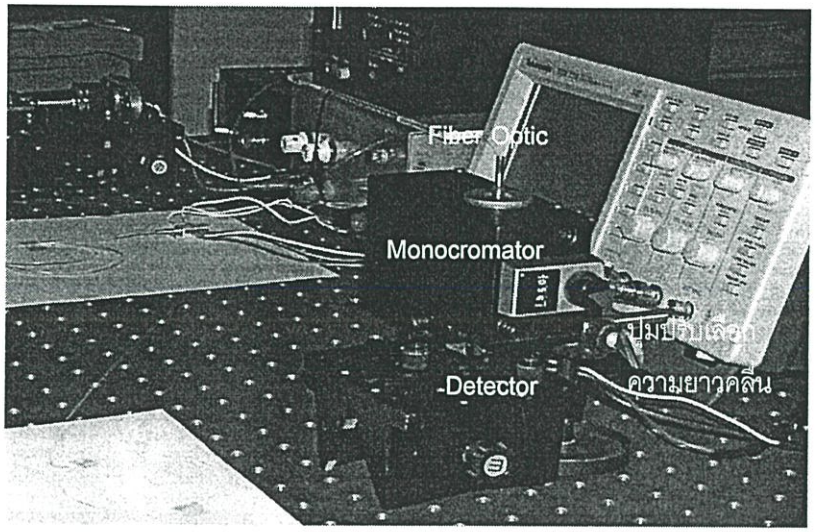
รูปที่ 2.24 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างคูควบกับ EDF และ ระหว่าง EDF กับ ไอโซเลเตอร์

5) ทำการติดตั้งโฟโตดีเท็คเตอร์เพื่อวัดกำลังแสงทางด้านเอาต์พุตซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 แสดงการติดตั้งโฟโตดีเท็คเตอร์

6) เมื่อจะทำการวัดกำลังสัญญาณแสงโดยเทียบกับความยาวคลื่นจะต้องมีการติดตั้งโมโนโครมาเตอร์เพื่อเป็นตัวกรองความยาวคลื่นที่ต้องการ ซึ่งจะสามารถปรับเลือกความยาวคลื่นที่ตัวโมโนโครมาเตอร์สามารถแสดงการติดตั้งดังรูปที่ 3.26



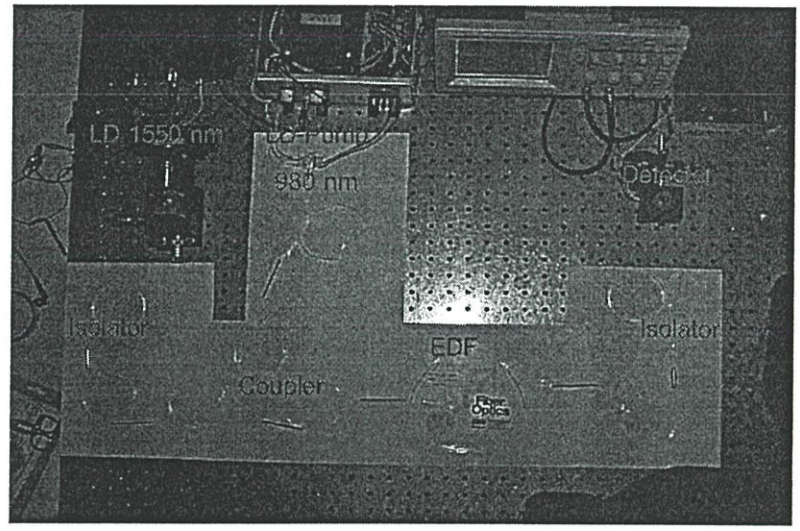
รูปที่ 2.26 แสดงการติดตั้งโมโนโครมาเตอร์

บทที่ 4
ผลการดำเนินงานวิจัยและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินงานวิจัย การวิเคราะห์ผล ของระบบขยายสัญญาณแสง โดยใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป และผลของค่าคุณลักษณะของระบบการขยายสัญญาณแสง การนำไปประยุกต์ในการขยายสัญญาณแสงที่มีการมอดูเลต ซึ่งจะกล่าวตามลำดับดังนี้

4.1 ระบบการขยายสัญญาณแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป

จากการศึกษาและออกแบบเราได้สร้างระบบขยายสัญญาณแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสง เออร์เบียมโดป ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงระบบขยายสัญญาณแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป

ในการขยายสัญญาณแสงเราจะใช้หลักการทำให้เกิดเลเซอร์ขึ้นในใยแก้วนำแสงซึ่งใยแก้ว ที่ทำให้เกิดเลเซอร์ได้ต้องเป็นใยแก้วแบบพิเศษคือจะมีการโดปธาตุเออร์เบียมในใยแก้วโดยเรา ต้องการขยายสัญญาณแสงที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร จากหลักการเกิดเลเซอร์คือต้องมีการ ทำให้อิเล็กตรอนเกิดสภาวะประชากรผกผันแล้วก็กระตุ้นให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานมาอยู่ ที่สถานะพื้น ก็จะมีการปลดปล่อยแสงเลเซอร์ออกมา ซึ่งระบบที่สร้างขึ้นมาก็จะมีการปั๊มโดยใช้ เลเซอร์ที่ความยาวคลื่น 980 นาโนเมตร ทำให้เกิดประชากรผกผันในใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป เมื่อมีสัญญาณแสงความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร ผ่านเข้ามาในระบบก็จะเป็นการกระตุ้นทำให้เกิด เลเซอร์ที่ความยาวคลื่นเดียวกัน ผลที่ได้ก็จะทำให้แสงที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตรมีกำลังมาก ขึ้น ก็จะเป็นการขยายสัญญาณแสงตามที่ต้องการ ซึ่งนำไปใช้ในระบบการสื่อสารโดยใช้ใยแก้วนำ แสง โดยจะเป็นตัวทวนสัญญาณเพื่อให้สามารถส่งสัญญาณไปได้ไกลๆ

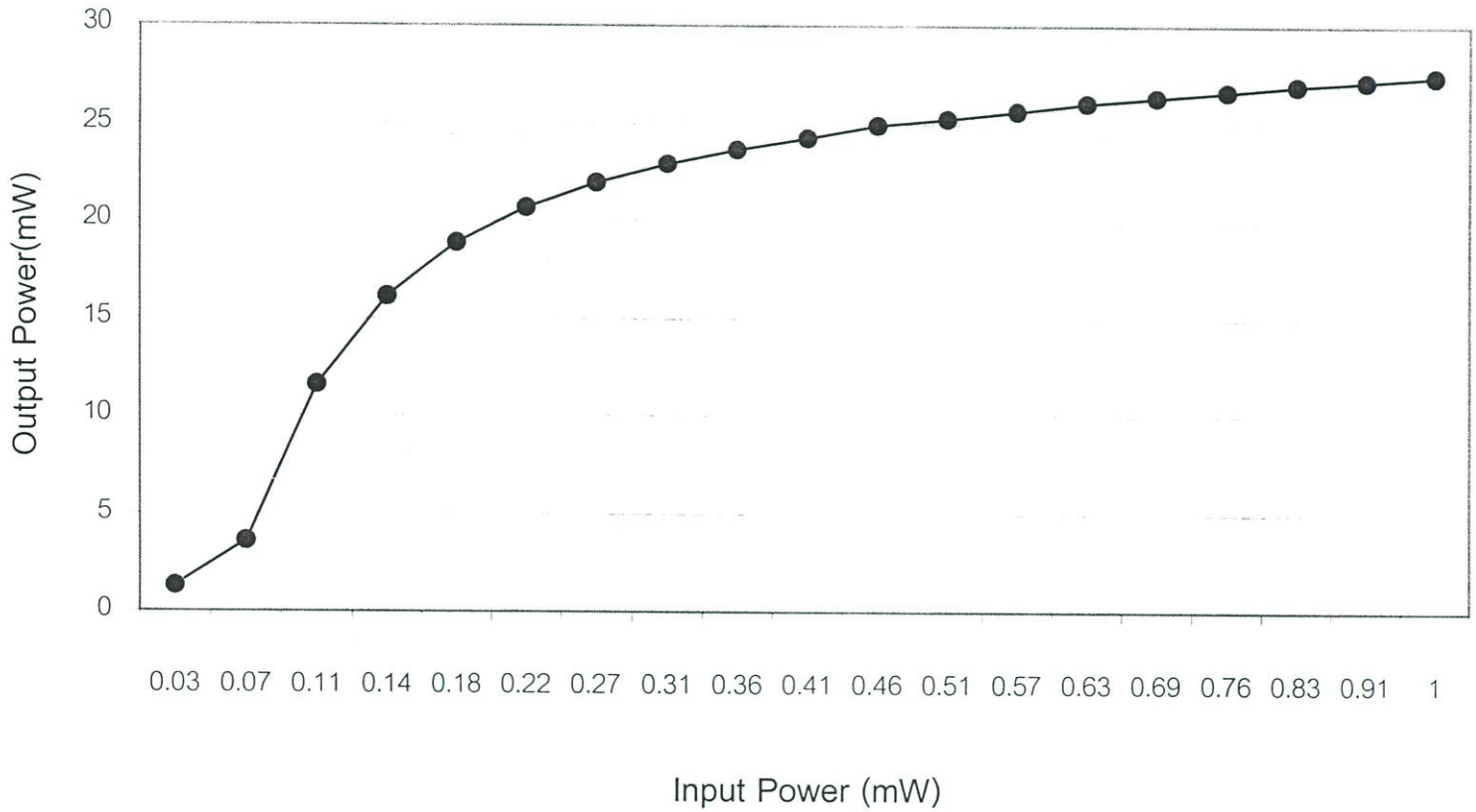
4.2 ผลการวัดและการคำนวณค่าคุณลักษณะของระบบการขยายสัญญาณแสง

4.2.1ผลการวัดกำลังของสัญญาณแสงเอาต์พุตเทียบกับกำลังของสัญญาณแสงอินพุต

ทำการทดลองโดยการปั๊มด้วยเลเซอร์ความยาวคลื่น 980 นาโนเมตร ที่กำลัง 100 mW แล้วป้อนสัญญาณแสงอินพุตที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร ทำการบันทึกค่ากำลังแสงอินพุตและกำลังแสงเอาต์พุตจากมิเตอร์วัดกำลัง ทำการทดลองเช่นเดิมแต่ปรับกำลังแสงอินพุตไปเรื่อยๆ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงกำลังของสัญญาณแสงเอาต์พุตเทียบกับกำลังของสัญญาณแสงอินพุต

Input Power (mW)	Output Power (mW)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.034	1.33	1.29	1.31	1.31
0.069	3.61	3.65	3.62	3.63
0.105	11.62	11.59	11.63	11.61
0.143	16.13	16.15	16.12	16.13
0.182	18.91	18.88	18.87	18.87
0.223	20.65	20.69	20.67	20.67
0.265	21.96	21.97	21.98	21.97
0.309	22.91	22.94	22.93	22.93
0.356	23.69	23.71	23.65	23.68
0.405	24.32	24.27	24.29	24.29
0.456	24.92	24.95	24.94	24.94
0.509	25.31	25.28	25.25	25.28
0.567	25.68	25.65	25.66	25.66
0.627	26.08	26.11	26.04	26.08
0.691	26.35	26.41	26.34	26.37
0.759	26.64	26.67	26.66	26.66
0.834	26.98	26.95	26.94	26.97
0.913	27.21	27.19	27.23	27.21
1.000	27.49	27.45	27.51	27.48



รูปที่ 4.2 แสดงกราฟกำลังของสัญญาณแสงเอาต์พุตเทียบกับกำลังของสัญญาณอินพุต

จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าเมื่อกำลังของสัญญาณแสงอินพุตมีค่ามากขึ้นก็จะได้กำลังแสงเอาต์พุตมากขึ้นด้วย จากรูปที่ 4.2 ในช่วงแรกกราฟที่ได้จะมีความชันมากซึ่งจะเป็นการบอกว่ากำลังอินพุตที่มีค่าน้อยๆในช่วงแรกจะทำให้อัตราการเพิ่มของกำลังแสงแสงเอาต์พุตมีค่ามาก เนื่องจากระบบยังไม่เกิดการอิ่มตัว และที่กำลังแสงอินพุตมีค่ามากกราฟจะมีความชันน้อยก็จะบอกถึงอัตราการเพิ่มของแสงเอาต์พุตมีค่าน้อยตามไปด้วย เนื่องจากระบบเข้าใกล้จุดอิ่มตัว การเกิดการอิ่มตัวจะขึ้นอยู่กับจำนวนประชากรผกผันที่เกิดขึ้น ซึ่งมีจำนวนคงที่เนื่องจากการปั๊มด้วยกำลังคงที่ สิ่งที่เกิดขึ้นในระบบ คือ ระบบจะถูกทำให้อยู่ในสภาวะประชากรผกผันโดยการป้อนเลเซอร์ปั๊ม (980 nm) เข้าไป เมื่อมีแสงที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร ที่กำลังค่าต่างๆจะเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดเลเซอร์ขึ้น เมื่อมีกำลังมากก็จะเกิดการกระตุ้นให้ได้เลเซอร์มากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจะสอดคล้องกับหลักการของการขยายสัญญาณ

4.1.2 ผลของอัตราขยายสัญญาณ(Gain) เทียบกับกำลังของสัญญาณแสงอินพุต

จากผลการทดลองของค่าระหว่างกำลังของสัญญาณแสงเอาต์พุตเทียบกับกำลังของสัญญาณอินพุต นำผลที่ได้ไปคำนวณอัตราขยายสัญญาณได้จากสูตรดังสมการที่ 4.1 อัตราขยายสัญญาณเป็นค่าที่บอกถึงคุณภาพของระบบที่ใช้ในการขยายสัญญาณ

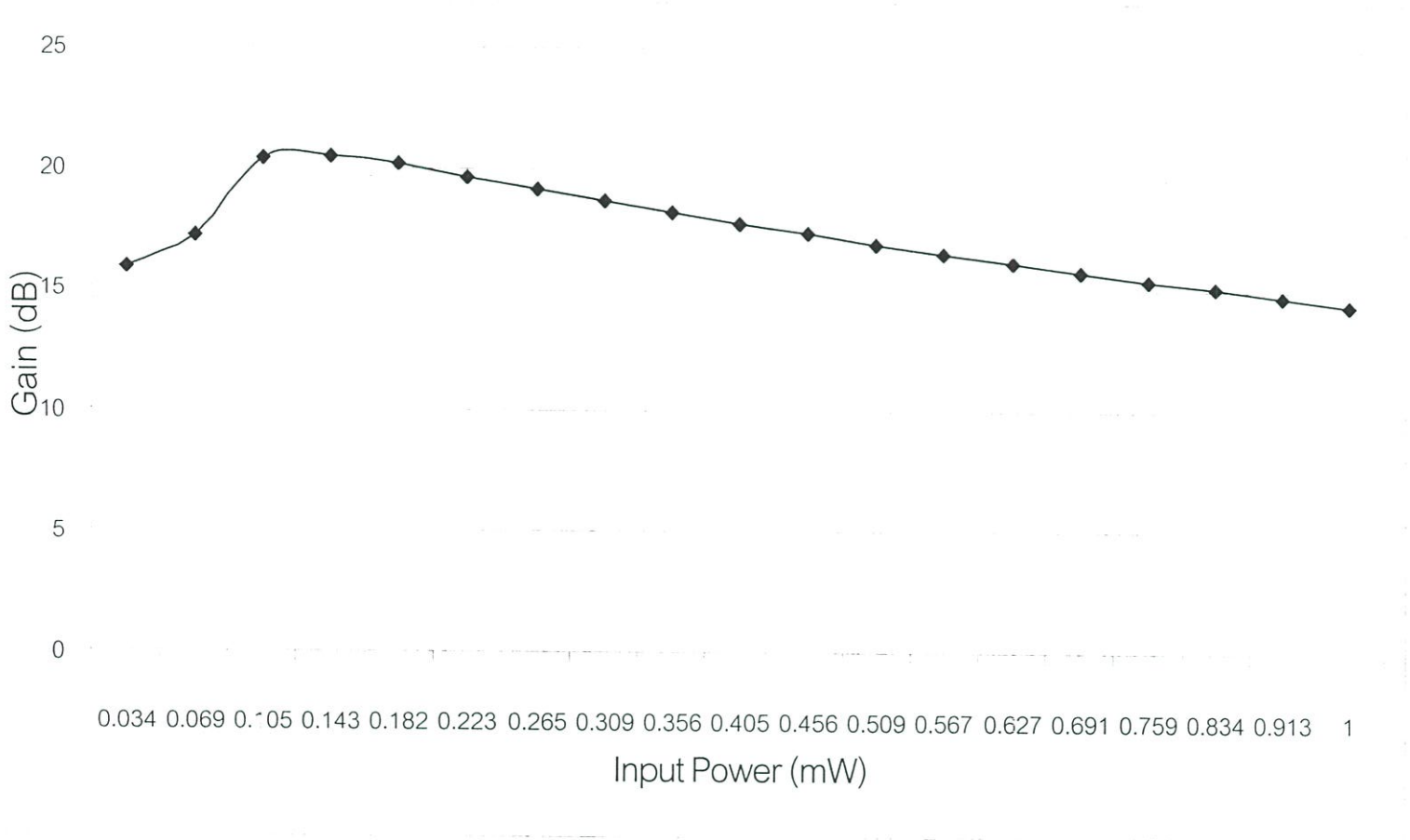
$$Gain\ (dB) = 10 \log_{10} \frac{P_{signal\ -out}}{P_{signal\ -in}} \qquad (4.1)$$

ได้ผลดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 จากผลการที่ได้พบว่าอัตราขยายในช่วงแรกจะมีความชันมาก เมื่อไปถึงค่าสูงสุดจะเป็นจุดกลับของกราฟ แล้วจากนั้นจะมีความชันเป็นลบ สาเหตุเนื่องมาจากช่วงแรกกำลังแสงอินพุตมีค่าต่ำ ซึ่งในระบบมีจำนวนประชารผกผันมาก เมื่อเทียบกับการกระตุ้นด้วยแสงอินพุต เมื่อกำลังแสงเพิ่มขึ้นจึงทำให้มีอัตราขยายเพิ่มขึ้นจนไปถึงจุดสูงสุดอยู่ที่ 20.52 dB ซึ่งที่จุดนี้จะเป็นจุดที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด คือ ที่กำลังแสงอินพุต 0.143 mW จากนั้นเมื่อป้อนแสงอินพุตมากขึ้นอัตราขยายจะค่อยๆลดลง ซึ่งเกิดจากการอิ่มตัวของระบบ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการที่เราป้อนเลเซอร์ที่ใช้ปั๊มด้วยกำลังคงที่ ก็จะทำให้ระบบมีจำนวนอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานสูงมีจำนวนคงที่ หรือกล่าวได้ว่ามีอัตราการเกิดประชากรผกผันมีค่าคงที่

ตารางที่ 4.2 แสดงอัตราขยายสัญญาณ(Gain) เทียบกับกำลังของสัญญาณแสงอินพุต

Input Power (mW)	Gain (dB)
0.034	15.86
0.069	17.21
0.105	20.44
0.143	20.52
0.182	20.16
0.223	19.67
0.265	19.19
0.309	18.71
0.356	18.23
0.405	17.78
0.456	17.38
0.509	16.96
0.567	16.56
0.627	16.19
0.691	15.81
0.759	15.46
0.834	15.09
0.913	14.74
1.000	14.39

จากกราฟที่โค้งขึ้นแล้วลดลงเรื่อยๆพบว่าเมื่อกำลังแสงอินพุตเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่งจะได้ค่าอัตราขยายสูงสุดและแล้วจากนั้นก็มีอัตราขยายค่อยๆลดลงเนื่องมาจากเกิดการอิ่มตัวของระบบดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



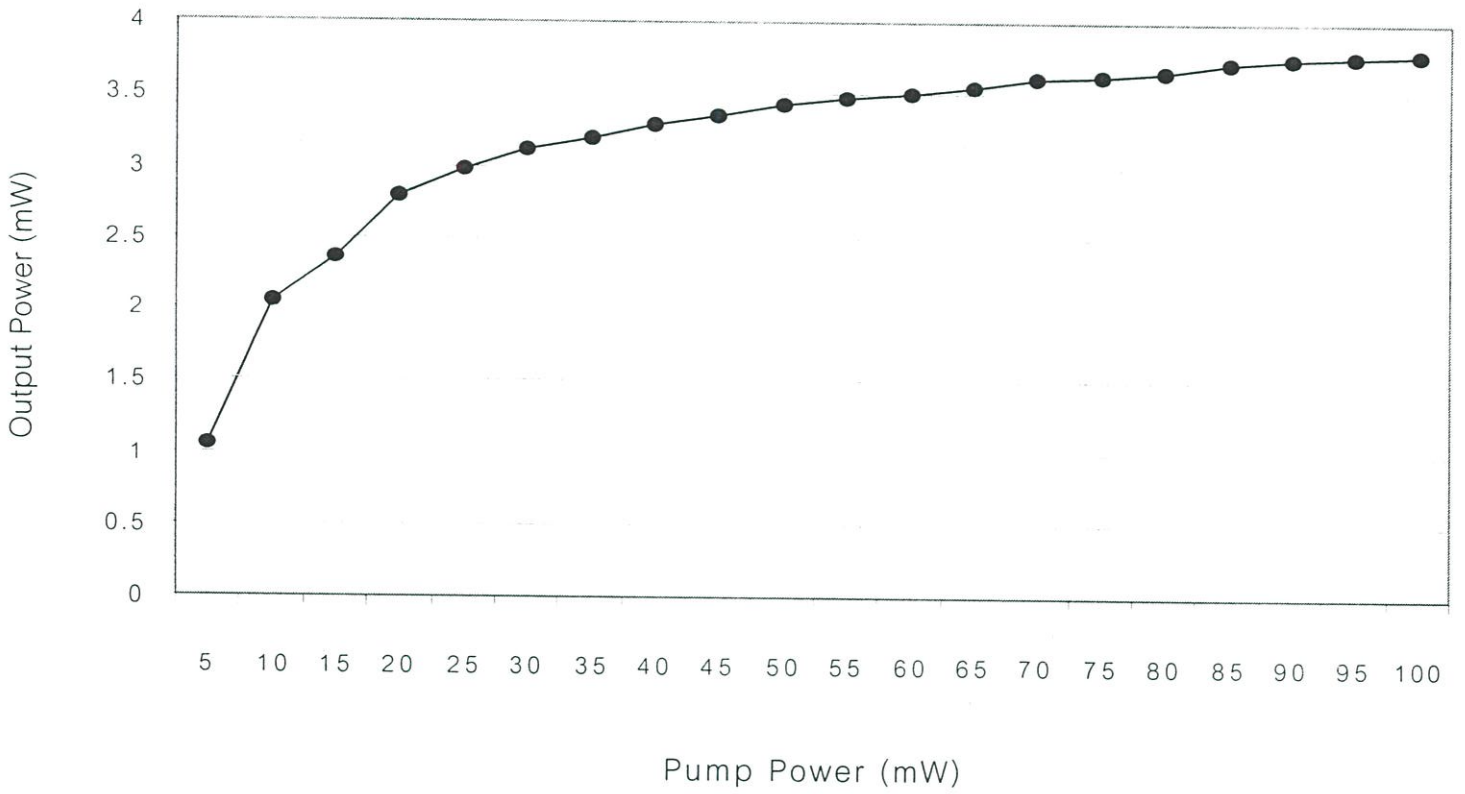
รูปที่ 4.3 แสดงกราฟอัตราขยายสัญญาณ(Gain) เทียบกับกำลังของสัญญาณแสงอินพุต

4.2.3 ผลการวัดกำลังของสัญญาณแสงเอาต์พุตเทียบกับกำลังของเลเซอร์ปั๊ม

ทำการทดลองโดยการป้อนสัญญาณแสงอินพุตที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร ที่กำลัง 0.05 mW ปั๊มด้วยเลเซอร์ความยาวคลื่น 980 นาโนเมตร บันทึกค่ากำลังแสงของเลเซอร์ปั๊มและกำลังแสงเอาต์พุตจากมิเตอร์วัดกำลัง ทำการทดลองเช่นเดิมแต่ปรับกำลังแสงของเลเซอร์ปั๊มไปเรื่อยๆ ได้ผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงกำลังของสัญญาณแสงเอาต์พุตเทียบกับกำลังของเลเซอร์ปั๊ม

Pump Power (mW)	Output Power (mW)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
5	1.04	1.08	1.03	1.05
10	2.06	2.01	2.05	2.04
15	2.37	2.33	2.38	2.36
20	2.79	2.78	2.81	2.79
25	2.98	2.96	2.99	2.98
30	3.09	3.14	3.11	3.11
35	3.19	3.21	3.18	3.19
40	3.28	3.31	3.29	3.29
45	3.36	3.34	3.35	3.35
50	3.41	3.44	3.42	3.42
55	3.47	3.45	3.48	3.47
60	3.49	3.51	3.53	3.51
65	3.55	3.56	3.54	3.55
70	3.61	3.59	3.62	3.61
75	3.63	3.64	3.62	3.63
80	3.64	3.69	3.66	3.66
85	3.72	3.72	3.71	3.72
90	3.75	3.76	3.75	3.75
95	3.78	3.78	3.76	3.77
100	3.79	3.81	3.78	3.79



รูปที่ 4.4 แสดงกราฟกำลังของสัญญาณแสงเอาต์พุตเทียบกับกำลังของเลเซอร์ปั๊ม

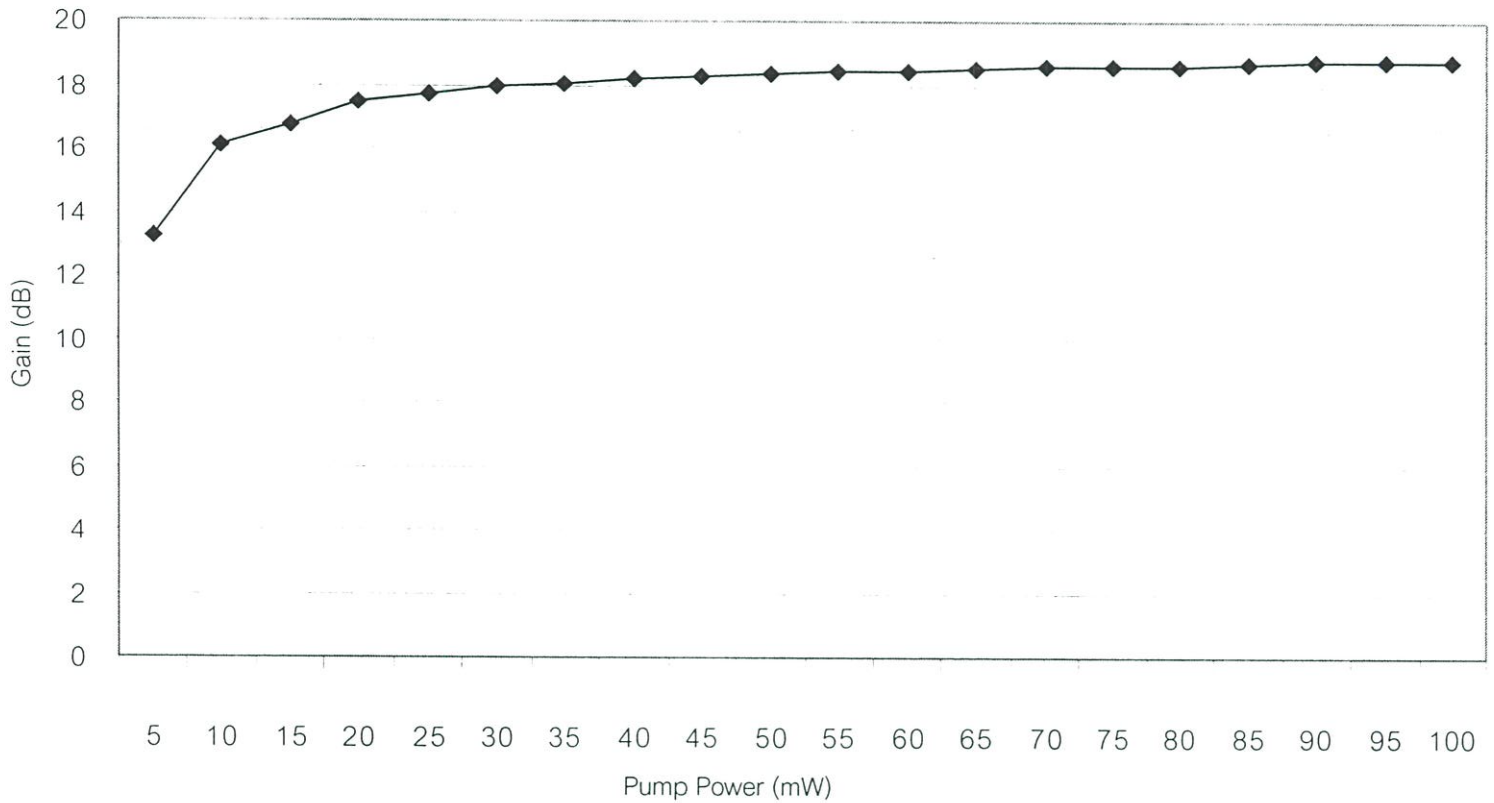
จากรูปที่ 4.4 ผลที่ได้เราพบว่าเมื่อเราป้อนเลเซอร์ปั๊มด้วยกำลังที่มากขึ้นจะได้กำลังของสัญญาณแสงเอาต์พุตมีค่ามากขึ้น ถึงแม้จะป้อนสัญญาณแสงอินพุตด้วยกำลังคงที่ สาเหตุเนื่องมาจากการเพิ่มกำลังของเลเซอร์ปั๊มจะเป็นการทำให้จำนวนอิเล็กตรอนไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูง มีจำนวนมากขึ้น นั้นคือมีจำนวนประชากรผกผันมากขึ้นนั้นเอง เมื่อระบบถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณแสงก็จะทำให้เกิดเลเซอร์มากขึ้น ผลที่ได้คือกำลังของสัญญาณแสงเอาต์พุตมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

4.2.4 ผลของอัตราขยายสัญญาณ(Gain) เทียบกับกำลังของเลเซอร์ปั๊ม

จากผลการทดลองของค่าระหว่างกำลังของสัญญาณแสงเอาต์พุตเทียบกับกำลังของเลเซอร์ที่ใช้ปั๊มนำผลที่ได้ไปคำนวณอัตราขยายสัญญาณ จากสมการที่ 4.1 เมื่อมีกำลังแสงอินพุต 0.05 mW ได้ผลดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงอัตราขยายสัญญาณ(Gain) เทียบกับกำลังของเลเซอร์ปั๊ม

Pump Power (mW)	Gain (dB)
5	13.22
10	16.11
15	16.74
20	17.47
25	17.75
30	17.94
35	18.05
40	18.18
45	18.26
50	18.35
55	18.41
60	18.46
65	18.51
70	18.59
75	18.61
80	18.65
85	18.72
90	18.75
95	18.77
100	18.79



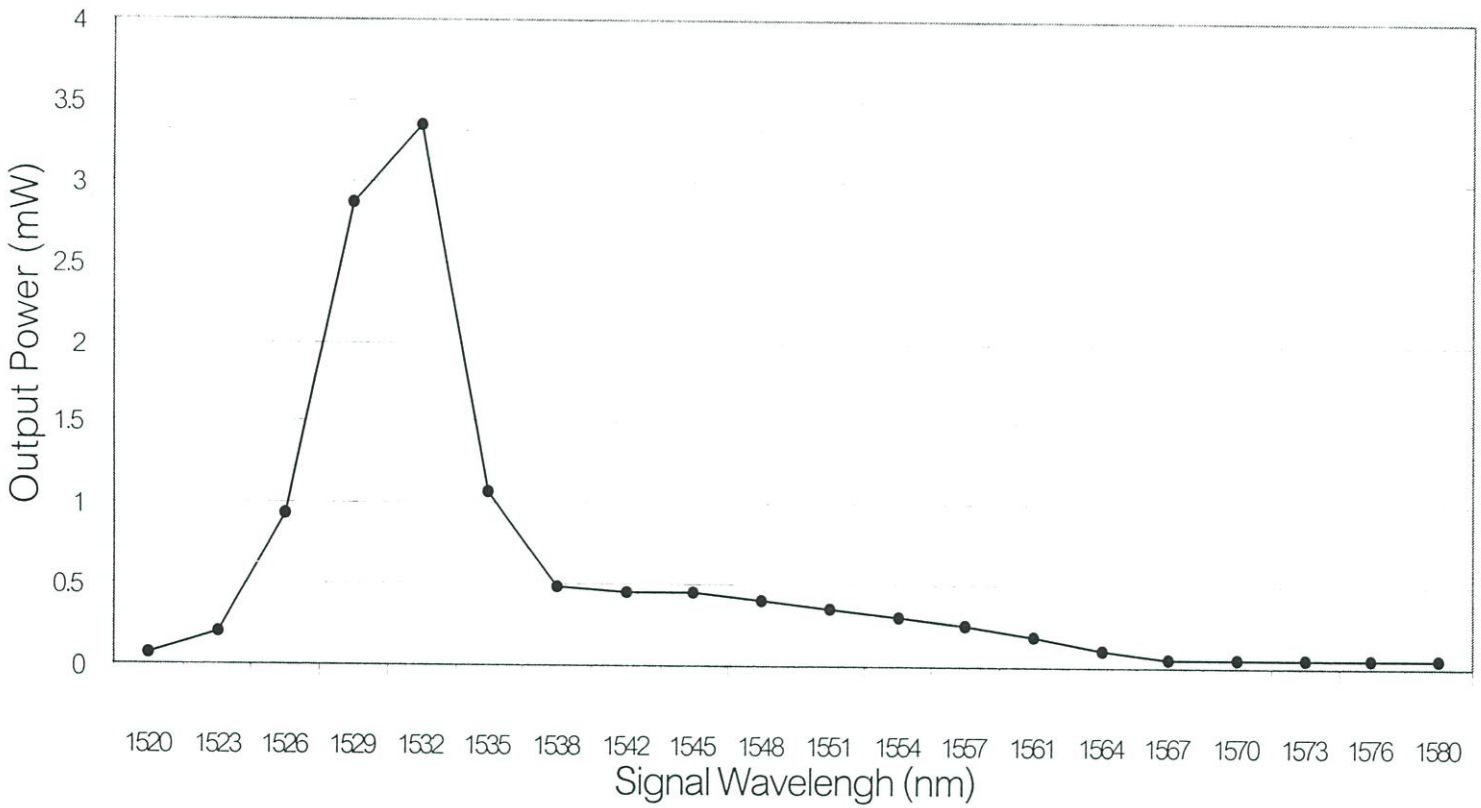
รูปที่ 4.5 แสดงกราฟระหว่างอัตราขยายสัญญาณ(Gain) เทียบกับกำลังของเลเซอร์ปั๊ม

จากรูปที่ 4.5 จะได้ว่าอัตราขยายจะมีค่ามากขึ้นแต่เมื่อกำลังของเลเซอร์ปั๊มมีค่าคงมากก็จะทำให้อัตราขยายมีแนวโน้มคงที่สาเหตุเนื่องมาจากระบบเกิดการอิ่มตัวเนื่องมาจากมีการป้อนสัญญาณแสงด้วยกำลังคงที่ และความยาวของใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดปมีค่าคงที่ซึ่งก็จะทำให้อิเล็กตรอนในระบบมีจำนวนคงที่ด้วย

4.2.5 ผลการวัดกำลังของสัญญาณแสงเอาต์พุตเทียบกับความยาวคลื่น

ตารางที่ 4.5 แสดงกำลังของสัญญาณแสงเอาต์พุตเทียบกับความยาวคลื่น

Signal Wavelengh (nm)	Output Power (mW)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1520	0.063	0.066	0.062	0.064
1523	0.203	0.205	0.201	0.203
1526	0.938	0.935	0.937	0.937
1529	2.868	2.869	2.866	2.868
1532	3.348	3.345	3.346	3.346
1535	1.078	1.079	1.077	1.078
1538	0.486	0.484	0.486	0.485
1542	0.444	0.444	0.443	0.444
1545	0.453	0.454	0.456	0.454
1548	0.407	0.406	0.406	0.406
1551	0.357	0.355	0.356	0.356
1554	0.308	0.307	0.305	0.307
1557	0.254	0.251	0.253	0.252
1561	0.177	0.178	0.175	0.177
1564	0.103	0.104	0.103	0.103
1567	0.055	0.058	0.054	0.056
1570	0.054	0.055	0.053	0.054
1573	0.051	0.054	0.053	0.053
1576	0.049	0.053	0.052	0.051
1580	0.051	0.049	0.052	0.051



รูปที่ 4.6 แสดงกราฟระหว่างกำลังของสัญญาณแสงเอาต์พุตเทียบกับความยาวคลื่น

ทำการทดลองโดยการป้อนสัญญาณแสงอินพุตที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตรที่กำลัง 0.05 mW ปั๊มด้วยเลเซอร์ความยาวคลื่น 980 นาโนเมตร ที่กำลัง 100 mW ติดตั้งโมโนโครมาเตอร์ซึ่งจะเป็นตัวกรองความยาวคลื่นสามารถปรับเลือกความยาวคลื่นได้ บันทึกความยาวคลื่นและกำลังแสงเอาต์พุตจากมิเตอร์วัดกำลัง ทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนความยาวคลื่นไปเรื่อยๆ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งได้ผลดังตารางที่ 4.5

จากรูปที่ 4.6 พบว่าที่ความยาวคลื่นช่วง 1520 – 1532 นาโนเมตร กำลังของแสงจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 1532 นาโนเมตร ซึ่งแสดงว่าความยาวคลื่นในช่วงนี้ถูกปลดปล่อยได้ดีเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสัญญาณแสงอินพุต และที่ช่วงความยาวคลื่น 1540 - 1560 นาโนเมตร จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงน้อย คือจะมีแนวโน้มคงที่ และมีกำลังแสงต่ำกว่าช่วงแรก ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่เราสนใจในการสื่อสารด้วยแสงจะใช้ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร ระบบนี้สามารถตอบสนองที่ความยาวคลื่นนี้ได้

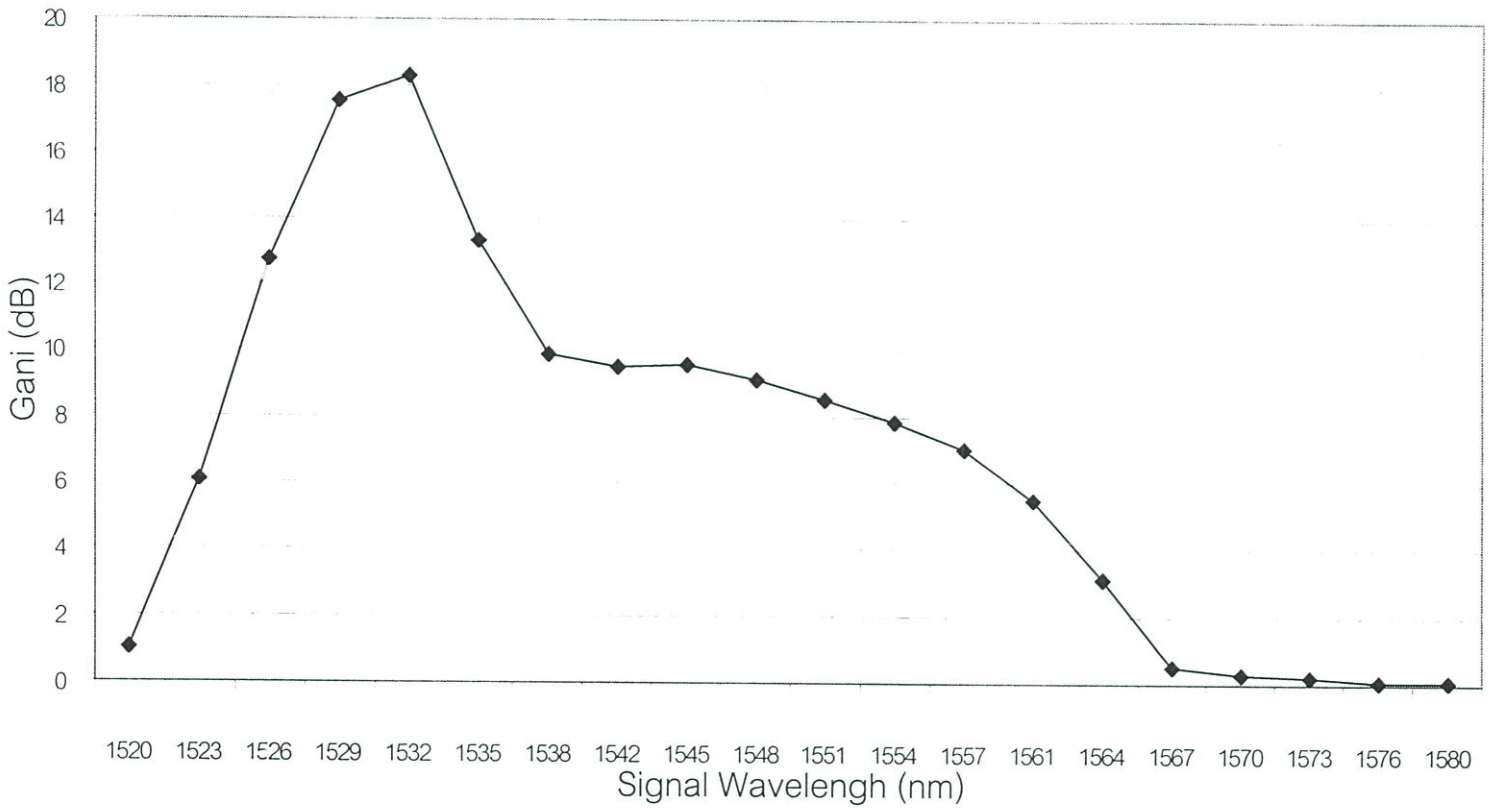
4.2.6 ผลของอัตราขยายสัญญาณ(Gain) เทียบกับความยาวคลื่น

จากผลการทดลองของค่าระหว่างกำลังของสัญญาณแสงเอาต์พุตเทียบความยาวคลื่นนำผลที่ได้ไปคำนวณหาอัตราขยายสัญญาณได้จากสมการที่ 4.1 เมื่อมีกำลังแสงอินพุต 0.05 mW ได้ผลดังตารางที่ 4.6 จะได้ว่าอัตราขยายในแต่ละความยาวคลื่นจะมีค่าไม่เท่ากับที่ส่วนที่ช่วงความยาวคลื่น 1540 -1560 นาโนเมตร จะมีแนวโน้มคงที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อข้างบนที่ จะเป็นผลตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของระบบขยายสัญญาณแสงที่ได้สร้างขึ้นมา สามารถแสดงดังรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 แสดงอัตราขยายสัญญาณ(Gain) เทียบกับความยาวคลื่น

Signal Wavelengh (nm)	Gain (dB)
1520	1.07
1523	6.09
1526	12.73
1529	17.59
1532	18.26
1535	13.34
1538	9.87
1542	9.48
1545	9.58
1548	9.1

Signal Wavelengh (nm)	Gain (dB)
1551	8.52
1554	7.88
1557	7.02
1561	5.49
1564	3.14
1567	0.49
1570	0.33
1573	0.25
1576	0.09
1580	0.09



รูปที่ 4.7 แสดงกราฟระหว่างอัตราขยายสัญญาณ(Gain) เทียบกับความยาวคลื่น

4.2.7 การคำนวณค่าประสิทธิภาพในการแปลงกำลัง

(Power Conversion Efficiency, PCE)

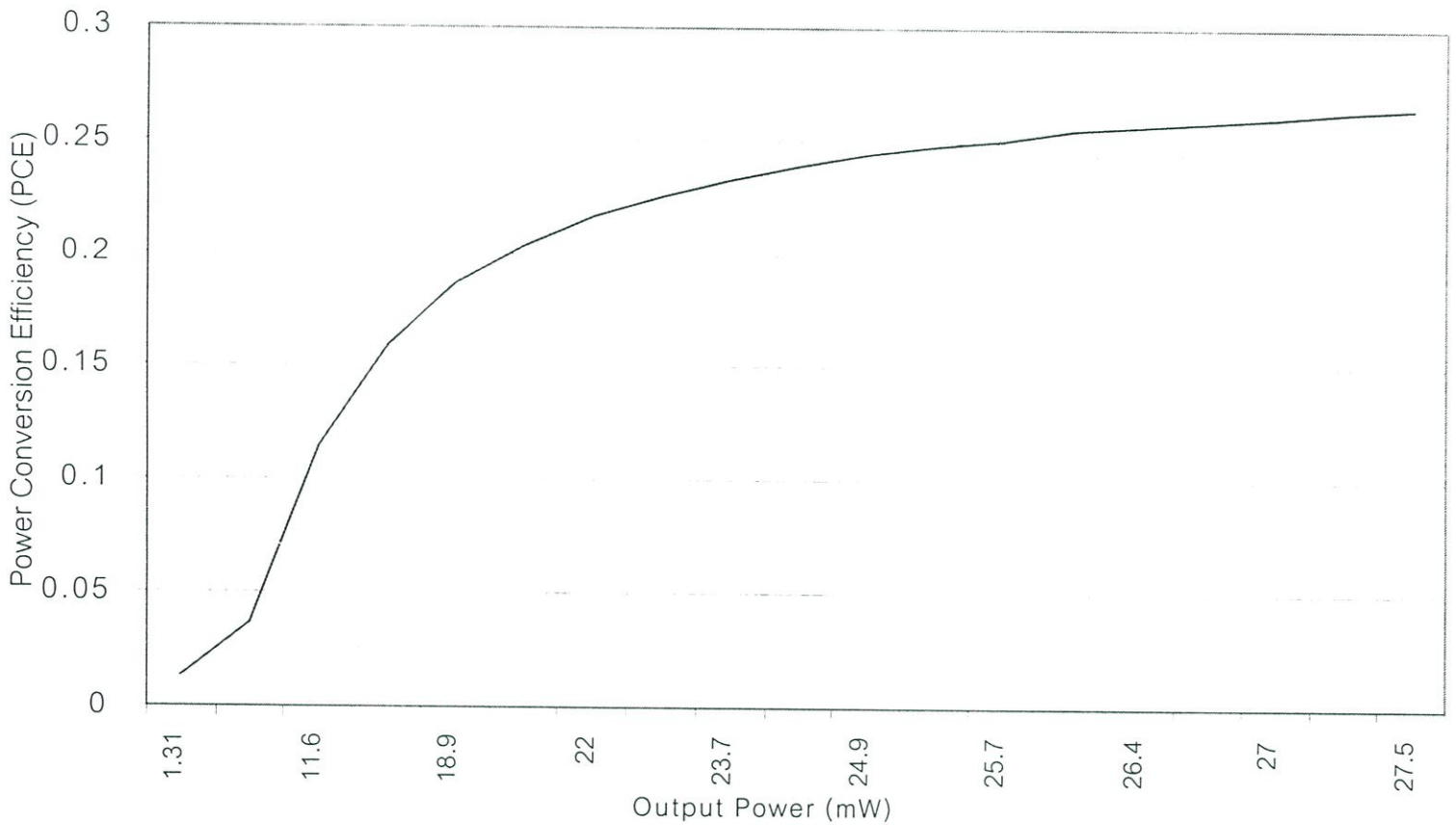
PCE เป็นค่าที่บอกถึงประสิทธิภาพในการแปลงกำลังแสงที่ป้อนให้กับระบบ ซึ่งจะแสดงถึงคุณภาพของระบบขยายสัญญาณสามารถคำนวณจากสมการที่ 4.2

$$PCE = \frac{\left(P_{signal\ -out} - P_{signal\ -in}\right)}{P_{pump}} \tag{4.2}$$

ผลการคำนวณแสดงได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าประสิทธิภาพในการแปลงกำลัง (PCE)

Input Power (mW)	Output Power (mW)	PCE	PCE(%)
0.034	1.31	0.013	1.3
0.069	3.63	0.037	3.7
0.105	11.61	0.115	11.5
0.143	16.13	0.159	15.9
0.182	18.87	0.187	18.7
0.223	20.67	0.204	20.4
0.265	21.97	0.217	21.7
0.309	22.93	0.226	22.6
0.356	23.68	0.233	23.3
0.405	24.29	0.239	23.9
0.456	24.94	0.245	24.5
0.509	25.28	0.248	24.8
0.567	25.66	0.251	25.1
0.627	26.08	0.255	25.5
0.691	26.37	0.257	25.7
0.759	26.66	0.259	25.9
0.834	26.97	0.261	26.1
0.913	27.21	0.263	26.3
1.000	27.48	0.265	26.5



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟระหว่างค่า PCE และกำลังแสงเอาต์พุต

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่ากราฟที่ได้มีแนวโน้มสูงเป็นเส้นโค้งขึ้นเมื่อกำลังมากขึ้น ที่กำลังแสงต่ำจะมีความชันสูง แสดงว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงในช่วงนี้จะมีค่ามากกว่าช่วงที่มีกำลังแสงอินพุตสูง คือระบบในช่วงแรกยังสามรถตอบสนองต่อการขยายสัญญาณได้ดี ส่วนช่วงที่มีกำลังแสงอินพุตสูงจะมีอัตราการเปลี่ยนน้อยลง เนื่องมาจากเกิดการอิ่มตัวของระบบขยายสัญญาณ คืออัตราการเปลี่ยนระดับพลังงานมาสู่สถานะพื้นนั้นเริ่มจะคงที่ ซึ่งระบบมีจำนวนอิเล็กตรอนจำกัด ค่าประสิทธิภาพสูงสุดของระบบอยู่ที่ 29.4 % เป็นการบอกถึงปริมาณกำลังที่ให้กับระบบเป็น 100 ส่วน แล้วได้กำลังเอาต์พุต 29.4 ส่วน

4.2.8 การคำนวณค่าประสิทธิภาพในการแปลงทางควอนตัม

(Quantum Conversion Efficiency, QCE)

เป็นค่าที่บอกถึงประสิทธิภาพกำลังที่เกี่ยวข้องกับความยาวคลื่นของแสงที่ป้อนให้กับระบบ ซึ่งระบบจะมีการป้อนความยาวคลื่นที่ 980 นาโนเมตร เป็นของแสงเลเซอร์ปั๊ม และ 1550 นาโนเมตรเป็นของสัญญาณแสงที่ต้องการขยาย ซึ่งจะเป็นค่าประสิทธิภาพทางควอนตัม สามารถที่จะคำนวนได้จากสมการที่ 4.3

$$QCE = PCEx\left(\frac{\lambda_{signal}}{\lambda_{pump}}\right) \tag{4.3}$$

เมื่อ $\lambda_{signal} = 1550$ nm

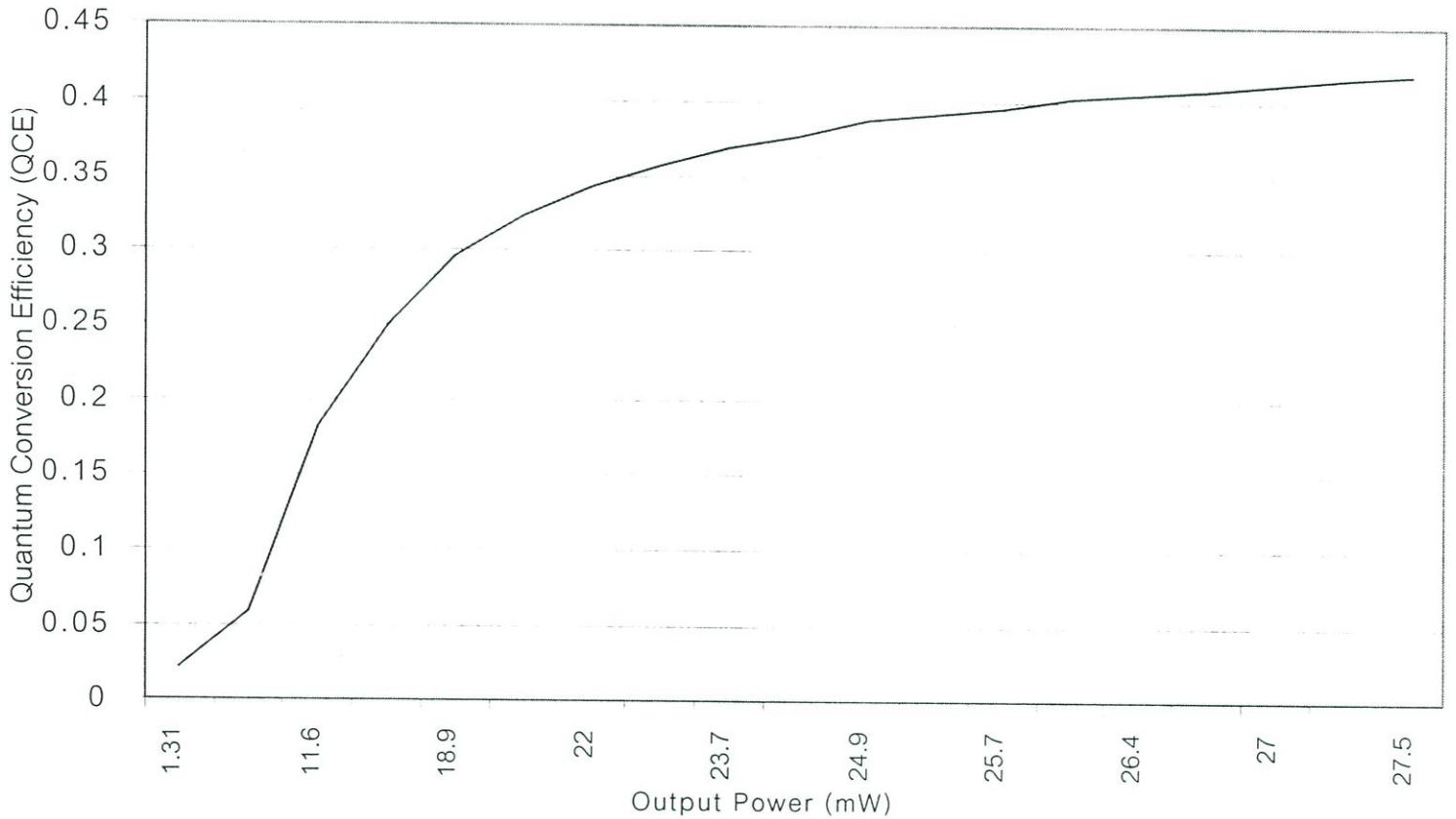
$\lambda_{pump} = 980$ nm

ได้ผลดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าประสิทธิภาพในการแปลงทางควอนตัม (QCE)

Output Power (mW)	QCE
1.31	0.021
3.63	0.059
11.61	0.182
16.13	0.251
18.87	0.296
20.67	0.323
21.97	0.343
22.93	0.357
23.68	0.369
24.29	0.378

Output Power (mW)	QCE
24.94	0.388
25.28	0.392
25.66	0.397
26.08	0.403
26.37	0.406
26.66	0.409
26.97	0.413
27.21	0.416
27.48	0.419
-	-

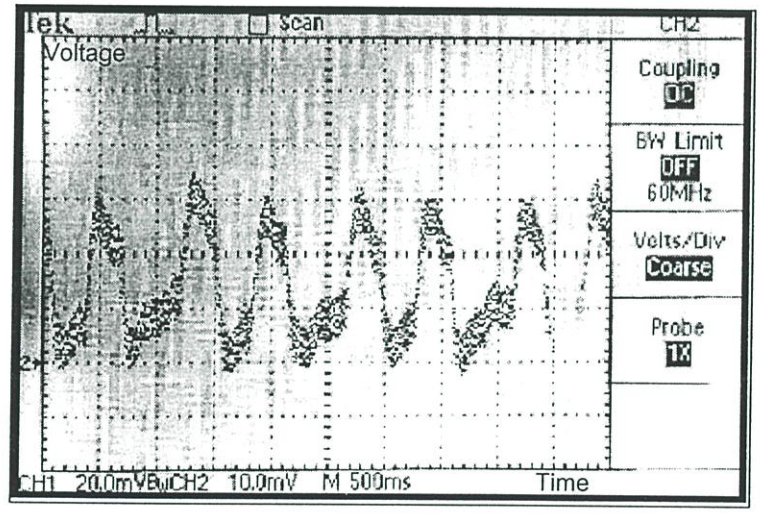


รูปที่ 4.9 แสดงกราฟระหว่างค่าประสิทธิภาพการแปลงทางควอนตัมกับกำลังของสัญญาณแสงอินพุต

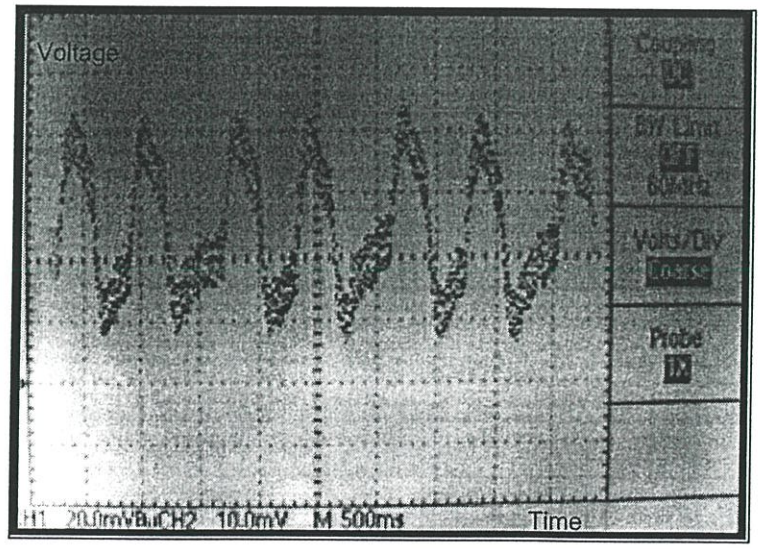
จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าค่าประสิทธิภาพการแปลงทางควอนตัมมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อกำลังแสงเอาต์พุตมากขึ้น คล้ายกับค่าประสิทธิภาพการแปลงกำลัง ค่า QCE ของระบบจะมีค่าสูงที่สุด 46.6 %

4.2.9 ผลการขยายสัญญาณแสงที่มีการมอดูเลต

ทำการทดลองโดยการป้อนสัญญาณแสงที่เป็นพัลส์ แสดงลักษณะสัญญาณดังรูปที่ 4.10 เป็นรูปที่ได้จากการวัดโดยออสซิโลสโคบ ในแนวแกนนอนจะเป็นค่าเวลาซึ่งจะมีค่า 500 ms ต่อช่องและในแนวแกนตั้งจะเป็นค่าแรงดันมีค่า 10 mV ต่อช่อง วัดจากสัญญาณแสงอินพุต ผลของสัญญาณแสงเอาต์พุตแสดงดังรูปที่ 4.11 จะมีขนาดของสัญญาณมากขึ้นเนื่องจากมีการขยายสัญญาณแสงที่ป้อนเข้าไปทำให้มีกำลังแสงมากขึ้น และสัญญาณที่ได้ยังมีความถี่คงเดิม จะพบว่าเส้นของสัญญาณจะมีสัญญาณรบกวนที่เกิดจากโฟโตดีเท็คเตอร์



รูปที่ 4.10 แสดงสัญญาณแสงอินพุตที่มีการมอดูเลต



รูปที่ 4.11 แสดงสัญญาณแสงเอาต์พุตที่มีการมอดูเลต

บทที่ 5
สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

การขยายสัญญาณแสงคือ การทำให้แสงมีกำลังเพิ่มขึ้น ในการสื่อสารโดยใช้ใยแก้วนำแสงนั้นจะใช้เลเซอร์ไดโอดเป็นอุปกรณ์ ที่จะส่งสัญญาณแสงไปในใยแก้วนำแสง ดังนั้นวิธีการที่จะขยายสัญญาณแสง คือจะต้องทำให้เกิดแสงเลเซอร์ขึ้นในใยแก้วนำแสงขึ้นอีก เพื่อจะทำให้มีกำลังแสงมากขึ้น หลักการสำคัญ คือ การกระตุ้นให้เกิดเลเซอร์ขึ้นก็จะมีกระบวนเหมือนกับการกำเนิดเลเซอร์ ต้องมีการปั๊มด้วยเลเซอร์ให้เกิดประชากรผกผันในระบบแล้วกระตุ้นให้เกิดเลเซอร์ด้วยสัญญาณแสง ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดปเป็นอุปกรณ์สำคัญที่เป็นตัวกลางทำให้เกิดเลเซอร์ ระบบการขยายสัญญาณแสงที่ใช้ในระบบการสื่อสารจะใช้ที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร สาเหตุที่เลือกใช้ธาตุเออร์เบียมเพื่อมาโดปในใยแก้วนำแสงเนื่องมาจากแถบพลังงานของเออร์เบียมตรงกับพลังงานที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร ซึ่งจะมีการขยายอยู่สองรูปแบบคือ แบบสองระดับพลังงานจะปั๊มด้วยเลเซอร์ที่ความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร และแบบสามระดับพลังงานจะปั๊มด้วยเลเซอร์ที่ความยาวคลื่น 980 นาโนเมตร การเลือกใช้เลเซอร์เพื่อปั๊มให้กับระบบก็ต้องให้มีพลังงานมากกว่าความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร ซึ่งจะต้องเหมาะสมกับแถบพลังงานของเออร์เบียมด้วย

ระบบการขยายสัญญาณแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดปที่สร้างขึ้นมานั้นจะใช้ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดปยาว 10 เมตร ใช้เลเซอร์ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร เป็นตัวป้อนสัญญาณแสง และใช้ปั๊มด้วยเลเซอร์ความยาวคลื่น 980 นาโนเมตร จะเป็นการขยายแบบสามระดับพลังงานผลที่ได้ ระบบจะมีอัตราขยาย 20 dB จากผลการศึกษาพบว่าการปั๊มด้วยเลเซอร์ที่กำลังมากขึ้นจะได้อัตราขยายสูงขึ้น และระบบมีการตอบสนองกับสัญญาณแสดงได้ดีทั้งที่เป็นสัญญาณแบบต่อเนื่องและสัญญาณที่ได้มีการมอดดูเลต

อัตราขยายของระบบจะขึ้นอยู่กับความยาวของใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดปและกำลังของเลเซอร์ปั๊ม ทั้งสองอย่างนี้จะต้องเหมาะสมจะทำให้ได้อัตราขยายสูงสุด ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดปที่ยาวต้องใช้กำลังแสงเลเซอร์มากเพื่อจะทำให้เพียงพอที่จะทำให้เกิดประชากรผกผันได้อย่างทั่วถึงตลอดความยาวของใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป แต่ถ้ากำลังของเลเซอร์ปั๊มน้อยไปก็จะทำให้การเกิดประชากรผกผันไม่ทั่วถึงตลอดความยาวของใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป ซึ่งจะทำให้เกิดการลดทอนในระบบทำให้ได้อัตราขยายต่ำกว่าที่ควรจะได้ และอีกอย่างหนึ่งที่มีผลต่ออัตราขยายของระบบ คือการเชื่อมต่อที่มีคุณภาพเกิดการสูญเสียของกำลังแสงน้อยที่สุด ในระบบจะมีการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์แต่ละตัว ซึ่งต้องใช้ทักษะและความชำนาญในการที่จะเชื่อมต่อให้ได้คุณภาพดี

การอิ่มตัวของการขยายสัญญาณ สาเหตุแรกเนื่องมาจากการมีจำนวนประชากรผกผันที่จำกัด ซึ่งเกิดจากการที่มีใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดปความยาวจำกัด และกำลังของเลเซอร์ปั๊มมีค่าคงที่ ดังนั้นการเพิ่มกำลังของสัญญาณแสงอินพุตมากขึ้นจะไม่ทำให้ได้อัตราขยายเพิ่มขึ้น และสาเหตุที่สองการกระตุ้นทำให้อิเล็กตรอนกลับมาที่สถานะพื้นมีอัตราคงที่ เกิดจากการป้อนกำลังของสัญญาณแสงอินพุตด้วยกำลังคงที่ ดังนั้นการเพิ่มกำลังของเลเซอร์ปั๊มมากขึ้นจะไม่ทำให้ได้อัตราขยายเพิ่มขึ้น

ความยาวคลื่นของสัญญาณแสงเอาต์พุตนั้นจะพบว่าที่ความยาวคลื่นประมาณ 1532 นาโนเมตรจะมีกำลังและอัตราขยายสูงที่สุด และที่ช่วงความยาวคลื่น 1540-1560 นาโนเมตร จะมีแนวโน้มคงที่ ซึ่งตรงกับความยาวคลื่นที่ต้องการขยายในระบบสื่อสารทางแสงซึ่งจะมีความยาวคลื่นตรงกลางอยู่ที่ 1550 นาโนเมตร และจากการดำเนินงานวิจัยเราได้ทดลองขยายสัญญาณที่ได้มีการมอดดูเลตพบว่าระบบสามารถที่จะขยายสัญญาณได้ตามปกติไม่เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ในระบบการขยายสัญญาณนี้จะเป็นเลเซอร์ในย่านอินฟาเรดซึ่งไม่สามารมองเห็นได้จะมีความยากในการที่จะติดตั้งระบบ ต้องทำด้วยความระมัดระวัง และตรวจสอบระบบในแต่ละส่วนเพื่อให้ได้การส่งผ่านกำลังให้ได้มากที่สุด
- เนื่องจากเลเซอร์ที่ใช้ในการปั๊มให้กับระบบมีกำลังสูง ต้องใช้งานด้วยความระมัดระวังเพราะอาจเกิดอันตรายกับผู้ทดลองได้ และพบว่าเมื่อเลเซอร์กำลังทำงานสามารถที่จะเกิดการไหม้ที่ปลายใยแก้วได้เมื่อเกิดการเสียดสีสามารถเห็นประกายไฟและทำให้ปลายใยแก้วแตกหักได้
- การเชื่อมต่อต้องใช้ทักษะในการทำเป็นพิเศษ ต้องมีการทำความสะอาดปลายของใยแก้วทุกขั้นตอน การตัดต้องให้ได้รอยตัดที่เรียบ และการจัดแนวของปลายใยแก้วให้สัมผัสกันให้พอดีเพื่อที่จะเกิดการหลอมรวมอย่างเหมาะสม
- การติดตั้งเลเซอร์และโฟโต้ดีเท็คเตอร์นั้นต้องมีการจับยึดให้แน่นเพื่อให้ระบบมีคงที่ตลอดการทดลอง
- การใช้โมโนโครมาเตอร์ต้องจัดแนวของลำแสงให้ตรงกับโฟโต้ดีเท็คเตอร์เพื่อที่จะให้ได้กำลังแสงสูงสุด เนื่องจากเป็นแสงที่เราไม่สามารถมองเห็นได้เราจะต้องปรับจนกว่าจะได้กำลังสูงสุดโดยจะแสดงผลที่มิเตอร์วัดกำลัง

5.3 แนวทางในการวิจัยและพัฒนา

การขยายสัญญาณแสงด้วยระบบเชิงแสงนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการสื่อสาร การหารูปแบบของระบบเพื่อให้ได้อัตราขยายที่สูงขึ้น ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดปนอกจากในการทำเป็นระบบการขยายสัญญาณแสงแล้ว ยังสามารถที่จะทำเป็นแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ซึ่งเป็นใยแก้วนำแสงเลเซอร์(Fiber Laser) และนำไปทำเป็นระบบการตรวจจับโดยใช้ใยแก้วนำแสง (Fiber sensor) เช่นการนำไปเป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิ โดยใช้หลักการฟลูออเรสเซ็น (Fluorescent) คือการให้ระบบเกิดการแผ่แสงขึ้นเอง ซึ่งอุณหภูมิจะมีผลต่อเวลาในการแผ่คลื่นแสง ซึ่งต้องมีการปั๊มด้วยเลเซอร์เข้าไปในใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป การจับเวลาจะเริ่มเมื่อมีการปั๊มโดยจะควบคุมการปั๊มด้วยพัลส์ เวลาที่ได้จะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ จึงทำให้สามารถที่จะประยุกต์เป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิได้

เอกสารอ้างอิง

[1] T.Mukai, Y. Yamamoto, and T. Kimura, " Optical amplification by semiconductor laser" , Semiconductor and Semimetals, Vol.22, Part E, PP.265-319, 1989.

[2] A. J. Stentz, " Progress on Raman Amplifiers " , Optical Fiber Communication Conference, Vol.6 , PP.343, 1997.

[3] J. Aspell and N. Bergano, "Erbium-doped Fiber Amplifiers for Future under sea Transmission", SPIE 1373, PP.188-196, 1990.

[4] D. A. Smith, M.W. Maeda, J. J. Johnson, J. S. Patel, M. A. Saifi, and A. von Lehman, "Acoustically tuned erbium-doped fiber ring laser," *Opt.Lett*, vol. 15, pp. 387–389, 1991.

[5] Evgeny V. Vanin, Ulf Persson, "Spectral Functional Forms for Gain and Noise Characterization of Erbium-Doped Fiber Amplifiers", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 20, NO. 2,2002.

[6] P.C.Becker, N.A.Olsson and J.R.Simpson, " Erbium-Doped Fiber Amplifier Fundamentals and Technology " , ACADEMIC PRESS, USA.1999.

[7] P.W.France, " Optical Fiber Lasers & Amplifiers " , Blackie CRC Prees, Inc, USA and Cannada.1991.

[8] Tony Ambrosini," Erbium-Doped Fiber Amplifiers", Optical Fiber Communications, April 21, 2000.

[9] รศ.ดร.ปรีชา ยุพาพิน, " เครือข่ายใยแก้วนำแสง " , สมาคมส่งเสริมเทคดนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพ.2543.

[10] รศ.ดร.ปรีชา ยุพาพิน, " วิศวกรรมใยแก้วนำแสง " , สมาคมส่งเสริมเทคดนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพ.2544.

[11] Qinghe Mao, Jingsong Wang, Xiaohan Sun, Mingde Zhang, " A Theoritical Analysis of Amplification Characteristics of Bi-direction Erbium-Doped Fiber" in Optical communications 159(1999), Full length Article, PP.149-157.

[12] Shoichi Sudo, "Optical Fiber Amplifiers: Materials, Devices and Applications. 1997.

[13] I. Yamashita, K. Shimoura, S. Seikai, and T. Fukuoka, "Er doped fiber amplifier operating at wavelengths of 1.55 and 1.60 □m," *Electron. Lett.*, Vol. 32, 1996,

[14] M. A. Mahdi, F. R. M. Adikan, P. Poopalan, S. Selvakennedy, and H. Ahmad, "High-gain bidirectional Er-doped fiber amplifier for conventional and longwavelength bands," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 12, 2000, pp. 1468–1470.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ใยแก้วนำแสงเออร์เบียมโดป

Erbium-Doped Fiber

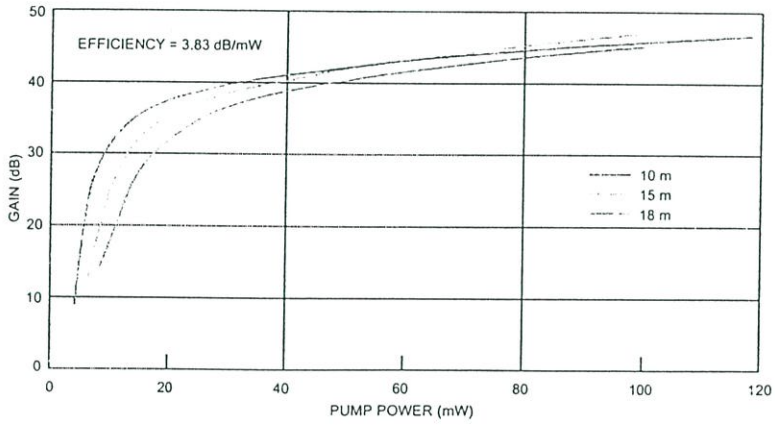
Ordering Information

For ordering information, please see page 266.

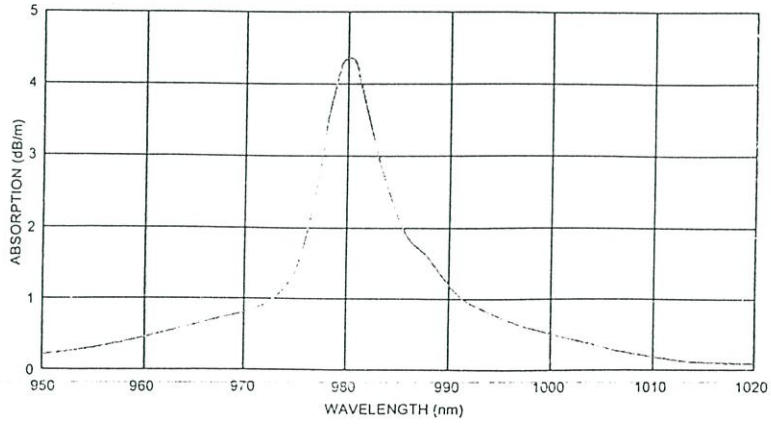
Newport's Erbium-Doped Fiber provides the basic building block to fiber optic amplifiers used in broadband optical networks and CATV applications in the 1550 nm fiber optic transmission window. Having an erbium dopant concentration of 220 ppm, and co-doped with alumina, this fiber can deliver gain-efficiencies in excess of 3.5 dB/mW, when pumped with a 980 nm laser diode. Small signal gains of greater than 20 dB have been achieved with only 12 m of this fiber, over a gain bandwidth of greater than 30 nm.

Specifications

Model	F-EDF
Operating Wavelength	980/1550 nm
Index Profile	Step
NA	0.21
Mode Field Diameter @ 1310 nm	3.5 µm
Cladding Diameter	125/245 µm
Efficiency w/980 nm Pump	3.83 dB/mW
Absorption @ 1535/978 nm	5.5/5.2 dB/m
Cut-off Wavelength	880 nm
Background Loss	3.1 dB/km



Typical amplifier gain vs 980 nm pump power. Note that amplifier gain performance is affected by input signal wavelength, bandwidth and saturation level.



ภาคผนวก ข. Laser Diode Driver

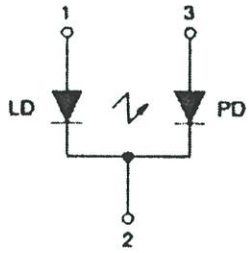
LASER DIODE DRIVER "CCC"

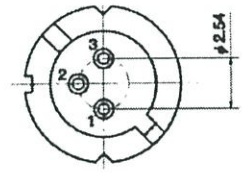
Common laserdiode Cathode and photodiode Cathode

TECHNICAL DATA:

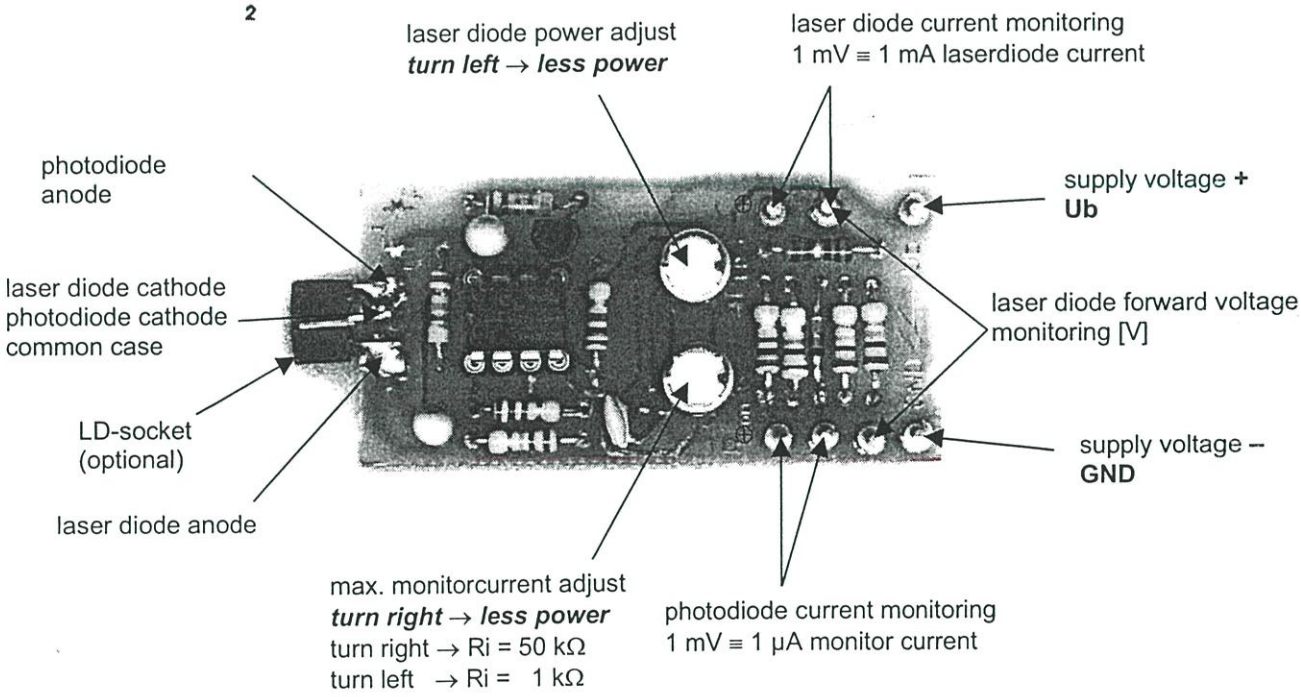
- dimension: 26 x 53 mm²
- supply voltage: min. 2.7 VDC (U_{FLD} + 1.0 VDC) up to 6.0 VDC
- max. laser diode current: typ. 120 mA
- adjustable monitorcurrent: 7.2 µA ... 360 µA
- laser diode power adjustable from 0 bis max.
- laser diode power independent from supply voltage
- low noise

LASERDIODE PINNING:





1) laser diode anode
2) laser diode cathode and photodiode cathode = case
3) photodiode anode



ROITHNER LASERTECHNIK
A-1040 VIENNA, SCHOENBRUNNER STRASSE 7, AUSTRIA
TEL: +43 -1- 586 52 43-0 FAX: +43 -1- 586 52 43-44
office@roithner-laser.com www.roithner-laser.com

ภาคผนวก ค. Optical Power Senser

TEST PERFORMANCE SHEETS
FOR
OPTICAL POWER SENSOR
MA9723A

Serial No. M 83241

The test sheets were made afrer the carefrl inspection of yorr instrument.
The specification items other than following descriptions were also examined and found to be perfect.

ANRITSU CORPORATION
Inspection Dept.
Measuring Instruments Div.

Date	MAR. 1. 1995
Temperature	24 ℃
Relative humidity	23 %
Tested by	Y. Yamagishi
Inspected by	N. Yamagishi

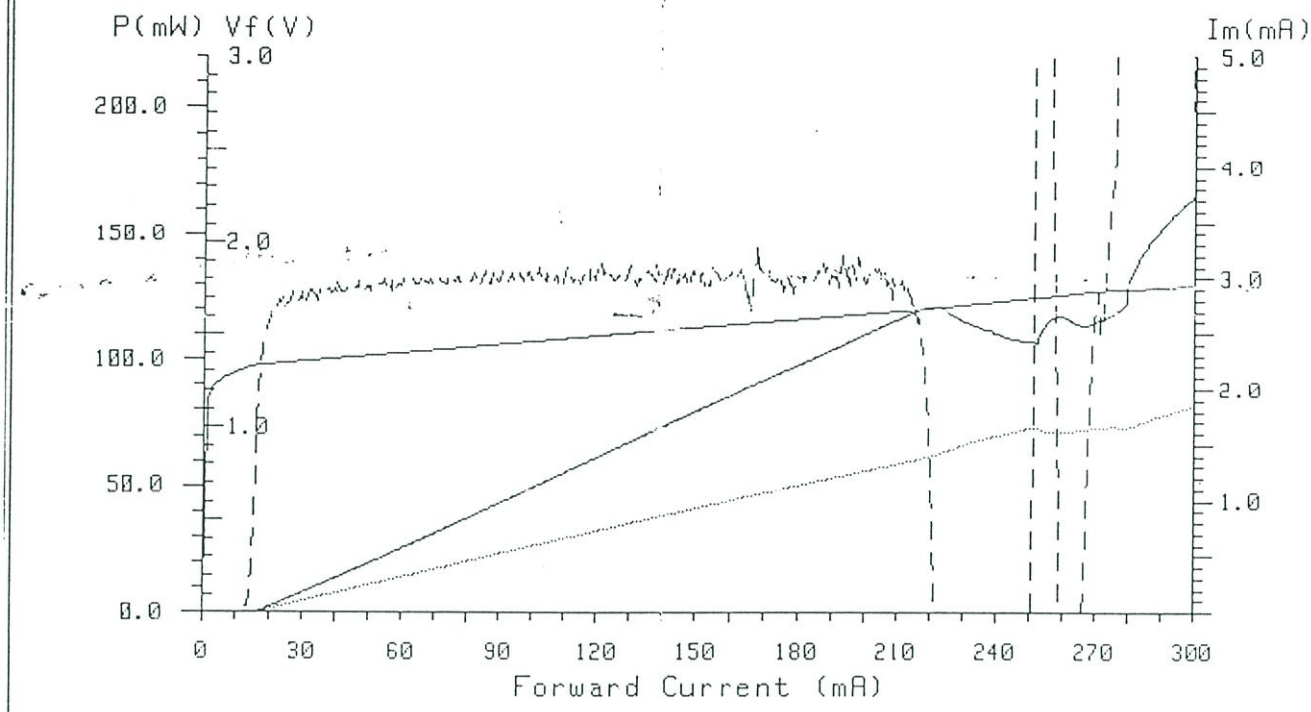
OPTICAL POWER SENSOR

MA9723A M 38241

No.	INSPECTION ITEM	SPECIFICATIONS	MEASURED VALUE	REMARKS
1.	Visual Inspection			
1.1	Construction		Good	
1.2	Appearance		Good	
1.3	Mechanical Operation		Good	
2.	Electrical & Optical Performances			
2.1	Wavelenght	0.75 to 1.8μm	Good	
2.2	Element used	Ge diode	Good	
2.3	Active area dia.	φ1mm	Good	
2.4	Input type	FC Conector adaptor	Good	
2.5	Level range	-60 to +3dBm (CW) -65 to +0dBm (MOD)	Good	at 1.3μm
3.	Overall characteristics			
3.1	Measurement accuracy	±5% at-10dBm, 0.85,1.3,1.55μm ※1	+0.1 %	0.85μm
			0.0 %	1.3μm
			-0.1 %	1.55μm
3.2	Temperature range	Use;0 to 50℃	Good	

※1 Ambient temperature,rated range of use : 0 to 40℃

ภาคผนวก ง. Laser 980 nm

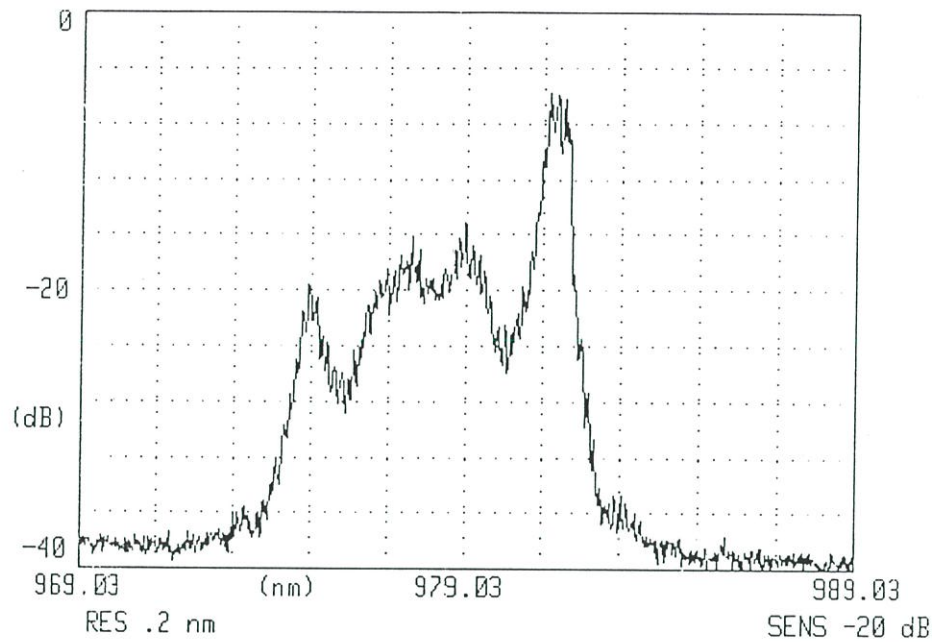


Device Ser No. : P47200.1	Software Name : 980_new_017
Chip Ser No. : 4600D-I1126	Tester ID : ACOLLINS
Date : 10 Jul 99 05:38:24	Node no. : 38

Case temperature 25 Deg C unless stated

Monitor dark current	(nA)	1.20	
Threshold current	(mA)	16.49	
Laser forward current @ 150mW facet power	(mA)	189.8	
Fibre power @ 150 mW facet power	(mW)	103.7	
Monitor photodiode current @ 150 mW facet Po	(mA)	1.20	
Monitor Photodiode Responsivity	(uA/mW)	11.60	
Forward Voltage @ 150 mW facet power	(V)	1.60	
Laser Current for 60 mW & 70 mW Fibre Power	(mA)	118.2	134.7
Laser Current for 80 mW & 90 mW Fibre Power	(mA)	151.2	167.7
Laser Current for 100 mW & 110 mW Fibre Power	(mA)	184.2	200.6
Laser Current for 120 mW & 130 mW Fibre Power	(mA)	217.6	280.1
Laser Current for 140 mW & 150 mW Fibre Power	(mA)	283.1	288.6
Linear Power & Current (-20 - 75 Deg C) (mW)	(mA)	118.5	218.6
Rated Power & Current (210 mA limit) (mW)	(mA)	113.7	210.0
Rated Power & Current (250 mA limit) (mW)	(mA)	118.5	218.6
Rated Power & Current (300 mA limit) (mW)	(mA)	118.5	218.6
Rated monitor current (250 mA limit)	(mA)	1.35	
TEC Current @ If=286 mA; 75 Deg C Case	(A)	.94	
TEC Voltage @ If=286 mA; 75 Deg C Case	(V)	2.21	
Thermistor Resistance @ 25 Deg C	(kOhms)	9.90	
Monitor Current (250 mA rating) 25 Deg C	(mA)	1.39	
Fibre Power (250 mA rating) 25 Deg C	(mW)	120.5	
Fibre Power (250 mA rating) -20 Deg C	(mW)	121.8	
Fibre Power (250 mA rating) 75 Deg C	(mW)	118.5	

FINAL TEST	Tester ID: ACOLLINS	Date: 10 Jul 99 Time: 05:19:02



Case temperature : 25°C	Software : 980_new_017
Submount temperature : 10 kOhm	
Laser current : 189.77 mA	
RMS Centre wavelength : 981.1 nm	Test head : PACKAGE Device type : LC91#-20 Device Serial no. : P47200.1 Chip Serial No. : 4600D-I1126 Node no. : 38
RMS width @ -13 dB : 1.37 nm	

ภาคผนวก จ. Photo Detector

Newport
Newport Corporation
1791 Deere Avenue, Irvine, CA 92606
Telephone: 949-863-3144
Facsimile: 949-253-1800

Detector Calibration Report

Newport
SN 9190
CALIBRATED BY MMS
DATE 10 FEB 00
DUE 10 MAY 01
DD MMM YY

Please remove & apply calibration sticker to the instrument as required.

Detector Model Number: *818-SL*

Detector Serial Number: *9190*

Attenuator Serial Number: *9190*

Operator: *Mary Ann S.*

Calibration Traceable to NIST Number: *844/260986-99*

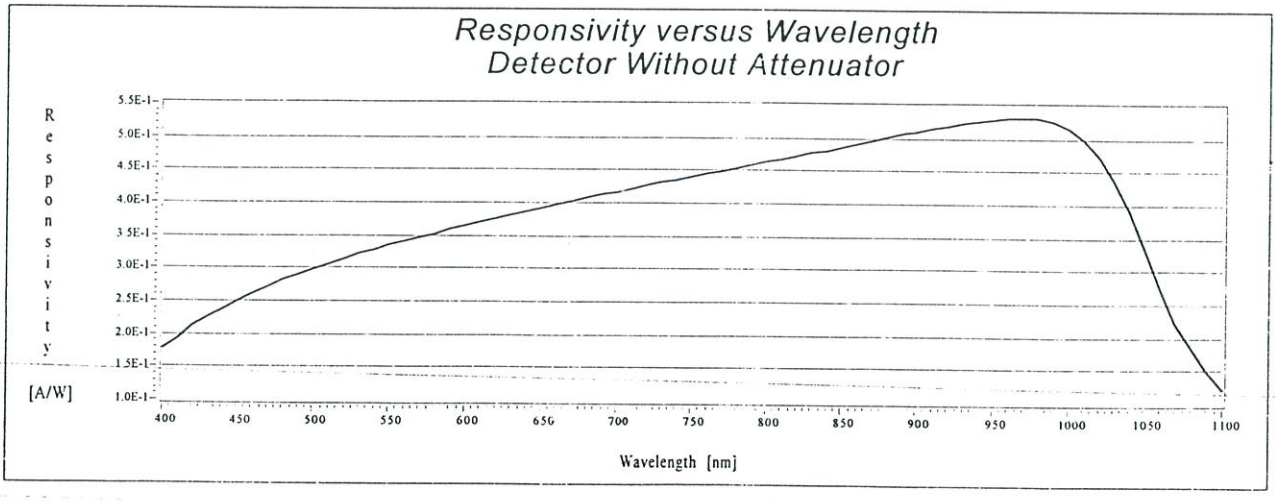
Calibration Date: *10-FEB-2000*

Calibration Temperature: *23.0 ± 0.5 °C*

Complies with ANSI/NCSL Z540-1-1994

Table 1. Responsivity [A/W]: Detector Without Attenuator

Lambda	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
400	1.7680E-1	1.9334E-1	2.1182E-1	2.2463E-1	2.3698E-1	2.4950E-1	2.6068E-1	2.7122E-1	2.8084E-1	2.8981E-1
500	2.9825E-1	3.0640E-1	3.1403E-1	3.2100E-1	3.2794E-1	3.3452E-1	3.4077E-1	3.4695E-1	3.5278E-1	3.5857E-1
600	3.6410E-1	3.7011E-1	3.7511E-1	3.8043E-1	3.8543E-1	3.9154E-1	3.9671E-1	4.0211E-1	4.0768E-1	4.1255E-1
700	4.1714E-1	4.2189E-1	4.2646E-1	4.3121E-1	4.3571E-1	4.4017E-1	4.4501E-1	4.4942E-1	4.5415E-1	4.5873E-1
800	4.6324E-1	4.6771E-1	4.7245E-1	4.7692E-1	4.8156E-1	4.8629E-1	4.9106E-1	4.9584E-1	5.0283E-1	5.0590E-1
900	5.1039E-1	5.1592E-1	5.1793E-1	5.2256E-1	5.2595E-1	5.2785E-1	5.3140E-1	5.3150E-1	5.3075E-1	5.2574E-1
1000	5.1620E-1	4.9984E-1	4.7298E-1	4.3812E-1	3.9066E-1	3.3511E-1	2.7403E-1	2.2344E-1	1.8477E-1	1.5158E-1
1100	1.2172E-1									



Newport Corporation
1791 Deere Avenue, Irvine, CA 92606
Telephone: 949-863-3144
Facsimile: 949-253-1800

Detector Calibration Report

Detector Model Number: *818-SL*

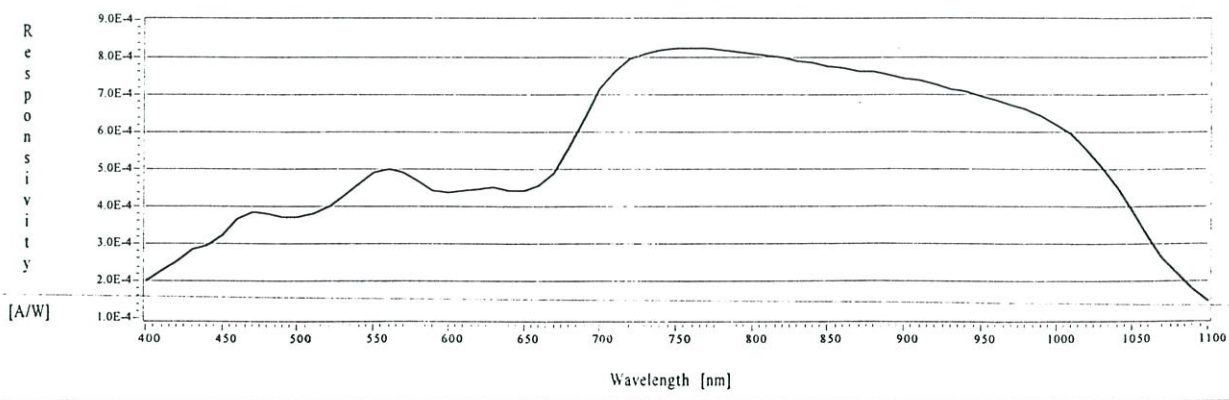
Detector Serial Number: *9190*

Attenuator Serial Number: *9190*

Table 2. Responsivity [A/W]: Detector With Attenuator

Lambda	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
400	1.9820E-4	2.3026E-4	2.5138E-4	2.8491E-4	2.9425E-4	3.2149E-4	3.6782E-4	3.8558E-4	3.7987E-4	3.7289E-4
500	3.7353E-4	3.8117E-4	3.9957E-4	4.2832E-4	4.6399E-4	4.8998E-4	4.9824E-4	4.8819E-4	4.6487E-4	4.4264E-4
600	4.3743E-4	4.4317E-4	4.4941E-4	4.5095E-4	4.4480E-4	4.4347E-4	4.5628E-4	4.9080E-4	5.5476E-4	6.3984E-4
700	7.1510E-4	7.6426E-4	7.9360E-4	8.1087E-4	8.1964E-4	8.2350E-4	8.2420E-4	8.2241E-4	8.1958E-4	8.1483E-4
800	8.0917E-4	8.0342E-4	7.9782E-4	7.9186E-4	7.8493E-4	7.7768E-4	7.7076E-4	7.6384E-4	7.6022E-4	7.5089E-4
900	7.4256E-4	7.3734E-4	7.2730E-4	7.1666E-4	7.0752E-4	6.9512E-4	6.8614E-4	6.7294E-4	6.5987E-4	6.4288E-4
1000	6.2124E-4	5.9326E-4	5.5475E-4	5.0935E-4	4.5223E-4	3.8824E-4	3.1902E-4	2.6197E-4	2.1770E-4	1.7972E-4
1100	1.4529E-4									

Responsivity versus Wavelength
Detector With Attenuator



Newport Corporation
1791 Deere Avenue, Irvine, CA 92606
Telephone: 949-863-3144
Facsimile: 949-253-1800

Detector Calibration Report

Detector Model Number: *818-SL*

Detector Serial Number: *9190*

Attenuator Serial Number: *9190*

Table 3. Calibration Factors: Detector Without Attenuator

Lambda	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
400	5.656E+0	5.172E+0	4.721E+0	4.452E+0	4.220E+0	4.008E+0	3.836E+0	3.687E+0	3.561E+0	3.451E+0
500	3.353E+0	3.264E+0	3.184E+0	3.115E+0	3.049E+0	2.989E+0	2.935E+0	2.882E+0	2.835E+0	2.789E+0
600	2.746E+0	2.702E+0	2.666E+0	2.629E+0	2.594E+0	2.554E+0	2.521E+0	2.487E+0	2.453E+0	2.424E+0
700	2.397E+0	2.370E+0	2.345E+0	2.319E+0	2.295E+0	2.272E+0	2.247E+0	2.225E+0	2.202E+0	2.180E+0
800	2.159E+0	2.138E+0	2.117E+0	2.097E+0	2.077E+0	2.056E+0	2.036E+0	2.017E+0	1.989E+0	1.977E+0
900	1.959E+0	1.938E+0	1.931E+0	1.914E+0	1.901E+0	1.894E+0	1.882E+0	1.881E+0	1.884E+0	1.902E+0
1000	1.937E+0	2.001E+0	2.114E+0	2.282E+0	2.560E+0	2.984E+0	3.649E+0	4.475E+0	5.412E+0	6.597E+0
1100	8.215E+0									

Table 4. Calibration Factors: Detector With Attenuator

Lambda	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
400	5.045E+3	4.343E+3	3.978E+3	3.510E+3	3.398E+3	3.111E+3	2.719E+3	2.593E+3	2.633E+3	2.682E+3
500	2.677E+3	2.623E+3	2.503E+3	2.335E+3	2.155E+3	2.041E+3	2.007E+3	2.048E+3	2.151E+3	2.259E+3
600	2.286E+3	2.256E+3	2.225E+3	2.218E+3	2.248E+3	2.255E+3	2.192E+3	2.038E+3	1.803E+3	1.563E+3
700	1.398E+3	1.308E+3	1.260E+3	1.233E+3	1.220E+3	1.214E+3	1.213E+3	1.216E+3	1.220E+3	1.227E+3
800	1.236E+3	1.245E+3	1.253E+3	1.263E+3	1.274E+3	1.286E+3	1.297E+3	1.309E+3	1.315E+3	1.332E+3
900	1.347E+3	1.356E+3	1.375E+3	1.395E+3	1.413E+3	1.439E+3	1.457E+3	1.486E+3	1.515E+3	1.556E+3
1000	1.610E+3	1.686E+3	1.803E+3	1.963E+3	2.211E+3	2.576E+3	3.135E+3	3.817E+3	4.593E+3	5.564E+3
1100	6.883E+3									

Wavelength Range	Accuracy Over the Range WITHOUT the Attenuator	Accuracy Over the Range WITH the Attenuator
400 - 1100	± 2 %	± 2 %

ประวัติผู้เขียน

นายวันชัย ขันนาม เกิดเมื่อ วันที่ 25 ธันวาคม พ.ศ. 2519 จ. มหาสารคาม สำเร็จการศึกษา วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์คอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์ จากมหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก ปีการศึกษา 2541 ปี พ.ศ. 2542 รับราชการในตำแหน่งอาจารย์ ที่ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก จนถึงปัจจุบัน และในปี พ.ศ. 2543 ได้ลาศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง